

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:
Construção e Infraestrutura

Priscila Cristina Henke

Estudo de Algumas Variáveis Geotécnicas na Estabilidade de Aterros Sanitários

Porto Alegre
2024



ESCOLA DE ENGENHARIA
UFRGS



PPGCI

PRISCILA CRISTINA HENKE

**ESTUDO DE ALGUMAS VARIÁVEIS GEOTÉCNICAS NA
ESTABILIDADE DE ATERROS SANITÁRIOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Prof. William Fedrigo

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Orientador

Prof. Luiz Antônio Bressani

PhD pela University of London, Inglaterra

Coorientador

Porto Alegre
2024

PRISCILA CRISTINA HENKE

**ESTUDO DE ALGUMAS VARIÁVEIS GEOTÉCNICAS NA ESTABILIDADE DE
ATERROS SANITÁRIOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Sustentabilidade e Gestão de Risco, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2024.

Prof. William Fedrigo

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Orientador

Prof. Luiz Antônio Bressani

PhD pela University of London, Reino Unido
Coorientador

Prof. Ana Carolina Badalotti Passuello
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Boris Casanova Sokolovicz (URI)
Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico à Martina Keiber e Tia Tere. À todas as
vítimas do COVID-19, em especial Vó Jurema e
Tio Ade.

AGRADECIMENTOS

Meu maior sonho está se realizando, graças a Deus, que me sustentou e capacitou por todos esses anos de persistência. “Meu Deus não está morto, vivo está; Aqui dentro de mim Rugindo como um leão.”

Agradeço ao meu esposo Natan, que me apoiou desde quando esse sonho era só um plano muito distante. Esteve comigo nos altos e baixos, incentivando e muitas vezes se sentando para discutir as ideias comigo.

Agradeço aos meus queridos pais, Alceu e Lucia, que sufoco gente, foram anos desafiadores para nossa família, mas Deus esteve conosco. Vocês sempre foram minha força. Nunca deixaram de acreditar em mim, mesmo quando nem eu acreditei mais.

Agradeço aos meus orientadores William Fedrigo e Luiz Antônio Bressani por acreditarem em mim desde o começo, pela infinita paciência por todos os momentos difíceis que passei. Quando me imagino como profissional e professora, me espelho em vocês.

A BSE Engenharia Geotécnica e Ambiental, em especial ao Engenheiro Eduardo Simões pelas reuniões, as quais me ajudaram muito no direcionamento da minha escrita, nas dúvidas das simulações, fornecimento de dados, espero ter conseguido alcançar a excelência de vocês.

Aos colegas de mestrado, em especial, a Síntique por todos os momentos de força, ao Luigi pelas discussões, ajudas, força e apoio, palavras de incentivo, grande amigo e profissional.

A Pati, Daniel, Yasmin e Liz, muitos foram os momentos de dizer “toma um energético e vai”, e muitas vezes precisei dessa força.

Aos meus queridos amigos, em especial, Maria, Larissa, Vivi e Eliane, me deram palavras de conforto e incentivo nos momentos de necessidade.

A todos os meus tios, tias, dindos e dindas, toda minha grande família, eu sou uma ponta de um grande iceberg, uma grande rede de apoio, força e carinho. Em especial, Tio Carlos e Andrea, Tio Marino, Tia Ilce, Dinda Neli e Antenor.

Ao PPGCI, nunca me senti mais pertencente a algo como a esse programa. Ser tratada como ser humano faz diferença nesse momento, pois a pesquisa, muitas vezes, pode ser um período de solidão. A todos os professores que fizeram parte desta formação.

A FASA que confiou e acreditou no meu trabalho.

A CAPES pelo incentivo com a bolsa, a qual permitiu que pudesse trabalhar de maneira integral.

A todos que de alguma maneira direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

*“Com grandes poderes, vem grandes responsabilidades.”
Uncle Ben Parker*

RESUMO

HENKE, P. C. **Estudo de Algumas Variáveis Geotécnicas Na Estabilidade De Aterros Sanitários**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Essa pesquisa é um estudo sobre comportamento de algumas variáveis geotécnicas na estabilidade de aterros sanitários. Para o estudo foi utilizada geometria do aterro sanitário de São Leopoldo, Brasil, especificamente as seções 3, 6, 8 e 10. Os parâmetros geotécnicos dos resíduos sólidos urbanos (RSU), os parâmetros de poropressão, nível da altura da coluna de chorume, interação entre geomembrana e outros materiais, e métodos de estabilidade de taludes foram as variáveis analisadas no estudo. Todas as análises foram simuladas no *software Slide 6.0* e encontrado seus fatores de segurança (FS). Os resultados encontrados para a variação dos parâmetros de resistência do RSU e poropressão na grande maioria teve o FS enquadrado no mínimo considerado pela NBR 11.682/09. Apesar disso teve uma variabilidade entre o maior FS e o menor FS de cerca de +24%. Para a variação dos parâmetros de resistência do RSU e nível de chorume os resultados foram de maior monta, pois o FS para a grande maioria se enquadrou na condição considerada como de intervenção pelos critérios do empreendimento. A variabilidade do FS chegou a alcançar +40%, ou seja, existe uma grande sensibilidade na análise da estabilidade de aterros sanitários, onde deve-se levar em consideração, não somente o parâmetro de poropressão (R_u), mas também o nível de chorume. Pelo grande número de incertezas que um aterro de RSU traz, é importante diminuir o máximo essa variabilidade. A análise da interação entre os contatos da geomembrana com os materiais os FS encontrados estão dentro do aceitável. Mas houve uma variabilidade da interação entre geomembrana lisa e rugosa, chegando até a +37%, mostrando sensibilidade que esses contatos possuem, e trazendo mais um ponto de variabilidade e incerteza. O intuito de trazer alternativas de melhorias de projeto vem de encontro com a grande produção de resíduos e a necessidade de expansão dos aterros. Pela dificuldade de se obter licenças para novos aterros, a verticalização destes tem sido uma solução para aumentar a capacidade das instalações. As simulações com diques de argila compactada tiveram resultados mais positivos, se comparados às soluções com diques de RSU. Porém, com a disponibilidade do RSU, esta alternativa se torna mais viável, pois além de possibilitar o aumento da estabilidade do maciço, é mais econômica.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. RSU. Poropressão. Chorume. Interação entre contatos.

ABSTRACT

HENKE, P. C. Study of Some Geotechnical Variables Stability of Sanitary Landfills. 2024. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

This research is a study on the behavior of some geotechnical variables in the stability of landfills. For the study, the geometry of the sanitary landfill in São Leopoldo, Brazil, was used, specifically sections 3, 6, 8 and 10. The geotechnical parameters of municipal solid waste (MSW), pore pressure parameters, leachate column height level, interaction between geomembrane and other materials, and slope stability methods were the variables analyzed in the study. All analyzes were simulated in the Slide 6.0 software and their safety factors (FS) were found. The results found for the variation of MSW resistance and pore pressure parameters in the vast majority had the FS above the minimum recommended by NBR 11.682/09. Despite this, there was a variability between the highest FS and the lowest FS of around +24%. For the variation of MSW resistance parameters and leachate level, the results presented higher differences, as the FS for the vast majority were into the intervention numerical level (owner's criteria). The FS variability reached +40%, that is, there is great sensitivity in analyzing the stability of landfills, where not only the pore pressure parameter (R_u), but also the leachate level must be considered. Due to the large number of uncertainties that an MSW landfill brings, it is important to reduce this variability as much as possible. The analysis of the interaction between the contacts of the geomembrane with the materials found values of FS within the acceptable range. But there was a variability in the interaction between smooth and rough geomembrane, reaching up to +37%, showing the sensitivity that these contacts have, and bringing another point of variability and uncertainty. The aim of bringing alternatives for project improvements gives support to the landfill expansion needs due to large waste production. Due to the difficulty of obtaining licenses for new landfills, their verticalization has been a solution to increase the capacity of the facilities. Simulations with compacted clay dikes had more positive results compared to those with MSW dikes. However, due to the availability of MSW the alternative of MSW dykes becomes more viable due to costs, in addition to making it possible to increase the stability of the mass.

Keywords: Landfill. MSW. Pore pressure. Leachate. Interaction between contacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de trincheira.....	30
Figura 2 - Método de área.....	31
Figura 3 - Método de rampa.....	31
Figura 4 - Arranjo básico de um aterro de resíduos sólidos.....	34
Figura 5 - Concentração dos principais gases em função das fases de degradação dos resíduos sólidos.....	36
Figura 6 - Esquema das rotas de utilização do gás do lixo (GDL).....	39
Figura 7 - Modelo proposto das 4 fases da resistência de RSU por KOLSCH, 1996.....	47
Figura 8 - Múltiplas aplicações do geossintético em projetos de aterro sanitário.....	49
Figura 9 - Cinco tipos de sistema de revestimento: (a) Revestimento simples: Revestimento de geomembrana; (b) Revestimento único: Revestimento Composto; (c) Revestimento Duplo: Revestimento de geomembrana dupla; (d) Revestimento duplo: Revestimento da geomembrana superior e Revestimento composto inferior; (e) Revestimento duplo: Revestimento composto duplo.....	50
Figura 10 - Exemplos de Sistema Linear Duplo usando duas geomembranas.....	51
Figura 11 - Falhas de solo de cobertura (a) falha por tração (b) falha por escorregamento.....	52
Figura 12 - Falhas de trincheiras de ancoragem (a) retirada de linhas (b) ruptura localizada..	53
Figura 13 - Razão de σ_1 / σ_3 X deformação para comparar os modelos constitutivos desenvolvidos nas mesmas condições.....	58
Figura 14 - Simulação de um aterro RSU, com o método de Morgenstern-Price.....	60
Figura 15 - Esquema de forças na fatia pelo método de Fellenius (1936).....	61
Figura 16 - Esquema de forças na fatia pelo método simplificado de Bishop (1955).....	62
Figura 17 - Esquema da força resultante na interação entre as fatias pelo método de Spencer (1967).....	63
Figura 18 - Esquema de forças na fatia pelo método de Morgenstern - Price (1965).....	64
Figura 19 - Mapa de localização do aterro sanitário da CRVR - Unidade de São Leopoldo..	69
Figura 20 - Central de tratamento de resíduos de São Leopoldo.....	70
Figura 21 - Disposição dos Resíduos dentro da Central de tratamento de resíduos de São Leopoldo.....	70
Figura 22 - Planta baixa retirada do projeto topográfico 16/01/23.....	71
Figura 23 - Vista superior retirada do Google Maps.....	72
Figura 24 – Seção 3 em corte longitudinal.....	73

Figura 25 - Seção 6 em corte longitudinal.....	73
Figura 26 - Seção 8 em corte longitudinal.....	73
Figura 27 - Seção 10 em corte longitudinal.....	74
Figura 28 - Planta baixa com marcação dos piezômetros 14/04/2022.....	74
Figura 29 - Detalhamento da impermeabilização das fases 1, 2, 3 e 4, onde há a presença de solo argiloso.....	76
Figura 30 - Detalhamento da impermeabilização das fases 5 e 6, onde há a presença de geocomposto bentonítico GB.....	77
Figura 31 - Configuração no Slide 6.0 das opções de superfície.....	78
Figura 32 - Seção 3 - tipo inserido no Slide 6.0.....	81
Figura 33 - Seção 6 - tipo inserido no Slide 6.0.....	81
Figura 34 - Seção 8 - tipo inserido no Slide 6.0.....	82
Figura 35 - Seção 10 - tipo inserido no Slide 6.0.....	82
Figura 36 - Simulação com Chorume, Seção 3 - tipo inserido no Slide 6.0.....	85
Figura 37 - Simulação com Chorume, Seção 6 - tipo inserido no Slide 6.0.....	85
Figura 38 - Simulação com Chorume, Seção 8 - tipo inserido no Slide 6.0.....	85
Figura 39 - Simulação com Chorume, Seção 10 - tipo inserido no Slide 6.0.....	86
Figura 40 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Bishop Simplificado..	89
Figura 41 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Spencer.....	89
Figura 42 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Morgenstern-Price....	89
Figura 43 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Bishop Simplificado..	90
Figura 44 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Spencer.....	90
Figura 45 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Morgenstern-Price....	90
Figura 46 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Bishop Simplificado.	91
Figura 47 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Spencer.....	91
Figura 48 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Morgenstern-Price....	91
Figura 49 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Bishop Simplificado.	92
Figura 50 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Spencer.....	92
Figura 51 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Morgenstern-Price....	92
Figura 52 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Geotêxtil não tecido para Bishop Simplificado.....	93
Figura 53 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Geotêxtil não tecido para Spencer.	93

Figura 54 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Geotêxtil não tecido para Morgenstern-Price.....	93
Figura 55 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Geotêxtil não tecido para Bishop Simplificado.....	94
Figura 56 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Geotêxtil não tecido para Spencer.....	94
Figura 57 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Morgenstern-Price....	94
Figura 58 – Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada).....	97
Figura 59 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Bishop Simplificado.....	97
Figura 60 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Spencer.....	97
Figura 61 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Morgenstern-Price.....	98
Figura 62 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique RSU.....	99
Figura 63 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Bishop Simplificado.....	99
Figura 64 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Spencer.....	99
Figura 65 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Morgenstern-Price.....	100
Figura A66 - Simulação com parâmetro de poropressãp (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	113
Figura A67 - Simulação com parâmetro de poropressãp (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	113
Figura A68 - Simulação com parâmetro de poropressãp (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern - Price.....	114
Figura A69 - Simulação com parâmetro de poropressãp (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	114
Figura A70 - Simulação com parâmetro de poropressãp (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	115

Figura A71 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	115
Figura A72 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	116
Figura A73 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	116
Figura A74 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	117
Figura A75 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	117
Figura A76 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	118
Figura A77 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	118
Figura B78 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	119
Figura B79 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	119
Figura B80 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	120
Figura B81 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	120
Figura B82 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	121
Figura D83 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	121
Figura B84 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	122
Figura B85 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	122
Figura B86 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	123
Figura B87 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	123

Figura B88 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	124
Figura B89 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	124
Figura C90 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	125
Figura C91 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	125
Figura C92 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	126
Figura C93 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	126
Figura C94 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	127
Figura C95 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	127
Figura C96 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	128
Figura C97 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	128
Figura C98 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	129
Figura C99 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	129
Figura C100 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	130
Figura C101 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	130
Figura D102 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	131
Figura D103 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	131
Figura D104 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	132

Figura D105 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	132
Figura D106 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	133
Figura D107 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	133
Figura D108 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	134
Figura D109 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	134
Figura D110 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	135
Figura D111 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.....	135
Figura D112 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.....	136
Figura D113 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.....	136
Figura E114 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	137
Figura E115 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	137
Figura E116 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	138
Figura E117 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	138
Figura E118 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	139
Figura E119 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	139
Figura E120 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	140
Figura E121 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	140

Figura E122 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	141
Figura E123 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.....	141
Figura E124 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.....	142
Figura E125 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.....	142
Figura F126 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	143
Figura F127 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spemcer.....	143
Figura F128 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	144
Figura F129 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	144
Figura F130 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	145
Figura F131 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	145
Figura F132 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	146
Figura F133 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	146
Figura F134 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	147
Figura F135 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.....	147
Figura F136 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.....	148
Figura F137 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Considerações técnicas para a escolha da área da nova instalação – Parte 1.....	32
Tabela 2 - Considerações técnicas para a escolha da área da nova instalação – Parte 2.....	33
Tabela 3 - Componentes característico de biogás de aterro sanitário.....	36
Tabela 4 - Principais parâmetros geotécnicos que afetam a emissão de biogás.....	38
Tabela 5 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 1.....	41
Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 2.....	42
Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 3.....	43
Tabela 8 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 4.....	44
Tabela 9 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 5.....	45
Tabela 10 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 6.....	46
Tabela 11 - Valores médios de algumas propriedades de geomembranas fabricadas no Brasil.	54
Tabela 12 - Faixas de variação de ângulos de atrito de interface (em graus) entre solos, geossintéticos e geomembranas.....	55
Tabela 13 - Ângulo de atrito para interface geomembrana/geotêxtil não tecido.....	55
Tabela 14 - Comparação dos modelos constitutivos considerados para RSU.....	57
Tabela 15 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.....	66
Tabela 16 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	66
Tabela 17 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	67
Tabela 18 - FS em relação a condição do aterro.....	67
Tabela 19 - Referências bibliográficas de parâmetros geotécnicos definidas para as simulações.....	75
Tabela 20 - Valores do parâmetro de poropressão (ru) utilizadas para as simulações.....	79
Tabela 21 - Resumo dos FS encontrados nas simulações com presença de do parâmetro de poropressão ru, parâmetros geotécnicos x métodos/seções.....	82
Tabela 22 - Resumo dos FS encontrados nas simulações com nível de chorume, parâmetros geotécnicos x métodos/seções.....	86
Tabela 23 - Relação dos materiais, ângulos de atrito e referências bibliográficas para simulação dos contatos geomembrana x materiais.....	88
Tabela 24 - Resumo da variação do FS em relação à variação da resistência dos contatos....	95
Tabela 25 - Comparação do maciço sem e com dique (argila compactada).....	98

Tabela 26 - Comparação do maciço sem e com dique (RSU).....	100
Tabela 27 - Resumo dos FS de todos as propostas de melhoramento de projeto.....	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação para definição do parâmetro de poropressão (ru).....	59
Equação 2 – FS com Método de Fellenius.....	61
Equação 3 - Fator de Segurança com o mesmo valor do equilíbrio das forças e dos momentos.	63
Equação 4 - Força Q_i	63
Equação 5 - Equilíbrio das forças.....	63
Equação 6 - Equilíbrio dos momentos.....	64
Equação 7 - Relação entre E e T.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CC: Cam Clay

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CH₄: Metano

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

CRVR: Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos

DHP: Drenagem Horizontal Profunda

EESC-USP: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

FS: Fator de Segurança

GB: Geocomposto Bentonítico

GCL: Geocomposto Argiloso

GDL: Gás Do Lixo

GML: Geomembrana Lisa

GMR: Geomembrana Rugosa

H₂: Hidrogênio

MCC: Cam Clay Modificado

N₂: Dióxido de Nitrogênio

NBR: Norma técnica Brasileira

NH₃: Amônia

O₂: Oxigênio

OCA: Organismos de Sistemas de Gestão Ambiental

PEAD: Polietileno de Alta Densidade

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC: Policloreto de Vinil

RIMA: Relatório de Impacto Ambiental

RSU: Resíduo Sólido Urbano

Ru: Parâmetro de Poropressão

SISNAMA: Sistema Nacional de Meio Ambiente

SPR: Superfície Potencial de Ruptura

SUASA: Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

UC: Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA.....	23
1.2. QUESTÕES DE PESQUISA.....	25
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1. RESÍDUOS.....	26
2.2. ATERROS.....	28
2.3. COMPORTAMENTO DO BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO.....	34
2.4. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARA ATERROS RSU.....	40
2.5. RESISTÊNCIA DAS INTERFACES ENTRE GEOMEMBRANA E DIFERENTES MATERIAIS.....	48
2.6. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GERAL.....	56
2.6.1. Modelos Geomecânicos.....	56
2.6.2. Parâmetro de poropressão (Ru).....	59
2.6.3. Método de Análise de Estabilidade de Taludes.....	60
2.6.3.1. Método de Fellenius.....	61
2.6.3.2. Método Simplificado de Bishop.....	62
2.6.3.3. Método de Spencer.....	62
2.6.3.4. Método de Morgenstern-Price.....	64
2.6.4. NBR 11682:2009 – Estabilidade de encostas.....	65
3. METODOLOGIA.....	68
3.1. CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SÃO LEOPOLDO.....	68
3.2. GEOMETRIA.....	70
3.3. PARÂMETROS.....	75
3.3.1. Resistência ao Cisalhamento dos Resíduos.....	75
3.3.2. Fundação.....	75

3.3.3. Interface do contato entre geomembrana PEAD lisa (GML) e geotêxtil não tecido	76
3.3.4. Superfície de Ruptura Potencial.....	77
3.3.5. Definição do parâmetro de poropressão ru.....	78
3.3.6. Definição do Nível de Chorume.....	79
3.4. MÉTODO DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
4.1. VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E POROPRESSÃO (ru)	81
4.2. VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E NÍVEL DE CHORUME	85
4.3. INFLUÊNCIA DOS CONTATOS GEOMEMBRANA x MATERIAIS.....	88
4.4. ALTERNATIVAS DE MELHORIAS DE PROJETO.....	96
4.4.1. Mudança de geométrica com acréscimo de dique de argila compactada.....	96
4.4.2. Mudança de geométrica com acréscimo de dique de RSU.....	99
5. CONCLUSÕES.....	102
5.1. SUGESTÕES.....	104
REFERÊNCIAS.....	105
APÊNDICE A – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para parâmetro geotécnico de Suzuki (2012).....	113
APÊNDICE B – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para Fan <i>et al.</i>(2016).....	119
APÊNDICE C – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para BSE (2023).....	125
APÊNDICE D – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para Suzuki (2012).....	131
APÊNDICE E – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para Fan <i>et al.</i> (2016).....	137
APÊNDICE F – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para BSE (2023).....	143

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada a contextualização do tema, envolvendo a problemática dos parâmetros que envolvem os projetos de alguns aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos nacionais e internacionais, aplicados na estabilidade dos aterros, assim como a justificativa para a realização do estudo. Na sequência são expostos a questão de pesquisa e os objetivos.

1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) é inerente à vida humana e tem se tornado um problema em diversos países. Eles são definidos como resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004). Nos últimos anos, diversas políticas públicas têm procurado apresentar alternativas para solucionar o problema, visando estabelecer diretrizes para o descarte desses materiais, especialmente através da disposição em aterros sanitários. Segundo a NBR 8419/92, o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é a técnica de disposição de RSU de maneira a não causar danos ambientais ou à saúde pública. Este método utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos na menor área possível, garantindo uma impermeabilização inferior e cobrindo os resíduos com camadas de solo em intervalos pré-determinados, mantendo assim o isolamento dos vetores e do meio ambiente (redução de odores, controle de vetores e prevenção de zoonoses).

Com o aumento da urbanização e o crescimento das populações urbanas, a produção de resíduos sólidos urbanos tem aumentado significativamente (ZHANG et al, 2020). Devido a esse grande aumento nos resíduos produzidos pelos municípios, os aterros podem atingir grandes proporções (milhões de m³), resultando na formação de aterros de altura considerável (20-50m). Por questões econômicas e ambientais, é importante que os aterros tenham faces com inclinação significativa, como forma de reduzir as áreas ocupadas. Portanto, essas estruturas devem ser estáveis para não comprometer as diversas camadas de proteção e contenção dos RSU e não se tornarem um risco para os operadores e a população ao redor (BABU, REDDY, SRIVASTAVA, 2014; ISMAIL et al, 2019; MEHDIZADEH, SHARIATMADARI, KARIMPOUR-FARD, 2020).

Dentro desse contexto, esta pesquisa visa investigar o estado da arte atual em relação aos procedimentos de cálculo dos fatores de segurança (FS) para a estabilidade de aterros construídos com resíduos sólidos urbanos (RSU) ou industriais inertes (Classe II). Utilizando a geometria de um aterro sanitário de São Leopoldo e simulando os parâmetros de resistência do maciço de vários pesquisadores com o *software Slide 6.0*. Diversos fatores interagem para a estabilidade dessa massa de resíduos, tais como o grau de compactação dos RSU, a resistência dos materiais (resíduos e interfaces entre os diversos materiais utilizados na construção) e a geometria do maciço de resíduos conforme construído (PENGCHENG et al, 2019). Considerando esses efeitos combinados (além do perfil socioeconômico da população) com o nível do lixiviado e o aumento de pressão causado pela geração de gás a partir da degradação dos RSU na análise de estabilidade de taludes é, portanto, uma tarefa muito crítica no projeto, operação e gerenciamento de aterros sanitários (SHU et al, 2021).

Existem muitas variáveis de difícil definição para o cálculo dos FS através de métodos de equilíbrio limite, que são normalmente utilizados. Além dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, que por si só já possuem diversas variáveis, há valores de resistência de atrito nos contatos entre os geossintéticos/geomembranas, utilizados na impermeabilização, e coberturas dos aterros, os quais precisam ser bem determinados. Segundo Rebelo (2003), o comportamento de resistência ao cisalhamento nas interfaces envolvendo a membrana e os materiais depende de muitos fatores, como por exemplo: o tipo de membrana (lisa, rugosa, flexível ou rígida), tipo de solo (granular ou argiloso), condições de compactação desses solos e saturação. Um outro aspecto importante nas análises refere-se aos valores de pressão de gases e de pressão hidráulica existentes no aterro. Os gases (biogás) e o chorume são produtos derivados da decomposição bioquímica dos resíduos depositados nos aterros (PENGCHENG et al, 2019). Em muitos casos, é usual a utilização dos parâmetros de poropressão (ru) nos cálculos de estabilidade, e isso será avaliado na pesquisa.

No projeto, foi estudada uma situação real, com a utilização da geometria do aterro sanitário de São Leopoldo, e os parâmetros de resistência do RSU de autores nacionais e internacionais. Foram avaliados os parâmetros de resistência, as variações dos contatos, o FS com a presença de Ru e a presença de chorume. Além disso, foram feitas propostas de melhoramento de projeto. Essas situações foram simuladas no *software Slide 6.0*.

1.2. QUESTÕES DE PESQUISA

Com base no contexto e na justificativa, a seguinte questão de pesquisa é estabelecida: Como as variáveis geotécnicas de interesse interagem com os gases e lixiviados para garantir a estabilidade do aterro?

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa foi estudar algumas variáveis geotécnicas de interesse (geometria, os contatos entre geossintéticos x materiais, parâmetros dos materiais geotécnicos, parâmetros de poropressão ru , nível de chorume e métodos de análise) na estabilidade de aterros sanitários compostos por resíduos sólidos urbanos (RSU), focando no estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo.

- Avaliar os parâmetros utilizados em projetos de alguns aterros sanitários nacionais e internacionais;
- Definir as variáveis para o cálculo do fator de segurança;
- Elaborar uma avaliação crítica dos procedimentos para análise de estabilidade utilizados em diferentes aterros e em diferentes culturas técnicas, especialmente considerando as pressões de gases (biogás) e lixiviados (chorume);
- Estudar alternativas de melhorias de projeto e de mitigação de riscos em obras já executadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O propósito deste levantamento bibliográfico é apresentar um breve resumo das principais condicionantes envolvidas nos projetos de construção e operação de aterros sanitários, destacando as variáveis essenciais e identificando possíveis lacunas de conhecimento para futuras pesquisas no campo. As áreas de enfoque incluem:

- Detalhes Construtivos:
 - Camadas de proteção do subsolo;
 - Impermeabilização;
 - Contato entre camadas de impermeabilização;
 - Drenagem dos líquidos percolados.
- Resistência ao Cisalhamento dos Diferentes Materiais:
 - Variabilidade dos resíduos e sua variação temporal;
 - Parâmetros de resistência da massa de RSU;
 - Interfaces entre os diferentes materiais - geossintéticos e geomembranas com solo.
- Geração de Lixiviado e Gases:
 - Incorporação das pressões resultantes nas análises.
- Técnicas de Análise:
 - Resistência ao cisalhamento;
 - Estabilidade do maciço.

Este resumo visa proporcionar uma visão abrangente das áreas críticas nos projetos de aterros sanitários, destacando aspectos cruciais como a construção física, a resistência dos materiais envolvidos, a consideração dos processos de geração de lixiviado e gases, bem como as técnicas analíticas utilizadas na avaliação da estabilidade do maciço.

2.1. RESÍDUOS

A produção de resíduos sólidos é inerente à vida humana e tornou-se um problema significativo em vários países, especialmente em nações altamente populosas como Brasil, China e Índia. Em resposta a esse desafio, políticas públicas têm sido desenvolvidas para a gestão adequada desses materiais. No Brasil, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela Lei 12.305/10 de 23 de dezembro de 2010, posteriormente regulamentada pelo Decreto Federal nº 7404. Essa legislação abrange todas as estratégias de gerenciamento de resíduos, visando "proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas", conforme estabelecido no artigo 23, VI, da Constituição Federal. A PNRS é notável por ser a primeira legislação brasileira sobre resíduos sólidos que aborda o tema de maneira abrangente, tratando não apenas de um aspecto específico (GALVÃO JUNIOR et al., 2014).

A Lei 12.305/10 da PNRS determina que resíduo sólido é:

“XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;” (BRASIL, 2017)

No artigo 9, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 define a ordem de prioridade para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos da seguinte maneira: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Quanto à definição de Resíduo Sólido, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece na NBR 10.004/04 - Resíduos Sólidos - Classificação, que resíduo sólido é:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (ABNT, 2004)

A NBR 10.004/04 também descreve o processo de classificação dos resíduos, o qual envolve a identificação da operação de origem e seus componentes, comparando esses componentes com as tabelas de resíduos e substâncias conhecidas. Dessa forma, os resíduos são classificados como:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos;
- b) Resíduos Classe II – Não perigosos;
 - Resíduos Classe II A – Não Inertes;
 - Resíduos Classe II B – Inertes.

Os resíduos sólidos urbanos Classe II A (RSU, Classe II A) constituem a maior parte dos resíduos gerados no Brasil. O conceito de resíduos sólidos urbanos (RSU) é derivado da relação entre a Lei nº 11.445/2007 – Lei Nacional de Saneamento Básico e a Lei PNRS. Essa classificação define os RSU como resíduos gerados em ambientes domiciliares, comerciais, de varrição, feiras livres, capina e poda. Eles são compostos por materiais putrescíveis (que apodrecem rapidamente), papéis/papelões, plásticos, madeiras, metais, vidros, entre outros (entulhos, borrachas, tecidos, óleos etc.). O tipo de resíduo varia de acordo com fatores como hábitos da população, atividades econômicas, clima, nível de escolaridade, nível de renda, entre outros (ZUQUETTE, 2015).

2.2. ATERROS

A destinação final dos RSU também é fixada pela lei da PNRS no artigo nº 3:

“VII – destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;” (BRASIL, 2017).

A Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) não permite o mero abandono de resíduos, impondo ao proprietário a obrigação de realizar a destinação final ambientalmente adequada, incluindo tratamento e reaproveitamento. O proprietário pode cumprir essa obrigação diretamente ou destiná-la a terceiros que compartilhem do mesmo objetivo

ambiental. É crucial estabelecer uma clara separação entre a propriedade e a responsabilidade ambiental sobre os resíduos sólidos, indicando que não necessariamente o proprietário do resíduo é o responsável ambiental por ele. Essa distinção é essencial para evitar que proprietários mais afluentes transfiram sua responsabilidade, junto com seus resíduos, para terceiros com recursos econômicos inferiores. Dessa forma, o gerador dos resíduos, mesmo que não seja o proprietário, permanece ambientalmente responsável por eles, conforme destacado por Galvão Junior et al. (2014).

A Lei da PNRS, no artigo 16, parágrafo 3º, ratifica essa abordagem:

“§ 3º Respeitada a responsabilidade dos geradores nos termos desta lei, as microrregiões instituídas conforme previsto no § 1º abrangem atividades de coleta seletiva, recuperação e reciclagem, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos, a gestão de resíduos de construção civil, de serviços de transporte, de serviços de saúde, agrossilvopastoris ou outros resíduos, de acordo com as peculiaridades microrregionais. (BRASIL, 2017)”

A responsabilidade do proprietário do resíduo sólido domiciliar encerra-se na disponibilização adequada para a coleta, conforme o artigo 28. Em outras palavras, assim que o usuário apresenta seus resíduos no local e horário apropriados para a coleta, sua responsabilidade é finalizada (GALVÃO JUNIOR et al., 2014).

A disposição desses resíduos deve ser realizada de maneira apropriada, indicando que o descarte deve ser feito em aterros sanitários. De acordo com a NBR 8419/1992, aterro sanitário de RSU é:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.” (ABNT, 1992)

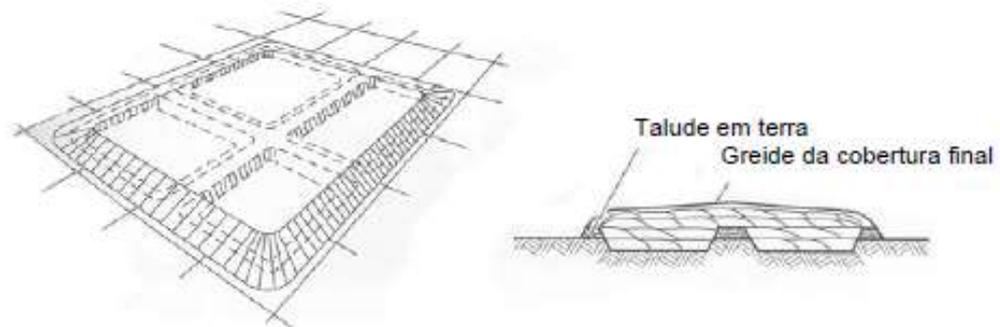
A legislação brasileira tornou-se mais rigorosa em relação à disposição dos resíduos, proibindo a utilização de lixões a céu aberto, exigindo, em vez disso, o uso de aterros sanitários ou aterros controlados. De acordo com Diaz et al., 2005 (apud GALVÃO JUNIOR et al., 2014), os aterros sanitários apresentam diversas vantagens em comparação com os lixões, tais como: localização em áreas apropriadas, controle e coleta de chorume e biogás, monitoramento geotécnico, cobertura diária do solo, inspeção, fechamento da instalação e treinamento de pessoal.

A NBR 13.986/1997 recomenda a construção de aterros com uma vida útil mínima de 10 anos, tanto durante as operações quanto após o encerramento das atividades. No entanto, tem sido comum projetar aterros com uma vida útil mínima de 20 anos, devido à dificuldade em encontrar novas áreas disponíveis. Cada aterro sanitário deve ser submetido a controles administrativos, técnicos e operacionais para garantir a proteção do meio ambiente, dos trabalhadores e das populações vizinhas (MELO, 2020).

O aterro sanitário é composto por unidades operacionais e de apoio. As unidades operacionais incluem a célula de resíduo sólido urbano, impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional), sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume), sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás, sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais, sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico, além do pátio de estocagem de materiais. Já as unidades de apoio compreendem cerca e barreira vegetal, estradas de acesso e de serviço, balança rodoviária e sistema de controle de resíduos, além da guarita de entrada e do prédio administrativo (IBAM, 2001).

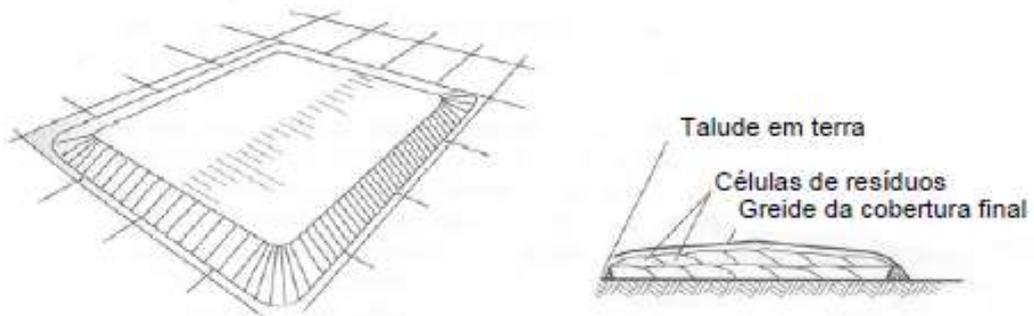
Existem essencialmente três métodos construtivos de aterros sanitários: trincheira, área e rampa. O aterro de trincheira envolve a escavação do solo, com os resíduos depositados abaixo do nível do terreno, sendo indicado para pequenos e médios municípios. Esse método possui menor impacto visual, mas não é recomendado em locais com lençol freático raso (inferior a dois metros). O aterro de área, conhecido como "bolo de noiva", coloca o maciço de resíduos acima do nível do terreno, proporcionando maior estabilidade nos taludes menores e permitindo a manutenção dos drenos pluviais. No entanto, requer cuidado na compactação e monitoramento da estabilidade do maciço. O aterro de rampa é apropriado para locais acidentados, sendo construído apoiado em taludes naturais. Aterros de grande porte geralmente combinam métodos para se adaptarem à topografia local (REICHERT, 2007; ReCESA, 2008; MELO, 2020). As Figuras 1, 2 e 3 representam os três métodos construtivos.

Figura 1 - Método de trincheira.



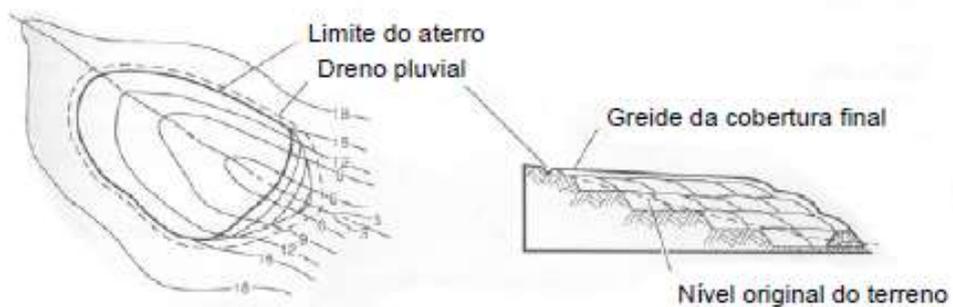
Fonte: Tchobanoglous et al., 1993 apud Reichert, 2007.

Figura 2 - Método de área.



Fonte: Tchobanoglous et al., 1993 apud Reichert, 2007.

Figura 3 - Método de rampa.



Fonte: Tchobanoglous et al., 1993 apud Reichert, 2007.

A instalação de novos aterros requer cuidados específicos, sendo uma grande dificuldade para os municípios, uma vez que essas áreas precisam atender a uma ampla gama de condições técnicas, econômicas e ambientais que muitas vezes são indisponíveis (ReCESA, 2008). Essas considerações estão detalhadas na Tabela 1 e 2:

Tabela 1 - Considerações técnicas para a escolha da área da nova instalação – Parte 1.

Crítérios	NBR 13.896/1.997	Resolução CEMAm n.º 5/2014	Manual de Aterros (REICHERT, 2007)
Declividade do terreno (%)	1% < i < 30% i > 30% anuência do OCA.	1% < i < 20%	-
Vida útil	10 anos	15 anos	De 20 a 25 anos
Zoneamento Ambiental	Áreas sem restrições no zoneamento ambiental.	Anuência do órgão gestor da unidade (Conama 428/2010): > 3 km de atividades de impacto ambiental significativo. > 2 km de atividade que não são exigidos o EIA/Rima, cuja UC não tiver definida sua zona de amortecimento no período de 5 anos.	-
Zoneamento Urbano	Áreas de uso conforme legislação local de uso do solo. Áreas devolutas ou pouco utilizadas.	Áreas de uso conforme legislação local de uso do solo, fora de Reserva Legal e em local que preferencialmente não precise ser desmatado.	Uso Rural e industrial, e fora de qualquer Unidade de Conservação.
Vegetação	Do tipo favorável à redução de erosão, formação de poeiras e transporte de odores. Faixa 10 m <i>non aedificandi</i> .	Cinturão verde no perímetro da área. Faixa de proteção sanitária > 20 m, em todo o perímetro da área. Podendo ser utilizada como cinturão verde.	-
Núcleo Populacional	Superior a 500 m. A distância pode ser alterada a critério do OCA.	> 3.000 m do perímetro urbano. 500 m < d < 3.000 m na presença de barreiras físicas, incluindo floresta plantada, de 200 m de largura em toda extensão da área. > 500 m de domicílios Rurais.	> 1.000 m de núcleos residenciais urbanos que abriguem > 200 hab.

Fonte: Adaptado ReCESA, 2008; Melo, 2020.

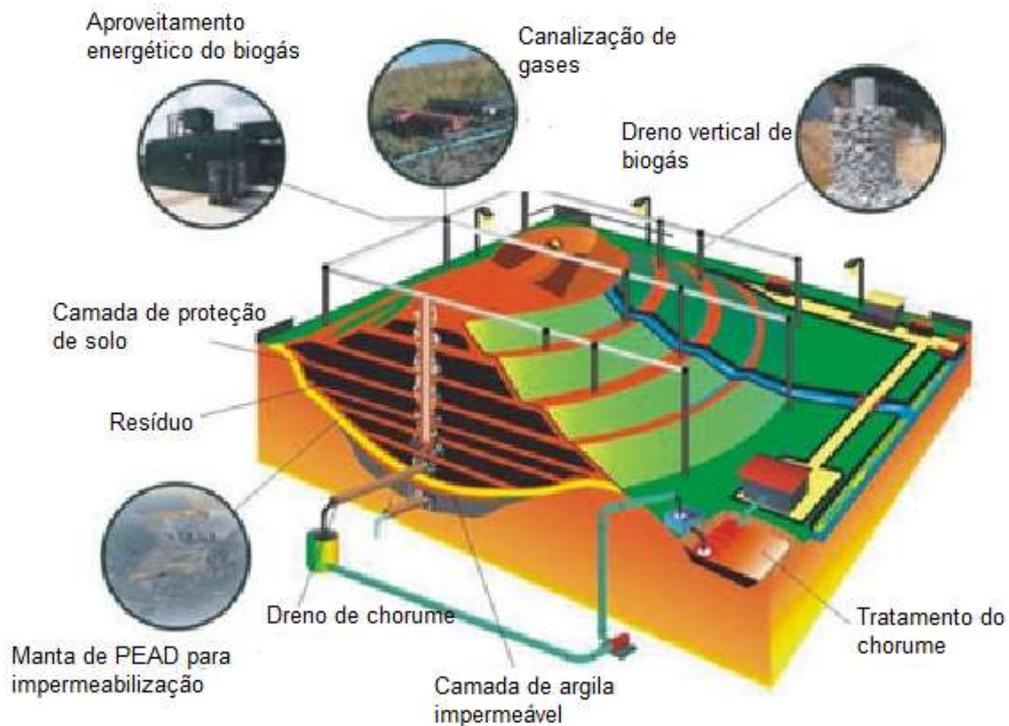
Tabela 2 - Considerações técnicas para a escolha da área da nova instalação – Parte 2.

Crítérios	NBR 13.896/1.997	Resolução CEMAm n.º 5/2014	Manual de Aterros (REICHERT, 2007)
Distância aos cursos d'água (córregos, nascentes etc.)	> 200 m de qualquer corpo hídrico, com possibilidade de alteração pelo OCA.	> 300 m de qualquer corpo hídrico. > 2.500 m do ponto de captação e > 500 m do corpo hídrico de fontes de abastecimento.	> 200 m de rios, lagos, lagoas e oceanos. > 50 m dos demais
Distância do Lençol Freático	> 1,50 m (entre base do aterro e nível máximo do lençol) de solo insaturado.	> 5,0 m de solo insaturado (entre base do aterro e nível máximo do lençol) $5 < d < 1,5$ m podem ser admitidas desde que respeitado o limite máximo de excedente hídrico (mm/ano)	> 2 m (com manta plástica) ou > 3 m (impermeabilização com argila).
Geologia e Tipos de Solo	Desejável a existência de depósitos naturais com coeficiente de permeabilidade $< 10^{-6}$ cm/s e uma zona não saturada > 3 m. O aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s;		Preferíveis solos argilosos e jamais arenosos, com jazidas de material de cobertura nas proximidades.
Caracterização Climatológica	Não deve ser implantado em área sujeita a inundação, em período de recorrência de 100 anos.	Série histórica disponível correspondente ao maior período de observação da precipitação e evapotranspiração, cujo período de dados deverá ser no mínimo igual à somatória da vida útil de projeto e monitoramento pós encerramento.	-
Área de Segurança Aeroportuária	-	20 km sujeito à anuência do Órgão Gestor, conforme Lei 12.725, de 16/out/2012.	Não próximo a aeroportos e aeródromos.

Fonte: Adaptado ReCESA, 2008; Melo, 2020.

Outros pontos que devem ser ponderados incluem a capacidade de suporte do solo, a disponibilidade de material para recobrimento e a qualidade do material de encobrimento (MELO, 2020). A Figura 4 apresenta o arranjo básico de um aterro sanitário Classe II e seus componentes.

Figura 4 - Arranjo básico de um aterro de resíduos sólidos.



Fonte: Tchobanoglous et al., 1993 apud Reichert, 2007.

Com o tempo, a deterioração dos resíduos gera gases (biogás) e líquidos (chorume), para os quais é necessário um manejo e controle adequados. A drenagem do chorume possui uma grande importância, pois assegura a estabilidade do maciço. Por outro lado, a drenagem dos gases é crucial, contribuindo para a redução do impacto das emissões na atmosfera. Isso ocorre através da conversão do metano (CH_4) para dióxido de carbono (CO_2), seja por combustão espontânea no final do dreno vertical ou por meio de queima controlada. Além disso, a drenagem dos gases evita a queima descontrolada do biogás, reduzindo assim o risco de incêndio e explosão com emissões não controladas (GUYER, 2009; MELO, 2020).

2.3. COMPORTAMENTO DO BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO

As características físico-químicas dos resíduos sólidos urbanos variam consideravelmente de cidade para cidade e são diretamente influenciadas pelas condições socioeconômicas e culturais de cada região. Entretanto, após a disposição e, em grande parte, de forma

independente de sua composição, os microrganismos presentes nos resíduos começam a se multiplicar no ambiente do aterro, transformando-o em um verdadeiro reator bioquímico. Isso estabelece um ecossistema no sentido ecológico da palavra (BIDONE, 1999). Esse reator químico recebe como principais entradas os resíduos sólidos, as chuvas, os líquidos lixiviados e o biogás (FERNANDES, 2009; SILVA E MOTA, 2019).

Esse ecossistema é sistematicamente formado nos depósitos, onde as chuvas e o oxigênio presentes na superfície desencadeiam uma série de reações na massa depositada, resultando na formação de gases (biogás). Também é gerado um líquido escuro e altamente ativo (chorume), que percola verticalmente em direção às áreas inferiores, onde é coletado e encaminhado para tratamento.

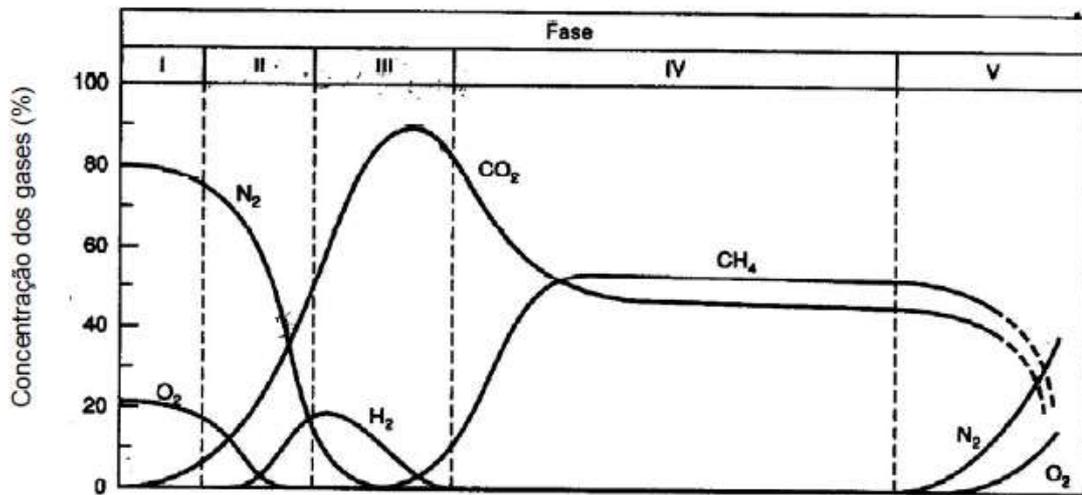
Após alguns dias da realização da cobertura na camada de resíduo, surge um ambiente onde o oxigênio desaparece, criando condições propícias para a geração de biogás, ou seja, um meio anaeróbico. O biogás de aterro é uma mistura de vários gases gerados pela volatilização de compostos químicos e pela biodegradação exotérmica da matéria orgânica causada por bactérias, fungos e protozoários na ausência de oxigênio. A composição do biogás varia ao longo da vida útil do aterro, com alguns gases predominantes e outros em concentrações menores. Alguns desses gases, mesmo em baixas concentrações, podem ser tóxicos e representar riscos para a saúde humana (REICHERT, 2007). A Tabela 3 exemplifica os gases típicos encontrados nos aterros e suas possíveis concentrações, enquanto a Figura 5 descreve a variação dessas concentrações ao longo do tempo.

Tabela 3 - Componentes característico de biogás de aterro sanitário.

Componente	Porcentagem (%) (base volume seco)
Metano (CH ₄)	45 - 60
Dióxido de carbono (CO ₂)	40 - 60
Nitrogênio (N ₂)	2 - 5
Oxigênio (O ₂)	0,1 - 1,0
Gases de enxofre	0 - 1,0
Amônia (NH ₃)	0,1 - 1,0
Hidrogênio (H ₂)	0 - 0,2
Monóxido de carbono (CO)	0 - 0,2
Constituintes traços	0,01 - 0,6

Fonte: TCHOBANOGLIOUS ET AL., 1993 apud REICHERT, 2007.

Figura 5 - Concentração dos principais gases em função das fases de degradação dos resíduos sólidos.



Fases	Intervalo de duração das fases
I	Algumas horas à 1 semana
II	1 mês à 6 meses
III	3 meses à 3 anos
IV	8 anos à 40 anos
V	1 ano à mais de 40 anos

Fonte: AUGENSTEIN E PACEY, 1991 apud MACIEL, 2003.

O volume e a intensidade de geração de biogás dependem de vários fatores, incluindo a composição dos resíduos, umidade, densidade, tamanho das partículas, idade do resíduo, pH, temperatura, entre outros (REICHERT, 2007; CARVALHO et al, 2010). Teoricamente, a decomposição dos resíduos e a produção de gás podem ocorrer por mais de 40 anos, mas na prática, observa-se um pico seguido por uma curva de decaimento, aspectos que devem ser considerados no projeto de aproveitamento do biogás (ICLEI, 2010).

O metano (CH₄) é o principal componente do biogás, um hidrocarboneto alifático composto por um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio, cuja molécula é simétrica e apolar, tornando-o insolúvel em água. O gás metano é incolor, inodoro, insípido, altamente inflamável e não tóxico (REICHERT, 2007). Devido à alta concentração de metano no biogás, existe o risco de explosões e incêndios no aterro e em instalações próximas (SILVA E MOTA, 2019). Estima-se que uma tonelada de RSU produza aproximadamente 88 a 138 m³ de metano, totalizando cerca de 40 a 60 milhões de toneladas de gás metano geradas anualmente por aterros sanitários (HUMER E LECHNER, 1999 apud SILVA E MOTA, 2019).

A emissão descontrolada de biogás em aterros sanitários é um problema sério, poluindo a atmosfera local e globalmente. As consequências locais variam desde odores desagradáveis até a possibilidade de doenças cancerígenas. Em termos de poluição global, a liberação descontrolada de biogás contribui para o aquecimento global, gerando discussões consideráveis (HUMER E LECHNER, 1999; SILVA E MOTA, 2019). Desde os anos 70, as concentrações de metano na atmosfera aumentaram cerca de 1% ao ano, e as emissões de metano provenientes de aterros sanitários são a terceira principal fonte antropogênica em todo o mundo (HUMER E LECHNER, 1999). As Tabelas 4 apresenta parâmetros geotécnicos que podem contribuir para a emissão de biogás na atmosfera.

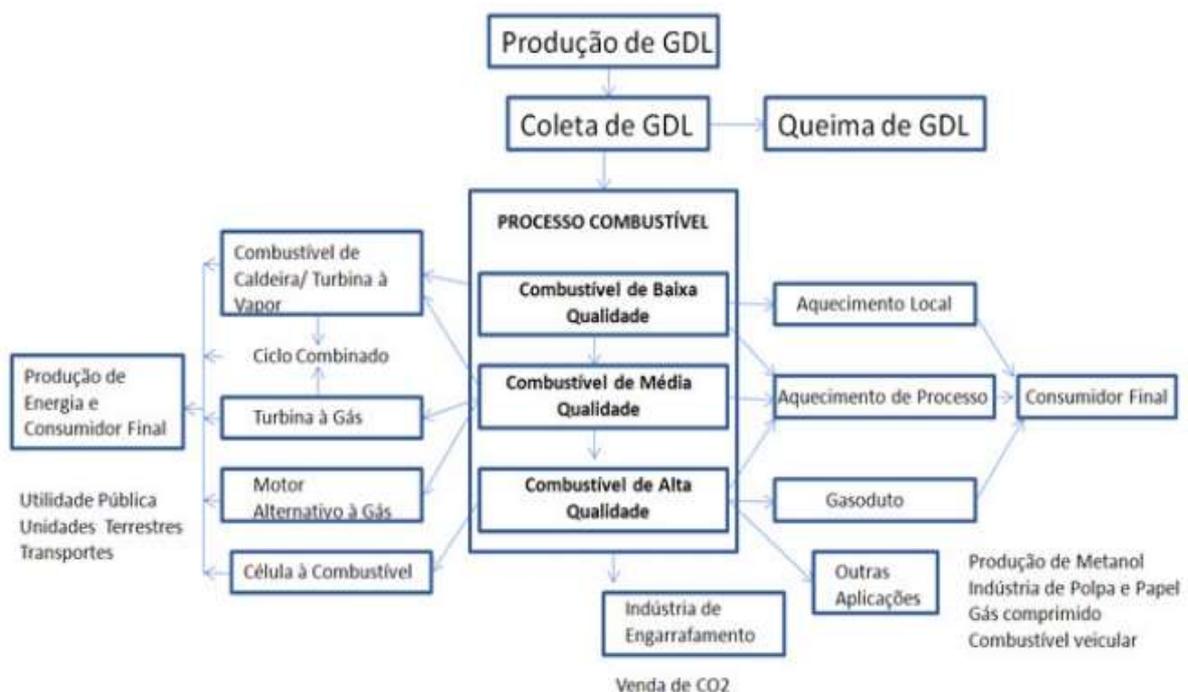
Tabela 4 - Principais parâmetros geotécnicos que afetam a emissão de biogás.

Parâmetros Geotécnicos	Possíveis efeitos nas emissões de gases para atmosfera
Tipo de solo	Solo de granulometria fina (argilas) são preferidos para controle das emissões (menor permeabilidade e maior retenção de umidade).
Espessura	Quanto maior espessura da camada, maior a possibilidade de retenção física, química e biológica dos gases.
Umidade/Saturação	A presença de água nos vazios do solo reduz o fluxo dos gases. Redução drástica para valores acima de 75% de saturação.
Conteúdo volumétrico de ar	Quanto maior a presença de poros aerados na matriz, mais rápida é a velocidade dos gases no meio, consequentemente maiores as emissões.
Densidade/Compactação	O aumento da densidade dificulta a passagem dos gases (menor porosidade e permeabilidade) minimizando as emissões.
Sucção	Importante relação com a retenção/absorção da umidade na camada, especialmente nas camadas evapotranspirativas.
Temperatura	A elevação da temperatura do solo favorece as emissões dos gases
Coefficiente de permeabilidade	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade de o gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional às emissões de gases.
Coefficiente de difusão	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade de o gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional ao fluxo de gás emitido.
Contração/ expansão e fissuras	Ciclos de umedecimentos/ secagem favorecem o aparecimento de fissuras em solos argilosos, aumentando os níveis de emissão.
Mineralogia	Possíveis reações físico-químicas dos minerais do solo com os gases podem retê-los na cobertura.

Fonte: MACIEL,2003 apud FERNANDES, 2009.

A produção de gás do lixo (GDL) atualmente desperta grande interesse comercial, com empresas buscando aproveitá-lo para queima controlada (com créditos de carbono), produção de energia por meio de motores de combustão/geradores e até mesmo para a produção de biogás engarrafado (metano). No entanto, para a utilização desse GDL, é necessário contar, primeiramente, com um sistema de coleta adequado. Existem duas configurações principais: poços verticais e trincheiras horizontais. Os principais componentes do sistema de coleta incluem tubos de coleta (independentemente da configuração, o sistema de coleta é conectado a uma tubulação lateral, que transportará o gás para um coletor principal), compressor (necessário para extrair ou comprimir o gás dos poços de coleta) e o *flare* (um sistema de ignição e queima do GDL). O próximo passo envolve o tratamento do GDL, pois, durante a viagem pelo sistema de coleta, o gás (quente) se resfria, formando um condensado que pode obstruir o sistema. A necessidade de tratamento depende da destinação final. Após esses processos, é crucial definir o objetivo do aproveitamento energético do GDL, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou abastecimento de gasodutos com gás de qualidade (BNDES, 2008). A Figura 6 esquematiza as possíveis utilizações do biogás.

Figura 6 - Esquema das rotas de utilização do gás do lixo (GDL).



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2014.

O Brasil apresenta um considerável potencial de biogás, estimado em cerca de 70 milhões de metros cúbicos por dia, mais que o dobro do gás natural importado. Em 2019, a maior cidade do país, São Paulo, gerava aproximadamente 20 mil toneladas de lixo por dia. Apesar de existirem cerca de 2.100 municípios com aterro sanitário para a disposição de resíduos, até o final de 2018, apenas 276 plantas de biogás estavam em operação, utilizando esgoto, lixo e resíduos agropecuários como matérias-primas. Em contraste, países como Alemanha, Reino Unido e Suíça lideram o número de plantas de biogás no mundo, totalizando mais de 10 mil estações. Suas matérias-primas incluem esgoto, resíduos orgânicos, materiais agrícolas, industriais e provenientes de aterros sanitários. Em outros países da Europa e nos Estados Unidos, existem incentivos governamentais, como tarifas feed-in, créditos de carbono e benefícios fiscais (GNPW GROUP, 2021).

2.4. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARA ATERROS RSU

A definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma parte fundamental na análise de estabilidade, porém, é uma tarefa desafiadora. Diversas fontes de incertezas influenciam as propriedades geotécnicas dos RSU, conforme apontado por Babu, Reddy e Srivastava (2014). As principais fontes de incerteza incluem a heterogeneidade do material devido à grande diversidade de constituintes, erros de medição e incerteza na escolha do modelo para relacionar grandezas medidas a parâmetros de projeto.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU dependem do peso unitário, teor de umidade e composição do resíduo, conforme destacado por vários autores, incluindo Eid et al. (2000), Bray et al. (2009), Stark, Huvaj-Sarihan e Li (2009), e Pandey, Shrivastava e Tiwari (2017). A resistência ao cisalhamento dos RSU assemelha-se à do solo, não possuindo um conjunto único de parâmetros e sendo dependente de diversos fatores, como composição, peso unitário, tensão confinante, histórico de tensão, caminho de tensão e taxa de carregamento.

A altura crescente dos aterros sanitários para aumentar a capacidade de disposição tem aumentado a necessidade de definir a resistência ao cisalhamento dos RSU. A prática de

engenharia muitas vezes adota valores da literatura baseados na experiência acumulada a partir de ensaios de campo, laboratório e retroanálises de rupturas. Isso resulta em uma grande variação de valores de projeto propostos por diferentes autores, com coesão de tensão efetiva variando entre 0 e 67 kPa e ângulo de atrito de tensão efetiva entre 10° e 53°.

Os parâmetros de tensão efetiva são aplicados em análises de estabilidade estática e sísmica, considerando a alta permeabilidade do aterro, que muitas vezes impede a geração de poropressão induzida por cisalhamento significativo antes ou durante a instabilidade do talude.

Mudanças nas propriedades físicas ao longo do tempo devido à decomposição dos resíduos impactam a resistência ao cisalhamento a longo prazo. A resistência inicial está relacionada à composição e à estrutura interna dos resíduos frescos. As tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10, apresentadas por Norberto et al. (2020), resume os parâmetros geotécnicos de aterros RSU de diversas literaturas entre os anos de 1978 e 2018, obtidos por meio de ensaios de cisalhamento, retroanálises e valores estimados.

Tabela 5 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 1.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
-	40,5	13,2	Prova de carga <i>in-situ</i>	Converse, Davis & Dixon Associates (1975 em Gabr & Valero, 1995)
13	7	38	Resíduo municipal	Gay et al. (1978)
10	0	35	Resíduos municipais estimados por observação de campo	Cassina (1979)
9	10	16	Retro análise de deformações por cargas induzidas	Spillmann (1980)
11,5	7	42	Cisalhamento direto. Resíduos com 9 meses de decomposição	Gay et al. (1981)
9,5	28	26,5	Cisalhamento direto. Resíduos municipais novos	Gay et al. (1981)
-	37		Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Cooper & Clark (1982 em Gabr & Valero,

1995)

Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 2.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
-	24	21,5	Valores recomendados de cálculo	Landva et al. (1984)
-	23	24	Cisalhamento direto. Resíduos novos	Landva et al. (1984)
-	16	38	Cisalhamento direto	Landva et al. (1984)
-	0	38	Cisalhamento direto drenado. 61,5 mm diâmetro X 25,4 mm espessura	LA Country Sanitation District (1984)
-	35	13,8	Retroanálise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCO N (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	34		Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Cooper Enginerrrs (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	17	19,9	Retroanálise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCO N (1987 em Gabr & Valero, 1995)
7	-	-	Resíduos novos não decompostos e pouco compactados	Kaumoto & Cepolina, (1987)
11,5	-	-	Resíduos após a compactação	
-	27	19,6	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Harding-Lawson & Assoc. (1987 em Gabr & Valero, 1995)
-	21	20	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Dames & More (1988 em Gabr & Valero, 1995)

Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 3.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
-	23,5	20,2	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCON (1989 em Gabr & Valero, 1995)
-	15	33	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	19	39	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	12	35,2	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
13	13,5	22	Resíduos sólidos antigos	Benvenuto & Cunha (1991)
15	10	30,5	Cisalhamento direto <i>in-situ</i>	Richardson & Reynolds (1991) em Kavazanjian et al. (1995)
10	-	-	Condição drenada	Benvenuto & Cunha (1991)
13	-	-	Condição saturada	
10	15	30	Ruptura do Aterro de Bandeirantes - SP	Bandeirantes (1991)
5	16	21	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
7	24	22	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
-	10	30	Cisalhamento direto. 1,5 m X 1,5 m - em campo	Withiam et al. (1995)
11,0 5	24	32,7	Cisalhamento direto drenado. 63,5 mm diâmetro X 23 mm espessura	Gabr & Valero (1995)
7,3	16	35	Triaxial CU (c/ medidas de w/u)	Gabr & Valero (1995)

Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

Tabela 8 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 4.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
8	-	-	Resíduos Saturados	Gabr & Valero (1995)
7	-	-	Resíduos Novos	Santos & Presa (1995)
10	-	-	Resíduos após a ocorrência de recalques	
10	0,5	27	Resíduo municipal	Blengimo et al. (1996)
-	16	28	Retro análise de Ruptura no aterro de Bandeirantes (1991). Resíduos novos	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	16	22	Retro análise de Ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos - boa drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	13,5	22	Retro análise de Ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos - má drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
7,5	0	35	RSU novos	Strauss (1998)
7,5	0	31	RSU antigos	
10,5	-	-	Sítio São João com 10 meses de alteamento	Mahler & Iturri (1998)
-	42-60	21-27	Resíduos antigos	Carvalho (1999)
-	10-30	18-30	Resíduos	Boscov e Abreu (2000)
-	40	35	Aterro municipal	Eid et al. (2000)
-	25	35	-	
-	25	31,5	Aterro municipal	Pelky et al. (2001)
-	23	46	Resíduos degradados	Kavazanjian (2001)
15	-	-	EUA	Kavaza & Njian (2001)

7	2	35	Aterro de Canabrava - BA	Oliveira (2002)
---	---	----	--------------------------	-----------------

Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

Tabela 9 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 5.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
-	39,2	29	Resíduo natural, com tensão de 20%	Vilar & Carvalho (2002)
9	-	-	Aterro Sanitário	Catapreta et al. (2005)
11,5	-	-	Portugal	Gomes et al. (2005)
-	10-30	18-30	Resíduo	Azambuja (2006)
10,8 7	-	-	Ensaio Percâmetro, Santo André –SP	Carvalho (2006)
12,1	-	-	Aterro com Resíduos Degradados	Bauer (2006)
11	-	-	Mohawk landfill, NY	Harris et al. (2006)
-	30	30	Cisalhamento a tensão >200 kPa	Stark et al. (2009)
-	47,5	28	Resíduos novos	Reddy et al. (2009)
-	38	16	Resíduos novos	
-	40	28	Cisalhamento direto - RSU decomposto	Reddy et al. (2011)
-	21	8	Cisalhamento direto - RSU recente	
5	10	28	Prova de carga de talude	Suzuki (2012)
11	13,5	22	Aterro Sanitário de São Paulo	
-	20	25	Aterro sanitário - China	Mohurd (2012)
15	15	35	-	Xu et al. (2012)
	48	34	Correlação de sondagens SPT de aterros	Remédio (2014)
		35		

Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

Tabela 10 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU de diversas literaturas – Parte 6.

γ (kN/m)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
11,3	18,24	32,27	Aterro sanitário - China	Babu et al. (2014)
15	15	35	Resíduos municipais biodegradados	Giri & Reddy (2014)
9,2	16	40,1	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo	
7,65	34,7	34,7	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo + 20 % de fibras	Fucale et al. (2015)
9,7		48,1	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo + 10 % de fibras	
10,2	14,1	33	-	Hong-Jun (2015)
11	1,3	36,8	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 0 % de fibras	GRS (2016)
11	10	33,5	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 15 % de fibras	GRS (2016)
11	25	29,1	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 30 % de fibras	GRS (2016)
13	30	15		
13	25	20	Aterro sanitário - China	Fan et al. (2016)
13	20	25		
10	5	30	Aterro sanitário - Índia	Ering & Gl (2016)
12	14	34	-	Jahanfar et al. (2018)
-	19	28	Resíduos	Kaimoto (2019)

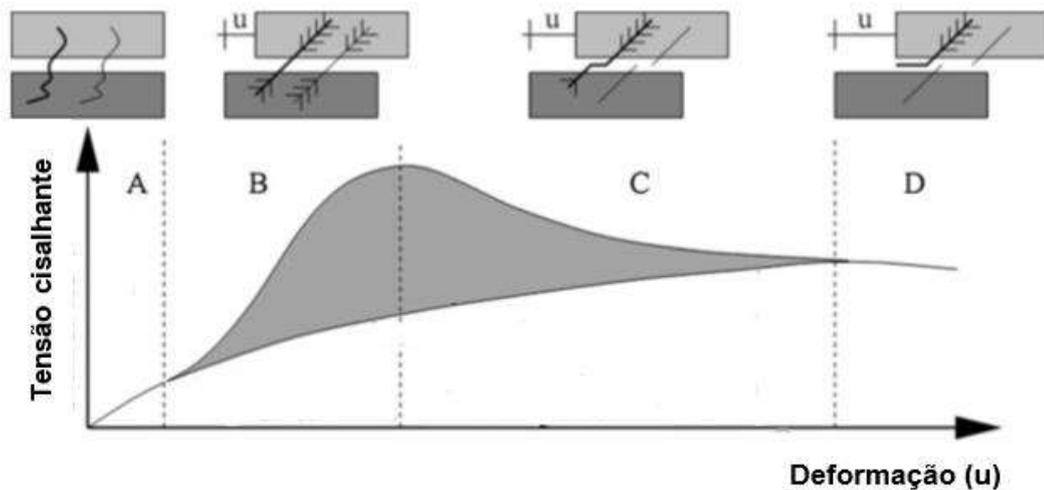
Fonte: Adaptado NORBERTO ET AL, 2020.

A vasta dispersão nos resultados dos parâmetros geotécnicos apresentada por diversos pesquisadores dificulta a acurácia de qualquer análise devido à não uniformidade gravimétrica dos resíduos, como apontado por Norberto et al. (2020).

O comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é caracterizado, segundo Machado et al. (2002 apud Gurjão, 2021), como uma função da interação entre duas frações existentes, denominadas "pasta" e "fibra". A "fibra" refere-se a elementos como plásticos moles, tecidos, papéis e papelões, ou seja, aqueles que possuem uma forma e são capazes de se envolver com outros componentes, reforçando a matriz sólida de resíduos.

Kolsch (1996 apud Gurjão, 2021) descreve a interação entre as parcelas de força de atrito e tração entre os componentes dos RSU em quatro fases, conforme representado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo proposto das 4 fases da resistência de RSU por KOLSCH, 1996.



Fonte: (KOLSCH, 1996 apud GURJÃO, 2021).

No modelo de Kolsch (1996), as mobilizações das forças de atrito ocorrem durante o processo de cisalhamento. Entretanto, essa mobilização atua de forma isolada quando submetida a pequenas deformações (ponto A) e deformações mais extensas (ponto D). No ponto B, ocorre a tração das fibras em uma fase intermediária, após a fricção inicial e acomodação dos resíduos. Com o aumento das deformações, a parcela das forças de tração aumenta até atingir um valor correspondente à interação máxima do resíduo.

No ponto C, ocorre a redução gradual da contribuição das forças de tração, até que a resistência de cisalhamento do resíduo seja sustentada apenas pela parcela das forças de atrito. Segundo esse modelo, a mobilização da parcela de resistência da tração das fibras é maior quanto maior for a tensão aplicada, favorecendo a ligação entre os componentes (GURJÃO, 2021).

2.5. RESISTÊNCIA DAS INTERFACES ENTRE GEOMEMBRANA E DIFERENTES MATERIAIS

A NBR 13.896 (1997) recomenda que, quando as condições hidrogeológicas do local de implantação do aterro sanitário não atenderem todas as especificações estabelecidas por essa norma, seja implantada uma camada impermeabilizante de base, conforme:

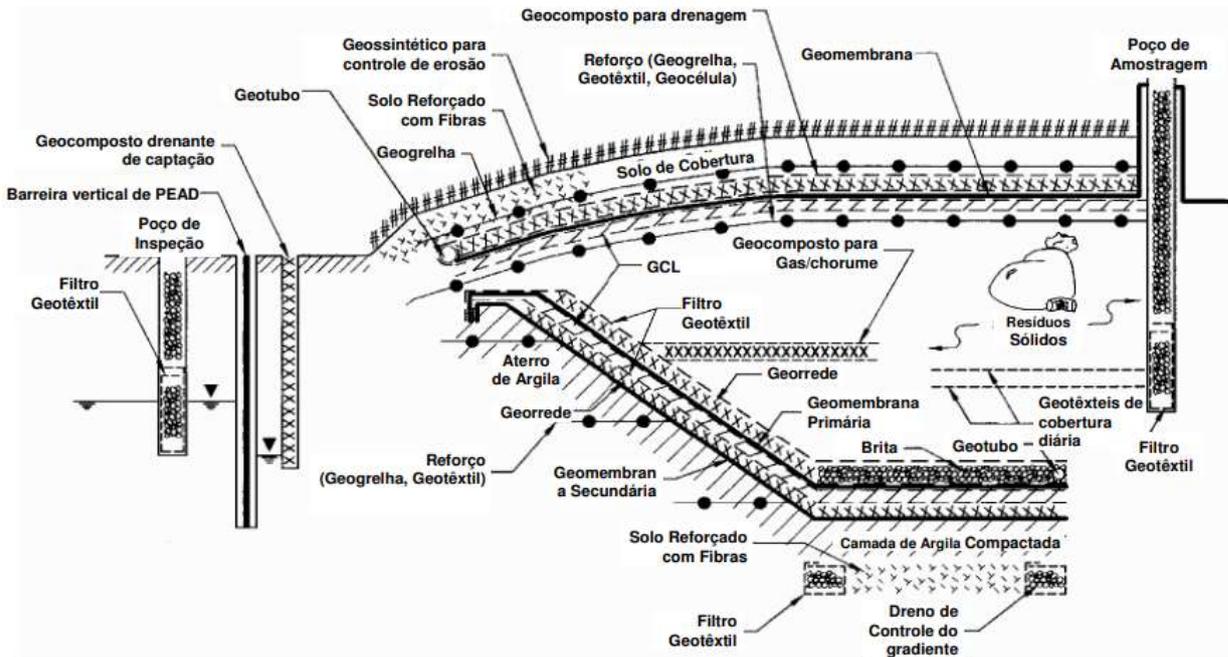
- “a) ser construída com materiais de propriedades químicas compatíveis com o resíduo, com suficiente espessura e resistência, de modo a evitar Rupturas devido a pressões hidrostáticas e hidro geológicas, contato físico com o líquido percolado ou resíduo, condições climáticas e tensões da instalação da impermeabilização ou aquelas originárias da operação diária;
- b) ser colocada sobre uma base ou fundação capaz de suportá-la, bem como resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização, de forma a evitar sua Ruptura por assentamento, compressão ou levantamento do aterro;
- c) ser instalada de forma a cobrir toda a área, de modo que o resíduo ou o líquido percolado não entre em contato com o solo natural.” (ABNT, 1997)

A norma NBR 13.896 (1997) tem como ideia principal garantir as condições de segurança do aterro sanitário e seus possíveis vetores de poluição, como lixiviados e gases, criando diferentes estruturas com a finalidade de proteger o meio ambiente. Entre os métodos de proteção, destacam-se aqueles relacionados à impermeabilização do solo subjacente ao aterro, com o intuito de preservar os recursos hídricos subterrâneos e superficiais (OLIVEIRA, PRIM E CASTILHOS JUNIOR, 2002). O projeto de impermeabilização para contenção de resíduos é dependente do tipo de resíduo, das condições climáticas e das condições geológicas do local. Portanto, podem ser empregadas barreiras de vários tipos, sendo as principais: argila natural, materiais sintéticos (geossintéticos) ou solo argiloso compactado (PIEIDADE JÚNIOR, 2003 apud LEME, 2013).

Os geossintéticos são materiais industrializados que contêm pelo menos um componente fabricado com polímero sintético ou natural. Eles podem ser mantas, tiras ou estruturas tridimensionais e são utilizados em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia civil, geotécnica e ambiental. Esses materiais desempenham funções como separação, filtração, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases e controle de processos erosivos. Os geossintéticos mais comuns incluem geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (GCLs), geotubos, geocélulas e geoexpandido (IGS BRASIL, 2012).

No contexto de aterros sanitários, os geossintéticos têm diversas aplicações, como reforçar taludes abaixo dos resíduos, compor colchões drenantes, atuar como barreiras para líquidos, gases e/ou vapores, fornecer proteção contra danos à geomembrana, facilitar a coleta e drenagem rápida do chorume, entre outras funções. A Figura 8 ilustra as múltiplas aplicações que um geossintético pode ter em um aterro sanitário.

Figura 8 - Múltiplas aplicações do geossintético em projetos de aterro sanitário.



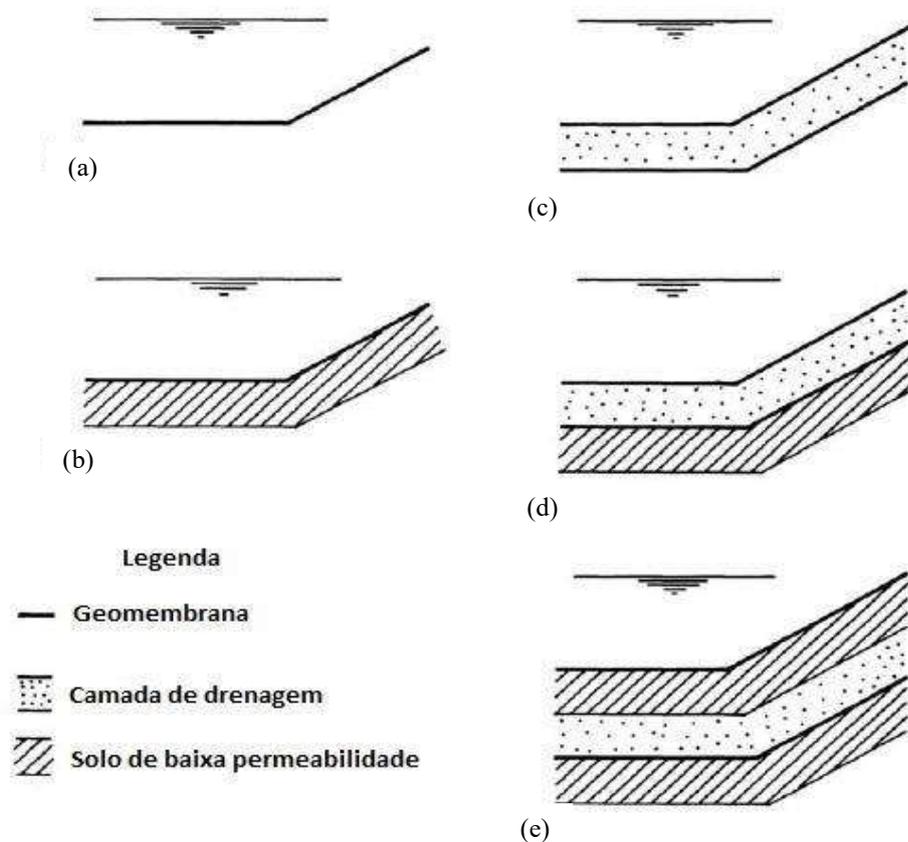
Fonte: IGS BRASIL, 2012.

Depois de ser descoberto que as temperaturas elevadas em aterros sanitários, causadas pela decomposição biológica de resíduos, podem impactar significativamente a vida útil dos componentes geossintéticos, o monitoramento das temperaturas nos aterros ganhou nova relevância. Vários pesquisadores encontraram dados que indicam que a temperatura do revestimento do aterro pode atingir cerca de 30 a 45°C sob operações normais. Com a recirculação do lixiviado, a temperatura tende a aumentar de maneira acelerada, e podem ocorrer temperaturas mais elevadas na base dos aterros que possuem uma quantidade significativa de chorume (BOUAZZA, NAHLAWI E AYLWARD, 2011; ABUEL-NAGA E BOUAZZA, 2013).

Em muitas aplicações, como contenções de resíduos, a geomembrana será aplicada a uma superfície inclinada. Isso cria uma componente de força gravitacional atuando no plano

inclinado da geomembrana, possibilitando o deslizamento pela superfície inclinada. Portanto, é importante analisar as propriedades de ligação da interface entre a geomembrana e a superfície inclinada. Como a geomembrana pode ser sustentada por uma série de camadas de diferentes materiais, é necessário determinar qual é a superfície de deslizamento mais crítica (INGOLD, 2005). Para isso, é crucial conhecer as resistências que podem se desenvolver entre a geomembrana e outros materiais, como geossintéticos, entre diferentes geossintéticos e entre esses e o resíduo (VERMATTI, 2015). A Figura 9 exemplifica tipos de sistemas de revestimento de geomembrana, desde um sistema mais simples (a) até um sistema com uma ou várias camadas de material abaixo da geomembrana, chamadas de subcamadas. Da mesma forma, a superfície superior da geomembrana pode ser coberta com uma camada protetora ou uma camada composta, incluindo uma segunda geomembrana, chamadas de sobrecamadas.

Figura 9 - Cinco tipos de sistema de revestimento: (a) Revestimento simples: Revestimento de geomembrana; (b) Revestimento único: Revestimento Composto; (c) Revestimento Duplo: Revestimento de geomembrana dupla; (d) Revestimento duplo: Revestimento da geomembrana superior e Revestimento composto inferior; (e) Revestimento duplo: Revestimento composto duplo.

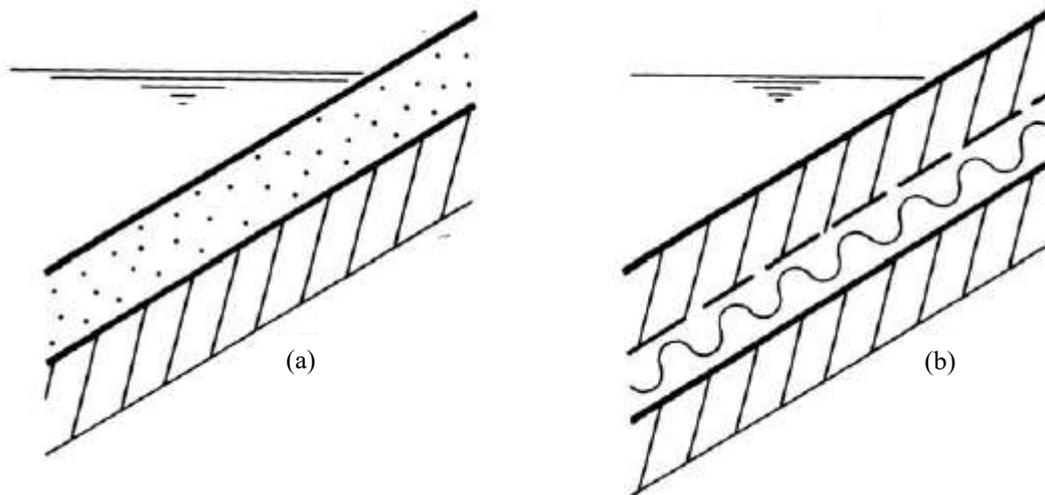


Fonte: INGOLD, 1991.

A Figura 10(a) representa um sistema com revestimento superior, que é uma geomembrana, seguido por uma camada de material granular e, em seguida, o revestimento inferior,

composto por solo de baixa permeabilidade com geomembrana. Já a Figura 10(b) mostra ambos os revestimentos compostos por solo de baixa permeabilidade com geomembrana. A camada posterior é uma geomalha separada do solo de baixa permeabilidade subjacente por um geotêxtil, que atua como um separador e um filtro (INGOLD, 1991).

Figura 10 - Exemplos de Sistema Linear Duplo usando duas geomembranas.



Fonte: INGOLD, 1991.

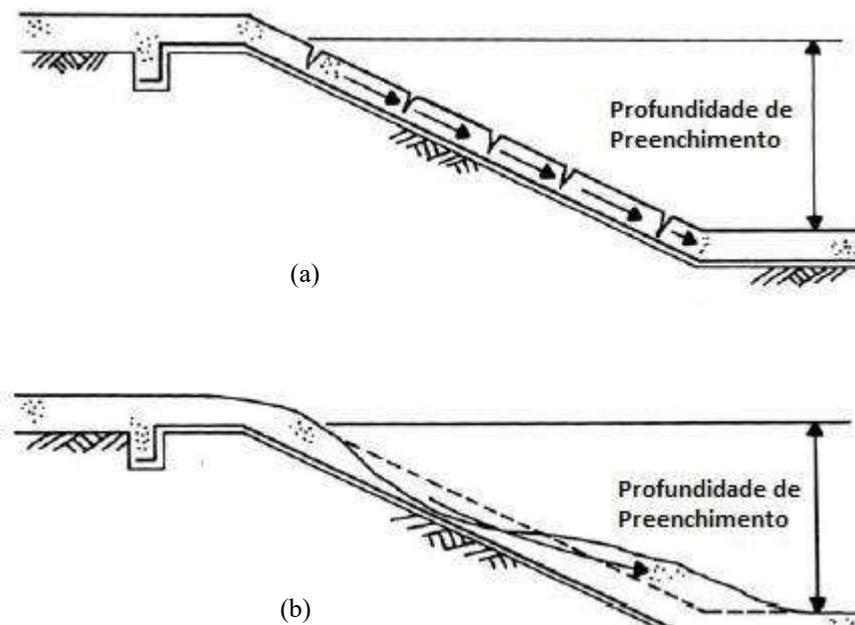
A observação atenta às interfaces entre a geomembrana e outros materiais é essencial devido à possibilidade de formação de superfícies deslizantes em uma ampla gama de combinações, como Geomembrana - Solo de formação; Geomembrana - Revestimento de Argila; Geomembrana - Geotêxtil; Geomembrana - Geomalha; Geomembrana - Dreno de enchimento granular; Geomembrana - Solo coberto; Geomembrana - Revestimento. Cada uma dessas relações pode resultar em diferentes ângulos de fricção ou resistências de ligação para uma determinada geomembrana. Esses ângulos de fricção devem ser considerados na definição dos métodos de teste, pois em um sistema composto por várias camadas, a estabilidade pode ser orientada pela interface mais fraca com o menor ângulo de atrito (INGOLD, 1991).

Interfaces solo-geomembrana podem ser potenciais planos de fraqueza, podendo se tornar uma fonte de falha por cisalhamento se o atrito inadequado for desenvolvido na interface. Durante a vida útil do geossintético, essas interfaces podem sofrer deformações de cisalhamento de curto ou longo prazo, devido às tensões constantes ou crescentes, podendo

levar à falha das interfaces e impactar negativamente na estabilidade do projeto (CHAO E FOWMES, 2021).

As Figuras 11 e 12 apresentam exemplos de falhas relacionadas aos efeitos do atrito solo-geomembrana. A Figura 11(a) mostra o desenvolvimento de trincas de tração no solo de cobertura, que podem ser causadas por um fator de segurança muito baixo no atrito da geomembrana com o solo ou pelo "*creep extension*" na geomembrana, induzido pela tensão de cisalhamento transmitida do solo de cobertura. A Figura 11(b) ilustra a queda do solo de cobertura, especialmente intensa quando há baixo atrito entre a geomembrana e o solo (INGOLD, 1991).

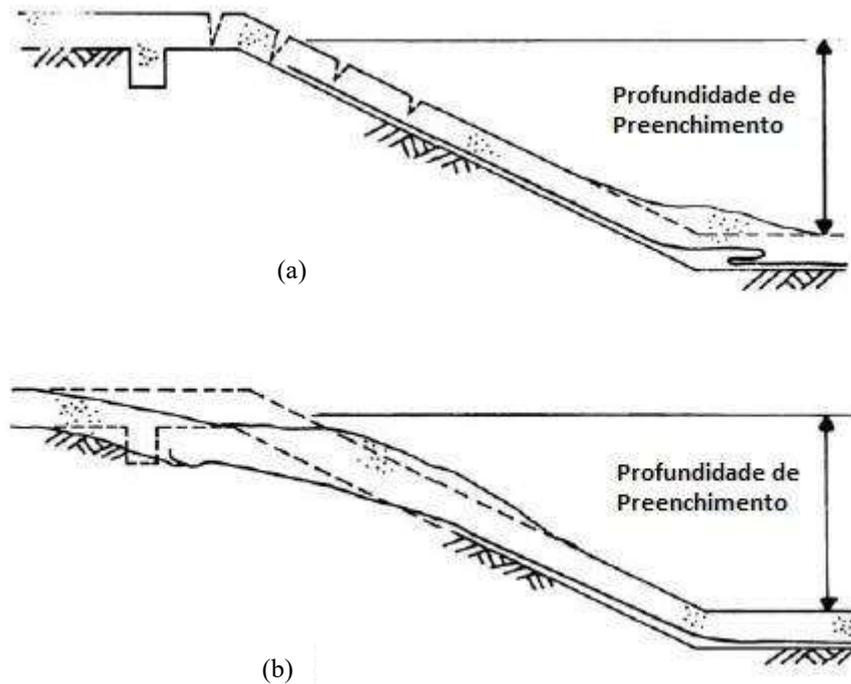
Figura 11 - Falhas de solo de cobertura (a) falha por tração (b) falha por escorregamento.



Fonte: INGOLD, 1991.

A Figura 12 apresenta tipos de falha na trincheira de ancoragem. No item (a), é o modo "*pull out*", que pode ser controlado, em parte, pelo atrito que pode vir a ser desenvolvido entre o solo e a geomembrana (INGOLD, 1991).

Figura 12 - Falhas de trincheiras de ancoragem (a) retirada de linhas (b) ruptura localizada.



Fonte: INGOLD, 1991.

É importante notar que, nas interfaces das barreiras impermeáveis, compostas por diferentes geossintéticos ou apoiadas em solos de baixa resistência, podem surgir planos preferenciais de ruptura que condicionam a estabilidade do resíduo, da cobertura e da barreira como um todo. A Tabela 11 fornece exemplos de valores médios de algumas propriedades de geomembranas fabricadas no Brasil. Essas propriedades foram medidas pelo Laboratório de Geossintéticos das EESC-USP nos anos de 2000 e 2001, em amostras enviadas pelos fabricantes (VERTEMATTI, 2015).

Tabela 11 - Valores médios de algumas propriedades de geomembranas fabricadas no Brasil.

Produto	Resistência à tração		Punção (b) (N)	Resistência a rasgos (c) (N)	
	CP em forma de haltere (a) (MPa)			Longit	Transv
	Longit.	Transv.			
PEAD 0,8mm	19	18	389	126	129
PEAD 2,5mm	18	20	911	338	344
PVC 1,0mm	18	16	266	52	49
PVC 2,0 mm	17	15	504	92	95

Fonte: VERTEMATTI, 2015. (a) ASTM D638; (b) ASTM D4833; (c) ASTM D1004.

Quando a geomembrana está em contato com o solo, espera-se que diversos fatores contribuam para afetar a resistência da interface. Por exemplo, o umedecimento da interface de geomembrana apoiada sobre argila pode reduzir consideravelmente a resistência que haveria caso essa umidade não estivesse presente. Além disso, as condições de cisalhamento do solo, seja drenado ou não drenado, desempenham um papel muito importante na resistência disponível (VERTEMATTI, 2015).

A Tabela 12 apresenta faixas de variações de ângulos de atrito de interface entre solos e geomembranas, entre solos e outros geossintéticos e entre diferentes geossintéticos. Fica evidente a grande magnitude de variações, o que pode ser creditado a diversos fatores, como diferentes tipos de ensaios utilizados, a maneira de interpretação dos resultados, a consideração da resistência de pico e residual, a grande variabilidade das composições e dos processos de fabricação dos diferentes geossintéticos. Existem muitas interferências possíveis, incluindo as condições de drenagem dos solos em contato com os geossintéticos, a faixa de tensão considerada, a possibilidade de umedecimento das interfaces e o fato de que a resistência de pico é mobilizada para pequenos deslocamentos, com significativas reduções à medida que aumentam os deslocamentos, até atingir a resistência residual. Assim, os valores citados na Tabela 13 são meramente ilustrativos.

Além da possibilidade de ruptura pelas interfaces formadas em uma barreira impermeável, é necessário avaliar a possibilidade de ruptura pelo solo de apoio e pela massa de resíduos (VERTEMATTI, 2015).

Tabela 12 - Faixas de variação de ângulos de atrito de interface (em graus) entre solos, geossintéticos e geomembranas.

Material	Areias	Argilas	PVC	PEAD lisa	PEAD texturizada	Georrede
Geomembrana PVC	20-30	6-15	-	-	-	-
Geomembrana lisa PEAD	17-25	5-10	-	-	-	-
Geomembrana texturizada PEAD	30-40	9-15	-	-	-	-
Geotêxtil tecido	23-42	16-26	10-28	7-11	9-17	9-18
Geotêxtil não tecido agulhado	25-44	15-28	16-26	8-12	15-33	10-27
Georrede	-	-	11-24	5-19	7-25	-

Fonte: Simplificada de SHARMA E LEWIS, 1994 apud VERTEMATTI, 2015.

Conforme mencionado, os ângulos de atrito de interface encontrados na literatura têm uma considerável variação, sendo geralmente medidos em ensaios de laboratório. A Tabela 13 apresenta um compilado adicional de parâmetros de resistência obtidos em laboratório, provenientes da literatura e anteriormente utilizados no monitoramento da unidade.

Tabela 13 - Ângulo de atrito para interface geomembrana/geotêxtil não tecido.

Materiais	Φ (°)	Referências Bibliográficas
Geomembrana PEAD Lisa/ Geotêxtil não tecido	13-21	Sánchez (2018) *pós-pico
Geomembrana PEAD Rugosa/ Geotêxtil não tecido	7-9	Sánchez (2018) *pós-pico
Geomembrana PEAD Lisa/ Geotêxtil não tecido	15	BSE (2023)
Geomembrana PEAD Rugosa/ Geotêxtil não tecido	23	Rebelo (2003)

Fonte: Autora, 2023.

2.6. ANÁLISE DA ESTABILIDADE GERAL

O aterro sanitário é um sistema multifásico (gasoso, líquido e sólido), sendo cada uma expondo variações espaciais e temporais. Cada fase tem sua contribuição para a resistência ao cisalhamento do aterro, portanto, é um fator muito importante a ser considerado ao avaliar a estabilidade dos aterros RSU (REDDY et al., 2009, apud ZHAO et al., 2014). Devido à existência de rigorosas normas e ao desafio na localização de novos aterros, surge a necessidade de construir aterros mais extensos, com alturas maiores e declives ainda mais acentuados, visando torná-los economicamente viáveis (BABU, REDDY, SRIVASTAVA, 2014; ZHAO et al., 2014).

Segundo ZHAN, CHEN E LING (2008), a maioria dos aterros existentes na China não possui instalações eficazes para interceptar as águas pluviais e drenar os lixiviados, propiciando o reconhecimento em campo de que o monte de lixiviado dos aterros é muito alto, saindo na

superfície da encosta em estações chuvosas. Através desse reconhecimento, ZHANG, LIN E CHEN (2010) identificaram que o nível do lixiviado tem uma maior influência na estabilidade do aterro do que a poropressão, a qual é considerada ter um menor impacto. YANG ET AL (2015) afirmam que, para a análise da estabilidade de aterros, utilizam métodos tradicionais que visam encontrar a superfície de deslizamento mais perigosa e calcular o fator de segurança mínimo. Normalmente, três métodos diferentes são utilizados, sendo estes: o método dos elementos finitos, método de análise limite e método de equilíbrio limite. Esses métodos incluem o critério de Mohr-Coulomb, “*genetic algorithm*” e “*simulated annealing*”.

2.6.1. Modelos Geomecânicos

YOUSEFI ET AL. (2021) investigaram os modelos constitutivos para RSU, realizando uma avaliação crítica deles. Os modelos foram apresentados por meio de dois métodos distintos. Com o primeiro método, os pesquisadores (BABU ET AL., 2010; FENG ET AL., 2016) calcularam a deformação considerando as deformações elásticas, plásticas, de fluência e biológicas do RSU, e a sua deformação total, resultando na relação tensão x deformação. No segundo método, os pesquisadores dividiram os resíduos em duas fases gerais, fibra e pasta, e usaram modelos de solo para prever seu comportamento (KRASE ET AL., 2005; ZHANG ET AL., 2010a; MACHADO ET AL., 2017). Para o modelo de entrada nas simulações, foram utilizados os resultados do teste triaxial de MACHADO ET AL. (2017) e algoritmos escritos para cada modelo. Através dos dados observados, YOUSEF ET AL. conseguiram identificar que a principal fonte de erro para a previsão do comportamento do RSU é a variabilidade natural e a incerteza associada à composição da pasta e fibra, as quais não são consideradas em modelos comportamentais. Afirmaram que, pelo fato de o RSU ser muito diferente do solo, a utilização de modelos constitutivos do solo para resíduos apresenta um erro muito significativo. Outros fatores constatados são que os parâmetros de fluência e mudanças biológicas têm um impacto significativo no comportamento do RSU, e que este muda ao longo do tempo, pois com a idade dos resíduos as interações internas se modificam com a decomposição. A Figura 13 e a Tabela 14 comparam os modelos constitutivos considerados para RSU. Na Tabela 14, a primeira coluna explicita o modelo apresentado pelos pesquisadores identificado, já a segunda coluna representa o modelo básico utilizado para

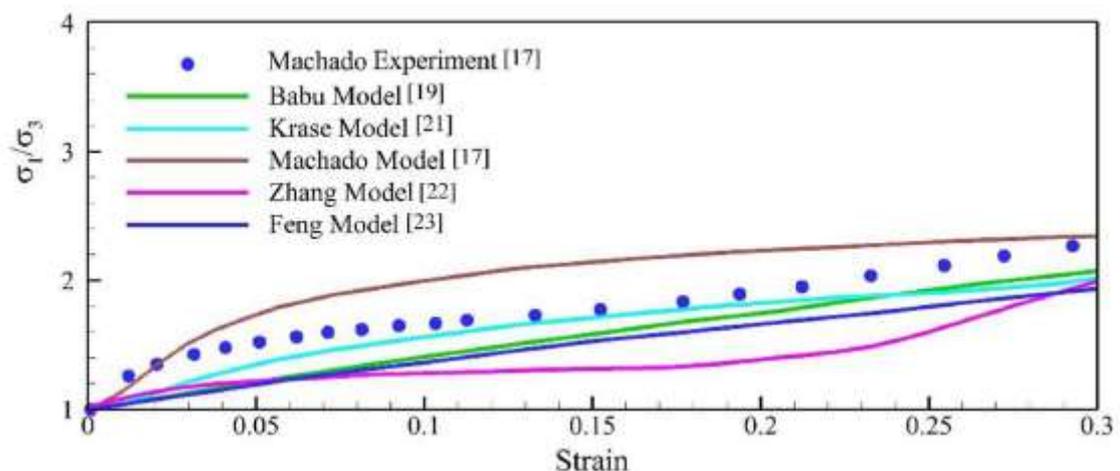
prever o comportamento dos resíduos pelos pesquisadores, e a terceira coluna compara o modelo proposto com outros resultados de pesquisas e laboratórios.

Tabela 14 - Comparação dos modelos constitutivos considerados para RSU.

Modelo	Modelo Básico	Comparado com	Erro (%)	Suposições
Zhang <i>et al.</i> (2010a)	CC*-MCC*	MCC - CC e suas soluções analíticas	75,29	Tensão Principal Solução Unidimensional
Machado <i>et al.</i> (2017)	MCC	CC e seu teste triaxial	48,65	RSU fresco MSW de 4 anos E Variável
Babu <i>et al.</i> (2010)	MCC	Deformação do aterro e seu teste triaxial	45,36	RSU fresco MSW de 1,5 anos Creep Biodegradação
Feng <i>et al.</i> (2016)	MCC + Modelo de Sivakumar (Babu et al)	Modelo de Sivakumar (Babu et al)	42,64	Biodegradação Estudo Paramétrico E Constante
Krase et al. (2005)	MCC	Deformação de um aterro específico e seu teste triaxial	32,87	Dependente do tempo Creep Biodegradação E Variável

Fonte: YOUSEFI ET AL (2021). * CC = Cam Clay; MCC = Cam Clay Modificado.

Figura 13 - Razão de σ_1/σ_3 X deformação para comparar os modelos constitutivos desenvolvidos nas mesmas condições.



Fonte: YOUSEFI ET AL (2021).

O modelo proposto por KRASE ET AL. (2005) é o que teve a menor porcentagem de erro, comparado ao *Machado Experiment*, segundo YOUSEFI ET AL. (2021). Este modelo se baseia em trabalhos anteriores de Ebers-Ernst, cuja ideia fundamental é a divisão dos RSU em duas fases sólidas, motivada pela percepção experimental de uma influência significativa de grandes partículas fibrosas, geralmente superiores a 12 cm, na resistência do material. Essas duas fases são divididas em matriz básica e matriz fibra. A matriz básica é formada, principalmente, por partículas granulares. Já a matriz de fibra é constituída por fibras e supõe-se que estas só podem suportar tensão. A teoria da elastoplasticidade é aplicada em ambas as matrizes, com o intuito de modelar a relação tensão-deformação não linear (KRASE ET AL., 2005). Existem diversas propostas de modelos constitutivos para RSU em aterros sanitários (MACHADO, CARVALHO E VILAR, 2002; MCDUGALL, 2007; BABU, REDDY E CHOUKSEY, 2010; FENG ET AL., 2016; HUBERT, LIU E COLLIN, 2016; LU ET AL., 2018; KUMAR E REDDY, 2019). Isso acontece pela alta heterogeneidade dos materiais, formados por diferentes constituintes, ocasionando uma biodegradação desigual, dificultando a identificação do comportamento mecânico dos RSU.

2.6.2. Parâmetro de poropressão (R_u)

A poropressão é a pressão da água que ocupa os vazios de uma determinada massa saturada, sendo ela solo, rocha ou RSU. Esta poropressão diminui a tensão normal em um plano potencial de escorregamento, resultando em uma queda no valor da resistência ao cisalhamento por causa desta diminuição da tensão normal. Portanto, nos períodos com um índice pluviométrico muito alto, a superfície piezométrica aumenta, provocando um aumento da poropressão, de modo que há a diminuição da resistência ao cisalhamento, podendo em alguns casos chegar a zero (BORGATTO, 2006).

Assim, uma das grandes preocupações na estabilidade de aterros sanitários é a distribuição da poropressão. Tecnologias como a aeração e a recirculação do chorume foram aplicadas em alguns aterros com o objetivo de acelerar a estabilização dos resíduos e reduzir o potencial de

emissão de metano. Essa recirculação e aeração têm gerado altas pressões de poros nos resíduos no interior do aterro, o que pode resultar na redução da sua tensão efetiva e resistência ao cisalhamento, comprometendo, assim, a estabilidade do aterro (TOWNSEND ET AL., 2008; GIRI E REDDY, 2014; BYUN ET AL., 2019; FENG ET AL., 2018, 2021).

O parâmetro de poropressão ru é empregado nas análises de equilíbrio limite, e consiste na relação da pressão neutra e a tensão vertical imposta. Ele simula condições de drenagem interna, e valores para RSU são considerados raros. O ru é obtido pelo cálculo demonstrado pela Equação 1 (BORGATTO, 2006; SCHULER, 2010; SUZUKI, 2012; CARVALHO, 2020).

Equação 1 - Equação para definição do parâmetro de poropressão (ru).

$$ru = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{u}{\gamma \cdot h}$$

Em que:

u : pressão neutra (kPa)

σ_v : tensão normal vertical (kPa)

γ : peso específico dos resíduos (kN/m³)

h : altura do material sobrejacente (m)

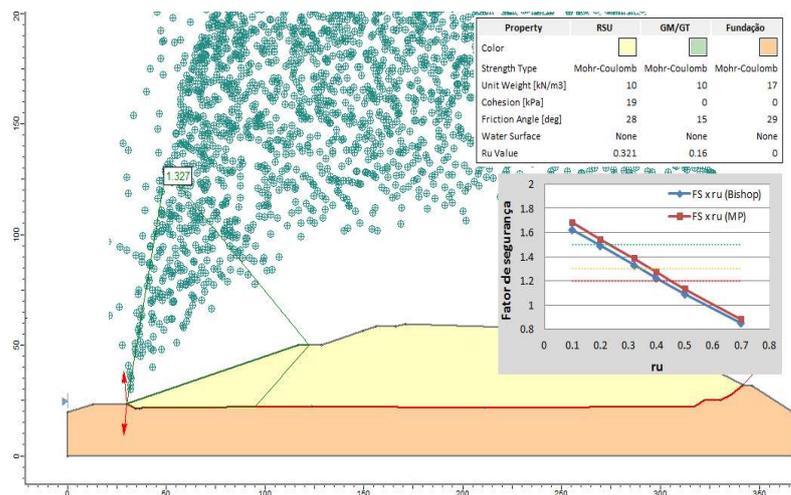
Foram realizadas diversas pesquisas em vários locais, por meio de entidades gratuitas, parceiras da UFRGS ou até pedidos particulares para pesquisadores específicos, em um período de quase um ano, e não foi encontrado nenhum tipo de pesquisa correlacionando se há ou não a interferência do parâmetro de poropressão (ru) de um aterro sanitário no fator de segurança.

2.6.3. Método de Análise de Estabilidade de Taludes

As análises de estabilidade utilizam ferramentas de verificação da estabilidade consagradas na Geotecnia, como os métodos de equilíbrio limite. Geralmente os estudos são realizados em seções transversais (bidimensionais), na qual se definem os materiais geotécnicos e seus parâmetros de interesse: parâmetros de resistência, peso específico e as pressões dos fluidos e gases atuantes.

A Figura 14 mostra uma seção de análise de um aterro de RSU, utilizando um software de análise de estabilidade comercial, com o método de Morgenstern-Price, mostrando uma das centenas de Superfícies Potenciais de Ruptura analisadas. Isso demonstra uma SPR passando através da massa de resíduos e na interface entre a geomembrana de impermeabilização e os resíduos, o que geralmente é a região mais crítica.

Figura 14 - Simulação de um aterro RSU, com o método de Morgenstern-Price.



Fonte: BSE, 2023.

1.1.1.1. Método de Fellenius

O método de Fellenius (1936) é conceituado um método de análise de estabilidade de taludes simplificado, pois não atende às três equações do equilíbrio estático. Admite uma superfície circular e para identificar o fator de segurança, o método considera somente o equilíbrio das forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos. Portanto, não leva em consideração as forças tangenciais e normais às paredes das fatias (TELLES, 2015; PUC-RIO, 2023). Com a Equação 2 encontra-se o fator de segurança (FS), o qual aplica

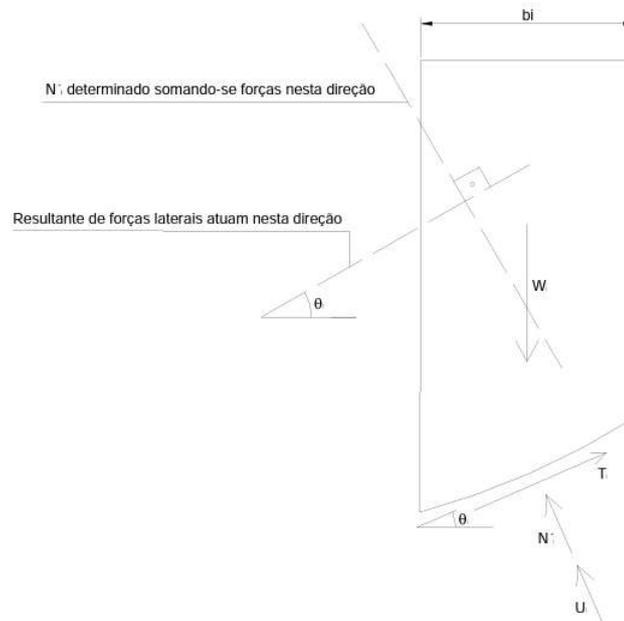
o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo de Ruptura, com o equilíbrio de forças na direção perpendicular à superfície de Ruptura. A Figura 15 exemplifica o esquema de forças na fatia pelo método de Fellenius (1936).

Equação 2 – FS com Método de Fellenius.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \square [c' (b_i / \cos \theta_i) + (W_i \cos \theta_i - u_i (b_i / \cos \theta_i)) \operatorname{tg} \phi']}{\sum_{i=1}^n \square W_i \operatorname{sen} \theta_i}$$

onde: u_i = poropressão média na base da fatia.

Figura 15 - Esquema de forças na fatia pelo método de Fellenius (1936).



Fonte: PUC-RIO, 2023.

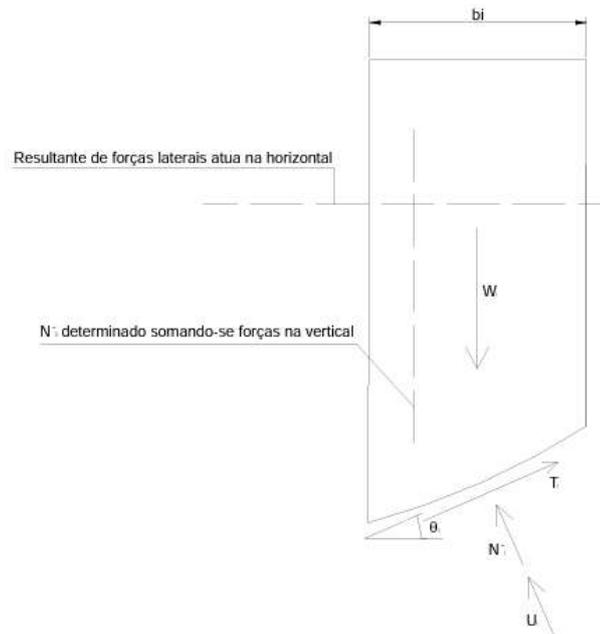
1.1.1.2. Método Simplificado de Bishop

O método de Bishop Simplificado (1955) admite a superfície de Ruptura circular e sugere desprezar a componente tangencial das forças entre as fatias, ou seja, considera-se que a resultante entre as fatias é horizontal. Na Equação 3 obtém-se o fator de segurança que se utiliza do equilíbrio de forças verticais. A Figura 16 exemplifica o esquema de forças na fatia, sendo a largura da fatia b_i e o ângulo de inclinação da fatia θ_i (PUC-RIO,2023).

Equação 3 - FS utiliza o equilíbrio de forças verticais.

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta W_i \text{sen}\theta_i} \sum_{i=1}^n \Delta [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \text{tg}\phi'] / M_i \theta$$

Figura 16 - Esquema de forças na fatia pelo método simplificado de Bishop (1955).

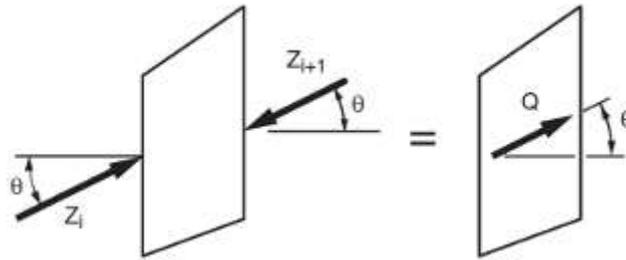


Fonte: PUC-RIO, 2023.

1.1.1.3. Método de Spencer

O método de Spencer (1967) é considerado um método rigoroso, porque satisfaz as três equações do equilíbrio bidimensional. Define dois fatores de segurança, sendo um calculado em termos de equilíbrio de forças (F_f) e o outro de equilíbrio de momentos (F_m) (TELLES, 2015). A Figura 17 representa a força resultante da interação entre as fatias, assumindo a hipótese de que a soma das resultantes é uma força Q_i com ângulo igual a θ .

Figura 17 - Esquema da força resultante na interação entre as fatias pelo método de Spencer (1967).



Fonte: TELLES, 2015.

Pelo método de Spencer (1967), o fator de segurança final é aquele cujo valor de θ resultará no mesmo valor tanto para o equilíbrio das forças quanto para o de momentos (TELLES, 2015), conforme Equação 4.

Equação 4 - Fator de Segurança com o mesmo valor do equilíbrio das forças e dos momentos.

$$FS = F_{forças} = F_{momentos}$$

Para determinar o fator de segurança deve-se calcular o valor da força Q_i , admitindo um valor constante de θ para todas as fatias e mantendo o FS como uma incógnita (TELLES, 2015), se acordo com a Equação 5.

Equação 5 - Força Q_i .

$$Q_i = \frac{\frac{c' \Delta x_i}{FS} \sec \alpha_i + \frac{tg \phi'}{FS} (W_i \cos \alpha_i - u_i \Delta x_i \sec \alpha_i) - W_i \sen \alpha_i}{\cos(\alpha_i - \theta) \left\{ 1 + \frac{tg \phi'}{FS} tg(\alpha_i - \theta) \right\}}$$

Sendo a de equilíbrio de forças (F_f) a Equação 6:

Equação 6 - Equilíbrio das forças.

$$\sum_{i=1}^n \square Q_i \sen \theta = \sum_{i=1}^n \square Q_i \cos \theta = \sum_{i=1}^n \square Q_i = 0$$

E a Equação 7 a de equilíbrio de momentos (F_m).

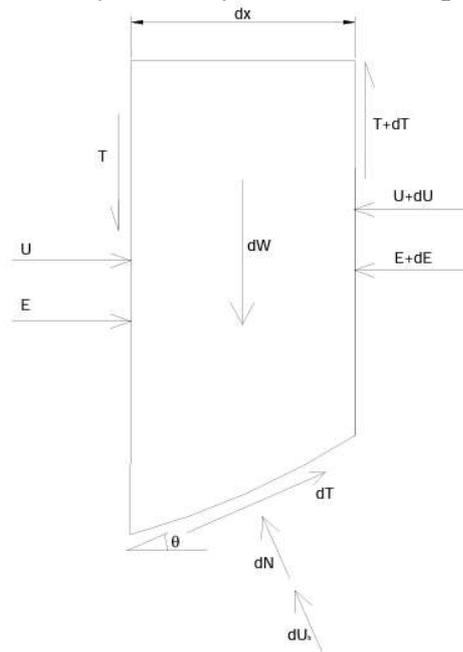
Equação 7 - Equilíbrio dos momentos.

$$\sum_{i=1}^n \square [Q_i \cos(\alpha_i - \theta)]$$

1.1.1.4. Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern e Price (1965) é um método muito rigoroso aplicado em superfícies de Ruptura quaisquer. As condições de estabilidade satisfazem todas as condições de equilíbrio de forças e momentos, conjuntamente. A massa, a qual tem potencial de instabilidade, é dividida em fatias infinitesimais e para aplicar este método, é necessário a utilização de um computador para cálculos. A Figura 18 exemplifica as forças atuantes nas fatias pelo método de Morgenstern - Price (1965) (PUC-RIO,2023).

Figura 18 - Esquema de forças na fatia pelo método de Morgenstern - Price (1965).



Fonte: PUC-RIO, 2023.

onde:

\$U\$ = Resultante das pressões neutras nas laterais da fatia;

\$dU_b\$ = Resultante das pressões neutras na base da fatia;

dW = Força peso da fatia;

T = Força tangencial entre as fatias;

E = Força normal entre as fatias;

dN = Força normal na base da fatia;

dT = Força cisalhante mobilizada na base da fatia.

Para solucionar o problema, admite-se uma relação entre as forças E e T , conforme Equação 8:

Equação 8 - Relação entre E e T .

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

onde:

λ = Constante que é determinada por processo iterativo;

$f(x)$ = função que necessita ser especificada.

Para $f(x)$ normalmente atribui-se a função arco de seno, porque, segundo Morgenstern - Price (1965), é a que tem menor influência no valor final do fator de segurança. Contudo, pode-se empregar outras funções para $f(x)$, como: arco de seno incompleto, constante, trapezoidal ou entre outras (PUC-RIO,2023).

2.6.4. NBR 11682:2009 – Estabilidade de encostas

Para a análise do FS é necessário utilizar a norma de estabilidade de encostas (ABNT NBR 11682, 2009), a qual descreve que ela não considera as deformações que ocorrem naturalmente no talude ou na encosta e que o valor do FS tem relação direta com a resistência ao cisalhamento do material da encosta. Os fatores de segurança (FS) encobre as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção. Portanto, primeiramente, deve-se

enquadrar no projeto os riscos envolvidos em relação a possibilidade de perdas de vidas humanas, e danos materiais e ambientais, conforme demonstra as Tabela 15 e 16.

Tabela 15 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

Tabela 16 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábrica de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

A NBR 11.682/2009 recomenda que o enquadramento nos níveis de segurança deve ser justificado pelo engenheiro civil responsável, em consonância com o projeto e as exigências dos órgãos públicos. Portanto, para a definição do FS, necessita levar em consideração os níveis de segurança das Tabelas 15 e 16, estipula-se pela Tabela 17.

Nível de segurança
 Tabela 17 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.
contra danos a
vidas humanas

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

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

Por se tratar de um aterro sanitário de RSU, pode-se dizer que se o nível de segurança contra danos a vidas humanas, se classificaria como médio, pois o local possui a movimentação e permanência restrita de pessoas. Em relação ao nível de segurança contra danos materiais e ambientais, se classificaria como alto, pois para caso de acidente os danos materiais e ambientais serão graves, então a referência do FS mínimo será 1,5. Na Tabela 18 foi utilizado cores para identificação, verde para mínimo, amarelo para atenção, vermelho para alerta e roxo para intervenção, as quais são definição interna da empresa CRVR.

Tabela 18 - FS em relação a condição do aterro.

Fator de Segurança (FS)	Condição
$FS \geq 1,5$	Mínimo
$1,3 \leq FS < 1,5$	Atenção
$1,2 \leq FS < 1,3$	Alerta
Abaixo de 1,2	Intervenção

Fonte: CRVR (2022).

3. METODOLOGIA

Em resumo, a pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento do fator de segurança (FS) de um aterro sanitário com impermeabilização de geossintético e geotêxtil não tecido. A análise é realizada considerando a variação das interfaces dos contatos geomembrana PEAD lisa x geotêxtil não tecido, do parâmetro de poropressão (r_u) e o nível de chorume. Para conduzir as análises, foi utilizado o *software Slide 6.0* da Rocscience. O processo de inserção de dados inicia-se com a definição da geometria, seguida pelos parâmetros geotécnicos, tipos de análises desejadas e limites aplicados.

A geometria do aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo foi escolhida como base. Foram verificadas 11 seções transversais e selecionadas 4 seções. Os parâmetros geotécnicos foram obtidos por meio de uma revisão bibliográfica de autores nacionais e internacionais. Buscou-se dados de aterros que se aproximavam da realidade do aterro base. Para a análise de estabilidade de taludes, foram compilados os métodos disponíveis no *software Slide 6.0*. Seguindo as recomendações de pesquisadores, foram selecionados dois métodos considerados mais rigorosos e um que se aproxima mais do método rigoroso. Para as variações do parâmetro de poropressão e o nível de chorume, foi disponibilizado pela empresa BSE, dados coletados no aterro sanitário de São Leopoldo.

3.1. CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SÃO LEOPOLDO

A pesquisa foi conduzida na Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo, situada na Rua Dilceu Elias de Moura, bairro Arroio da Manteiga, na cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil. A empresa responsável por sua operação é a CRVR (Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos Ltda), que tem como foco a área de valorização de resíduos. A empresa opera em seis unidades regionais nos municípios de Santa Maria, Giruá, São Leopoldo, Minas do Leão, Victor Graeff e Tramandaí, abrangendo aproximadamente 250 municípios (CRVR, 2020). A Figura 19 apresenta o mapa de localização do aterro.

Figura 20 - Central de tratamento de resíduos de São Leopoldo.



Fonte: CRVR, 2020.

Figura 21 - Disposição dos Resíduos dentro da Central de tratamento de resíduos de São Leopoldo.

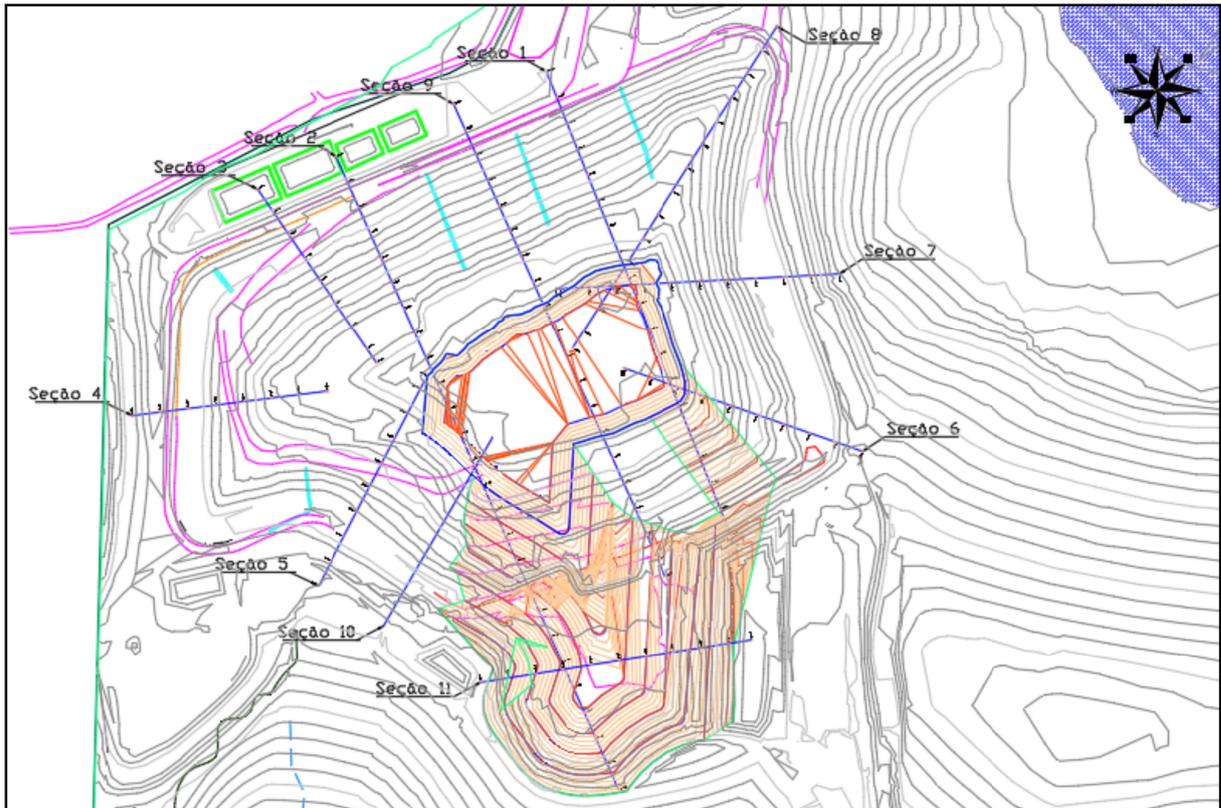


Fonte: CRVR, 2020.

3.2. GEOMETRIA

O aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo possui uma geometria composta por seis fases e onze seções, conforme Figura 22. A Figura 23 traz a vista superior do aterro sanitário retirado do Google Maps. As seções utilizadas para as simulações foram disponibilizadas pela CRVR e estão ilustradas através dos cortes longitudinais nas Figuras 24, 25, 26 e 27. Na Figura 28 consegue-se identificar os piezômetros do aterro e suas localizações.

Figura 22 - Planta baixa retirada do projeto topográfico 16/01/23.



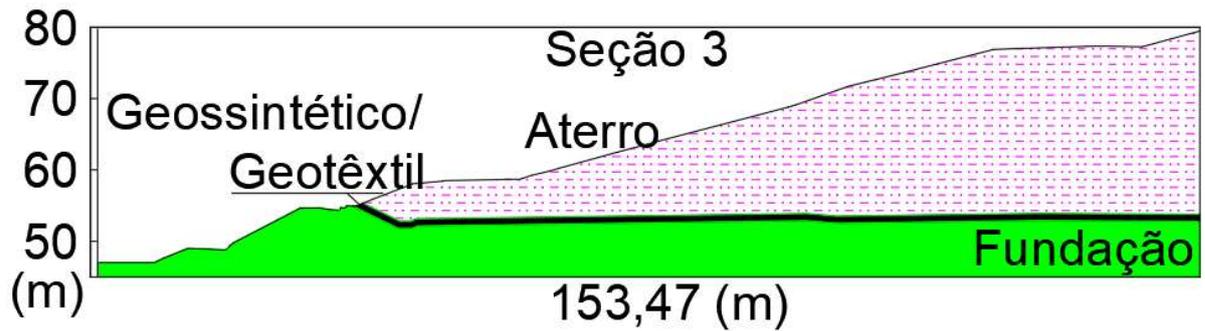
Fonte: CRVR, 2023.

Figura 23 - Vista superior retirada do Google Maps.



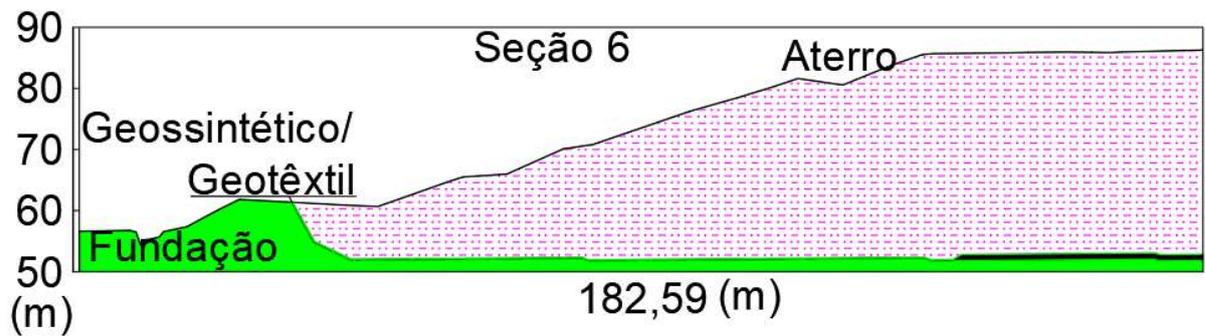
Fonte: Google Maps, 2023.

Figura 24 – Seção 3 em corte longitudinal.



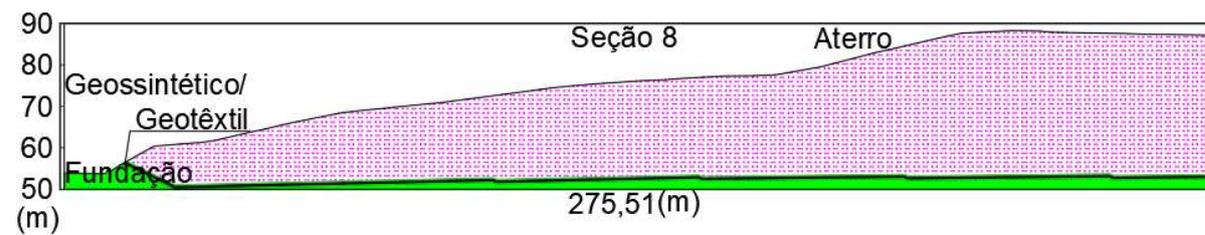
Fonte: Autora, 2023.

Figura 25 - Seção 6 em corte longitudinal.



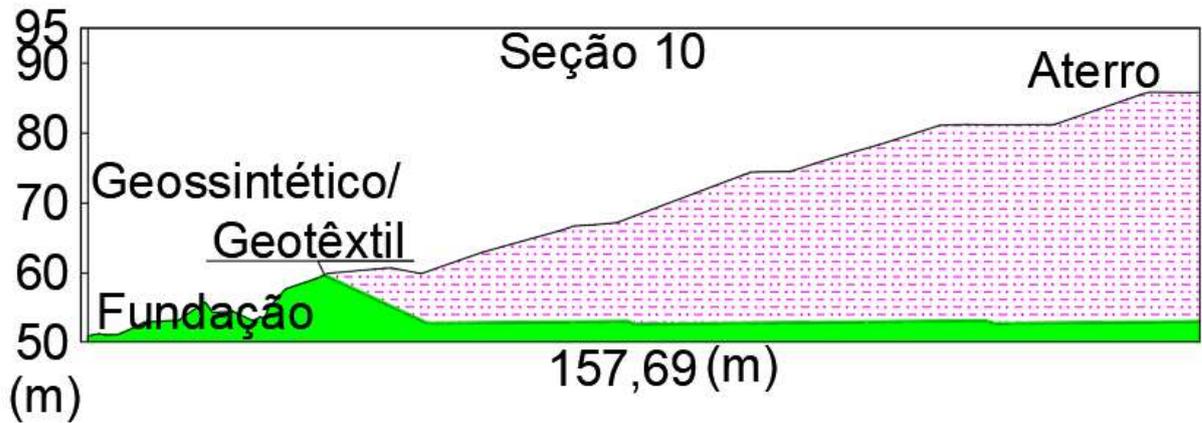
Fonte: Autora, 2023.

Figura 26 - Seção 8 em corte longitudinal.



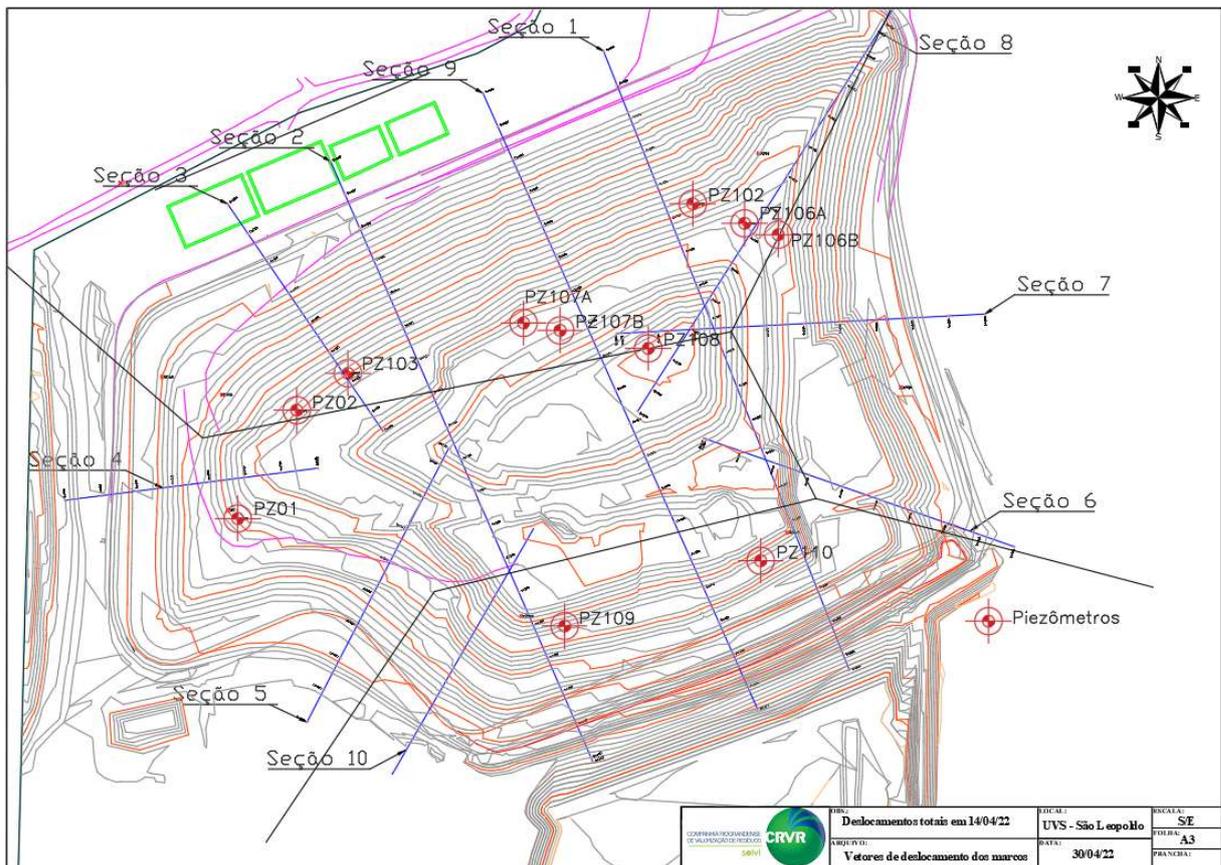
Fonte: Autora, 2023.

Figura 27 - Seção 10 em corte longitudinal.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 28 - Planta baixa com marcação dos piezômetros 14/04/2022.



Fonte: CRVR, 2022.

3.3. PARÂMETROS

3.3.1. Resistência ao Cisalhamento dos Resíduos

Para realizar a análise de estabilidade do maciço do aterro sanitário de São Leopoldo, Brasil, foram definidos alguns autores e seus dados. Segundo as Tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10, existem inúmeras pesquisas com dados de parâmetros geotécnicos diversos. Por conta disso, foram selecionadas algumas literaturas específicas que abrangem não somente diferentes anos de pesquisa, mas também diferentes países e ensaios. Essa seleção utilizou o critério de aterros que poderiam ter características similares ao aterro sanitário de São Leopoldo, juntamente dos dados utilizados por BSE (2023) para simular o mesmo. A Tabela 19 apresenta os dados das literaturas escolhidas.

Tabela 19 - Referências bibliográficas de parâmetros geotécnicos definidas para as simulações.

γ (kN m-3)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
11	13,5	22	Aterro sanitário de São Paulo	Suzuki (2012)
13	25	20	Aterro sanitário - China	Fan et al. (2016)
10	19	28	Aterro sanitário de São Leopoldo	BSE (2023)

Fonte: Autora (2023).

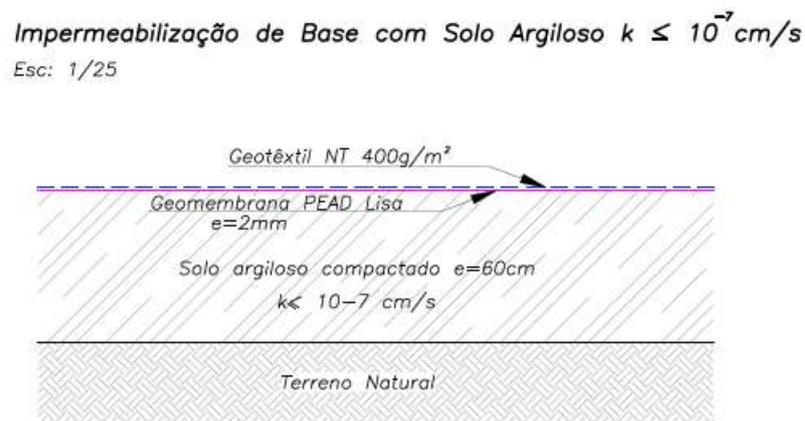
3.3.2. Fundação

Para esta pesquisa, as análises não incluíram o comportamento da fundação, ou seja, os dados da fundação não têm valor significativo. Foram utilizados valores de peso específico de 20 kN/m³, coesão de 20 kPa e ângulo de atrito de 32°, valores realistas, mas que fazem com que as superfícies de ruptura mais críticas não passem pela fundação (rupturas pelo maciço e/ou interface do contato entre geomembrana PEAD lisa x geotêxtil não tecido).

3.3.3. Interface do contato entre geomembrana PEAD lisa (GML) e geotêxtil não tecido

Os valores definidos para o contato entre a geomembrana lisa e o geotêxtil basearam-se nos dados de literatura disponíveis na Tabela 13, definindo o ângulo de atrito de 15° , utilizado pela BSE (2023). A Figura 29 demonstra o detalhamento da impermeabilização de base com solo argiloso, após colocação de geomembrana PEAD lisa e acima geotêxtil não tecido 400g/m^2 . Já na Figura 30 tem o mesmo objetivo de demonstrar o detalhamento da impermeabilização de base, mas nas fases 5 e 6 foi utilizado geocomposto bentonítico GB entre o solo compactado e a geomembrana PEAD lisa, seguido do geotêxtil $\text{RT} > 40\text{kN/m}^2$.

Figura 29 - Detalhamento da impermeabilização das fases 1, 2, 3 e 4, onde há a presença de solo argiloso.

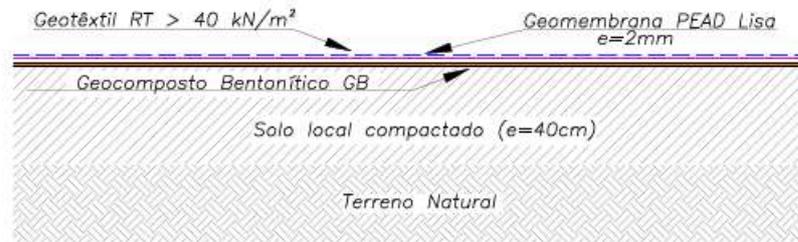


Fonte: CRVR (2022).

Figura 30 - Detalhamento da impermeabilização das fases 5 e 6, onde há a presença de geocomposto bentonítico GB.

Impermeabilização de Base com GCL

Esc: 1/25

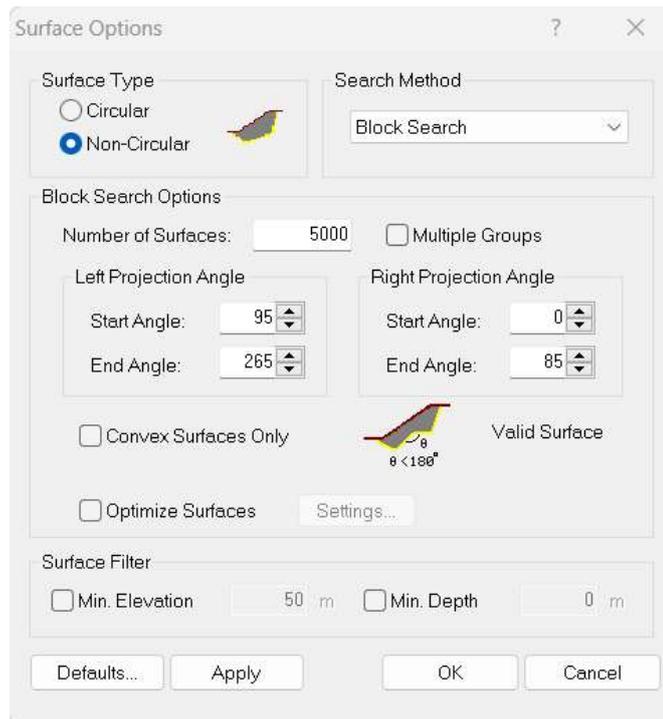


Fonte: CRVR (2022).

3.3.4. Superfície de Ruptura Potencial

Para a superfície de ruptura potencial, foi utilizado o tipo de superfície não circular e o método de pesquisa *Block Search* do *Slide 6.0*, conforme Figura 31. A ideia principal seria restringir a superfície de ruptura, admitindo a condição de hipótese de pior situação nos contatos entre geomembrana lisa e geotêxtil. Portanto, a linha do *Block Search* passará no contato entre esses materiais, forçando a superfície de ruptura potencial a passar por ali.

Figura 31 - Configuração no Slide 6.0 das opções de superfície.



Fonte: Autora (2023).

3.3.5. Definição do parâmetro de poropressão ru

Para as simulações realizadas com a presença do parâmetro de poropressão ru, foram definidos piezômetros próximos às seções. Desta forma, os piezômetros próximos à seção 3 foram o PZ 02A e o PZ 103A, os quais apresentaram parâmetros de poropressão de 0,032 e 0,162, respectivamente. Para a seção 6, o piezômetro PZ110 registrou parâmetro de poropressão de 0,393. Próximo à seção 8, encontravam-se os piezômetros PZ102A, PZ106A, PZ 106B, PZ108A e PZ108B, com valores de ru de 0,246, 0, 0,296, -0,096 e 0,080, respectivamente. Na seção 10, foi utilizado o piezômetro PZ 109, com ru de 0,488.

Como não é possível prever de maneira exata o comportamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), foi utilizado o valor de ru mais alto para todas as seções, prevendo a pior situação, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 - Valores do parâmetro de poropressão (ru) utilizadas para as simulações.

Seção	r_u utilizado
Seção 3	0,162
Seção 6	0,393
Seção 8	0,296
Seção 10	0,488

Fonte: Autora (2023).

3.3.6. Definição do Nível de Chorume

Para as simulações realizadas com a presença do nível de chorume, foram definidos piezômetros próximos às seções. Assim, os piezômetros próximos à seção 3 foram o PZ 02A e o PZ 103A, os quais apresentam profundidade de coluna de chorume de 8,04m e 12,72m, respectivamente. Na seção 6, o piezômetro PZ110 registrou uma profundidade de coluna de chorume de 6,81m. Próximo à seção 8, havia os piezômetros PZ102A, PZ106A, PZ 106B e PZ108A/B, com valores de profundidade de coluna de chorume de 8,53m, 5,80m, 10,56m, 6,79m e 23,72m, respectivamente. Na seção 10, foi utilizado o piezômetro PZ 109, com profundidade de coluna de chorume de 4,39m. Com base nesses valores de profundidade de coluna de chorume, foi traçada uma linha piezométrica aproximada que foi utilizada nas análises.

3.4. MÉTODO DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Outro fator importante para as simulações é a definição do método de análise da estabilidade de taludes. Entre os métodos conhecidos e consagrados, foram escolhidos os métodos de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Spencer para as simulações. O método de Bishop Simplificado foi escolhido por fornecer resultados semelhantes aos métodos rigorosos (Spencer e Morgenstern-Price) (REMÉDIO, 2014) e ter uma grande aceitabilidade no meio técnico.

3.5. SOFTWARE SLIDE 6.0

O *Slide 6.0* é um programa de estabilidade de taludes 2D para avaliar o fator de segurança de falhas de superfícies circulares ou não circulares em solos ou taludes rochosos. Podendo-se adicionar carregamentos externos, águas subterrâneas e diversos suportes de maneiras diferentes. Este *software* pertence ao grupo *Rocscience* especializado em engenharia civil e mineração (ROCSCIENCE, 2021).

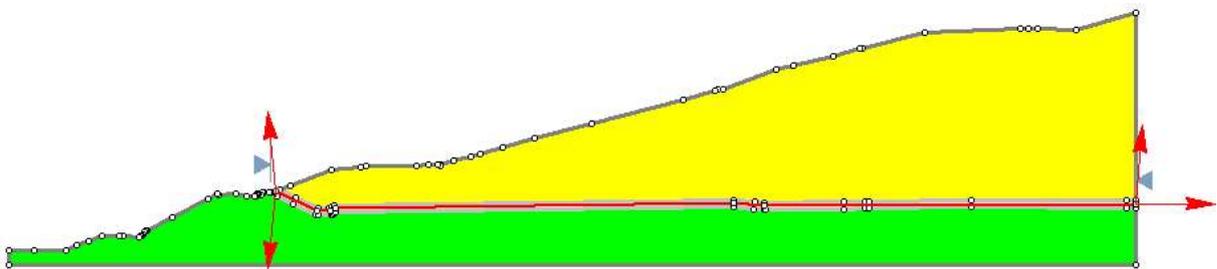
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em quatro partes: (i) variação dos parâmetros de resistência e poropressão (ru); (ii) variação dos parâmetros de resistência e nível de chorume; (iii) influência dos contatos geomembrana x materiais; (iv) alternativas de melhorias de projeto.

4.1. VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E POROPRESSÃO (ru)

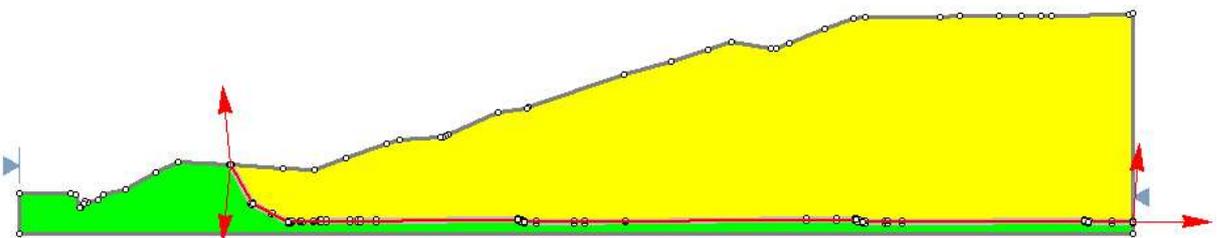
Após a definição dos parâmetros de poropressão (ru) das seções, foram realizadas as simulações no *Slide 6.0* com os tipos de seções conforme as Figuras 32, 33, 34 e 35. Foram obtidos os valores de fator de segurança, conforme a Tabela 21, e as superfícies de ruptura estão demonstradas nas Figuras dos Apêndices A, B e C. Como já foi citado, foi utilizado cores para identificação, verde para mínimo, amarelo para atenção, vermelho para alerta e roxo para intervenção.

Figura 32 - Seção 3 - tipo inserido no Slide 6.0.



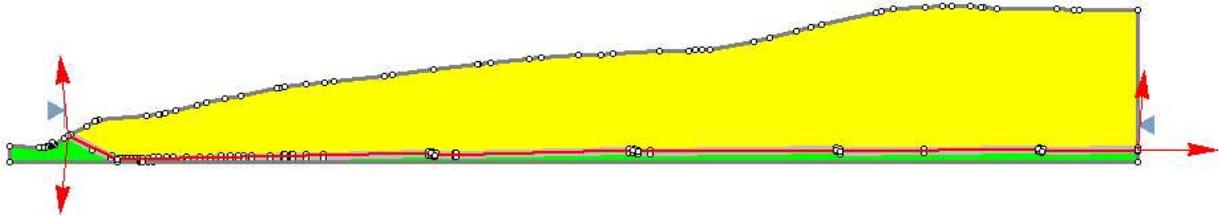
Fonte: Autora (2023).

Figura 33 - Seção 6 - tipo inserido no Slide 6.0.



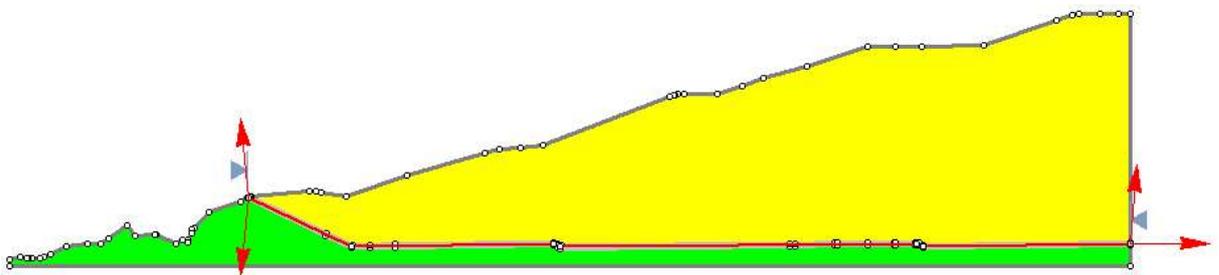
Fonte: Autora (2023).

Figura 34 - Seção 8 - tipo inserido no Slide 6.0.



Fonte: Autora (2023).

Figura 35 - Seção 10 - tipo inserido no Slide 6.0.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 21 - Resumo dos FS encontrados nas simulações com presença de do parâmetro de poropressão ru, parâmetros geotécnicos x métodos/seções.

Parâmetros Geotécnicos	Métodos	Seção 3 (ru=0,162)	Seção 6 (ru=0,393)	Seção 8 (ru=0,296)	Seção 10 (ru=0,488)
Suzuki (2012)	Bishop Simplificado	1,570	1,414	2,071	1,314
	Spencer	1,621	1,529	2,212	1,376
	Morgenstern-Price	1,671	1,479	2,197	1,373
Fan et al. (2016)	Bishop Simplificado	1,690	1,513	2,203	1,412
	Spencer	1,748	1,668	2,362	1,486
	Morgenstern-Price	1,743	1,592	2,324	1,490
BSE (2023)	Bishop Simplificado	1,839	1,632	2,392	1,530
	Spencer	1,894	1,783	2,545	1,612
	Morgenstern-Price	1,891	1,703	2,510	1,601
Variação (%)		+20,63%	+26,09%	+22,88%	+22,67%

Fonte: Autora (2023).

Foram realizadas simulações no *software Slide 6.0* com mais de um tipo de parâmetro geotécnico com o intuito de perceber se haveria, ou não, algum tipo de variação no FS. Com os resultados obtidos pode-se afirmar que o FS da seção 3 (Apêndice - Figuras A61-A63; B73-B75 e C85-C87) variou de 1,570 a 1,891, apesar de o valor mais baixo estar dentro do FS mínimo pela NBR 11.682/09, teve uma variabilidade de aproximadamente 0,35 (+20,63%), o que se pode considerar uma diferença significativa. Para a seção 6 (Apêndice - Figuras A64-A66; B76-B78 e C88-C90), o FS teve uma variação de 1,414 a 1,783, nesse caso o menor valor encontrado não se enquadra no FS mínimo, se limita na condição de “atenção”. A diferença entre os extremos do FS foi de cerca de 0,4 (+26,09%). Na seção 8 (Apêndice - Figuras A67-A69; B79-B81 e C91-C93) a variação do FS foi de 2,071 a 2,545, todos os valores de FS estão dentro do mínimo estipulado por norma. Apesar de todos os dados estarem dentro do mínimo esperado, a diferença entre os valores de FS em torno de 0,5 (+22,88%). A seção 10 (Apêndice - Figuras A70-A72; B82-B84 e C94-C98), diferentemente das outras seções, foi a que teve maiores valores na condição de “atenção”. Os FS foram de 1,314 a 1,612, sendo a variabilidade de 0,3 (+22,67%). O valor mais baixo está quase no limiar para a condição de “atenção” e o valor mais alto está dentro do FS mínimo exigido.

Nessas simulações, além de possuir três tipos de parâmetros geotécnicos diferentes, também tinham três tipos de métodos de estabilidade de taludes. Desta forma, fica ainda mais explícito que também existe uma sensibilidade no momento de adotar os parâmetros geotécnicos e os seus métodos de análise. Mesmo que duas seções tenham possuído valores dentro do FS mínimo, duas seções tiveram dados em condição de “atenção”. E a variabilidade entre os menores valores de FS encontrados e os maiores, variou de 0,3-0,5 que são valores significativos. Para todas as simulações o método de análise de estabilidade de taludes de Bishop Simplificado, se mostrou mais conservador que Spencer e Morgenstern-Price. Borgatto (2006) afirma que os métodos clássicos de análise de estabilidade que se baseiam nas características e propriedades dos solos, apresentam valores muito conservativos quando são aplicados nas análises com RSU.

Os parâmetros geotécnicos de Suzuki (2012) foram os que obtiveram os resultados mais baixos. Não existe consenso sobre o método mais adequado para a determinação de resistência ao cisalhamento dos RSU, sendo esse o motivo de tanta divergência de resultados, apesar de ser predominantemente usado ensaios de cisalhamento direto (BORGATTO, 2006; SHARIATMADARI ET AL, 2014; DACIOLO, 2020). Apesar disso, Reddy et al (2009) e

Shariatmadari et al (2014) acrescentam a importância da avaliação do comportamento não drenado dos RSU, pois ele afeta a estabilidade global do aterro sanitário. Mesmo que os ensaios de cisalhamento direto sejam realizados com taxa de deformação elevada, não assegura a manutenção da sobrepressão em materiais de permeabilidade média ou elevada, o que pode ser o caso do RSU. Caicedo et al (2002) e Harris et al (2006) afirmam que o próprio processo de amostragem, segregação de componentes e escolha do método de ensaio (tipo, forma e dimensões do equipamento) podem alterar a modelagem e composição das amostras de RSU.

Schuler (2010) e Shariatmadari et al (2014) reiteram que, a resistência ao cisalhamento das amostras foi influenciada pela idade e quantidade de fibras do material. Que o ângulo de atrito do RSU envelhecido, comparado ao novo, aumentou e a coesão diminuiu; apesar de nenhuma tendência constante ter sido relacionada a idade. Outro ponto importante, que à medida que o grau de decomposição aumentou, o ângulo de atrito aumentou e a coesão diminuiu.

Um fator que demonstrou sensibilidade é o parâmetro de poropressão, pois a seção com ru mais elevado, foi o que apresentou o FS mais baixo, ou seja, a variação do ru afeta diretamente o comportamento do aterro. Foi definido na seção 10 o ru de 0,488, pelo fato de o piezômetro mais aproximado ter apresentado esse valor. Esse resultado confirma o estudo que Borgatto (2006) e Suzuki (2012) realizaram que, sem considerar reforço de fibras, o ru mais crítico teve o FS mais baixo. Segundo Schuler (2010), sugere analisar quando foram realizadas as leituras piezométricas, pois se ocorreu em um período de muitas chuvas intensas, considerado atípico, as leituras podem ser consideradas irreais e não representativas. Silveira (2006) afirma que o piezômetro tem baixo custo, confiabilidade, durabilidade e grande sensibilidade, ou seja, há um tempo requerido para que a coluna líquida no piezômetro se estabilize, após uma variação de pressão. E quando é empregado um valor de poropressão, de um ponto específico do aterro, aplicado para encontrar o ru, e o resultado é usado como se representasse o aterro inteiro, está-se atribuindo uma incerteza.

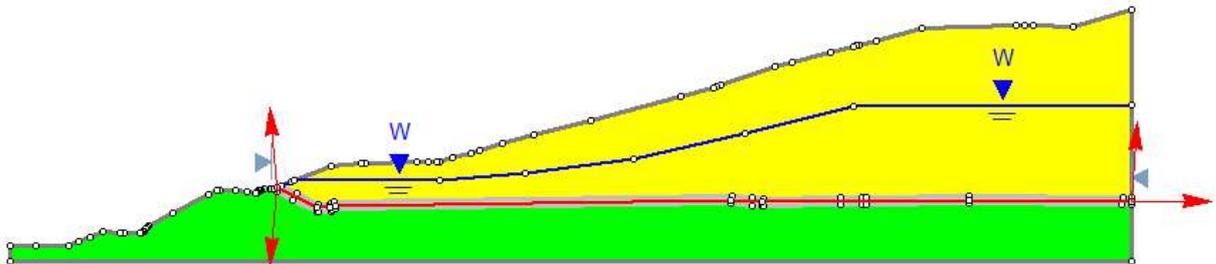
A ação da água na estabilidade pode ser atribuída a mudanças nas poropressões, alterando a tensão efetiva, e assim, a resistência ao cisalhamento dos RSU, tendo variação do peso da massa pelas mudanças no peso específico, o qual é influenciado pelo valor do parâmetro de poropressão, entre outros (SCHULER, 2010). O mesmo autor também afirma que o volume que cai na superfície do aterro, parte é infiltra, outra evapora e parte flui superficialmente, e

essa sobrecarga causa saturação no maciço tendendo a ter um comportamento não-drenado, ocasionando excessos de poropressão que diminuem a resistência ao cisalhamento do aterro.

4.2. VARIACÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E NÍVEL DE CHORUME

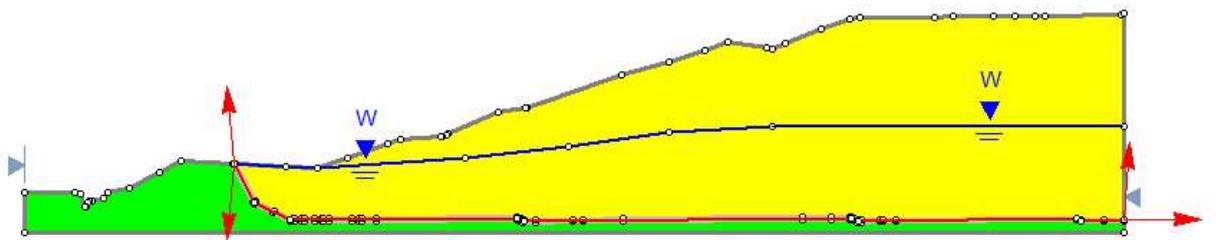
Após a definição da altura da coluna de chorume foram realizadas as simulações no *Slide 6.0* com as Seções – tipo segundo as Figuras 36, 37, 38 e 39, encontrados os valores de fator de segurança, conforme Tabela 22, e as superfícies potenciais de rupturas presentes nos Apêndices D, E e F.

Figura 36 - Simulação com Chorume, Seção 3 - tipo inserido no Slide 6.0.



Fonte: Autora (2023).

Figura 37 - Simulação com Chorume, Seção 6 - tipo inserido no Slide 6.0.



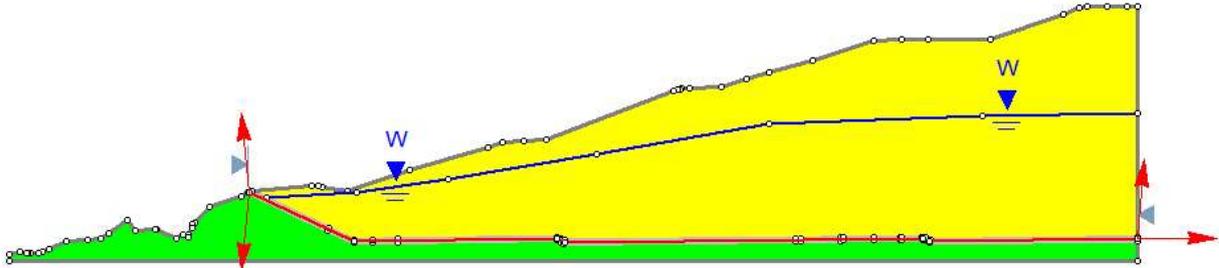
Fonte: Autora (2023).

Figura 38 - Simulação com Chorume, Seção 8 - tipo inserido no Slide 6.0.



Fonte: Autora (2023).

Figura 39 - Simulação com Chorume, Seção 10 - tipo inserido no Slide 6.0.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 22 - Resumo dos FS encontrados nas simulações com nível de chorume, parâmetros geotécnicos x métodos/seções.

Parâmetros Geotécnicos	Métodos	Seção 3	Seção 6	Seção 8	Seção 10
Suzuki (2012)	Bishop	1,020	0,925	1,180	0,851
	Spencer	1,075	1,051	1,254	0,906
	Morgenstern-Price	1,044	0,989	1,238	0,886
Fan et al. (2016)	Bishop	1,213	1,162	1,501	1,097
	Spencer	1,274	1,301	1,584	1,154
	Morgenstern-Price	1,248	1,234	1,562	1,136
BSE (2023)	Bishop	1,114	1,032	1,311	0,924
	Spencer	1,151	1,114	1,373	0,976
	Morgenstern-Price	1,134	1,053	1,344	0,946
Varição (%)		+24,90	+40,64	+34,23	+35,60

Fonte: Autora (2023).

Diferentemente das simulações com a presença do parâmetro de poropressão (ru), os resultados de Fator de Segurança (FS) encontrados com a presença do nível de chorume são preocupantes. Na seção 3 (Apêndice - Figuras D97-D99; E109-E111 e F121-F123), 6 dos 9 resultados encontrados estão em condição de “intervenção”, e 3 estão na condição de “atenção”, variando de 1,020 a 1,274 (+24,90%). Para a seção 6 (Apêndice - Figuras D100-D102; E112-E114 e F124-E126), os resultados de FS foram ainda piores, com 7 na condição de “intervenção”, 1 na condição de “atenção” e 1 na condição de “alerta”, divergindo de 0,925 a 1,301 (+40,64%). Na seção 8 (Apêndice - Figuras D103-D105; E115-E117 e F127-F129), os resultados de FS foram os mais bem encontrados em todas as seções com presença de

chorume, variando de 1,180 a 1,584 (+34,23%). Por outro lado, a seção 10 (Apêndice – Figuras D106-D108; E118-E120 e F130-F132) foi a que teve o pior desempenho, onde todos os parâmetros geotécnicos e os métodos de análise de estabilidade de taludes ficaram na condição de “intervenção”, tendo uma variabilidade de 0,851 a 1,154 (+35,60%).

Esses resultados vêm com a intenção de demonstrar a importância da avaliação, não apenas com o parâmetro de poropressão ru, mas também com o nível de chorume. Entre as Tabelas 21 e 22, houve uma diferença considerável. Isso leva à análise se a utilização do ru é representativa para o maciço inteiro, considerando a possibilidade de outras variáveis que devem ser avaliadas com atenção. Todas as simulações foram realizadas com dados disponibilizados pela instrumentação de um piezômetro.

O piezômetro é um instrumento crucial para monitorar poropressão e pressões de água, sendo considerado um dos mais importantes para o controle de segurança de barragens, fundações e estruturas anexas. Este instrumento é amplamente utilizado e goza de grande credibilidade, destacando-se por seu baixo custo, confiabilidade, durabilidade, grande sensibilidade e a capacidade de instalação de sensores de pressão para leituras remotas (SILVEIRA, 2006). Carvalho (1999) utilizou a linha piezométrica como poropressão para a análise de estabilidade, pois não possuía piezômetros no aterro.

Apesar de todos os benefícios, é importante considerar que a tubulação do piezômetro nem sempre abrange a profundidade total de um aterro. Devido a isso, é possível que a leitura do piezômetro indique poropressão zero ou não apresente a altura da coluna de chorume, mesmo quando ela exista, conseqüentemente apresenta um ru zero. Isso ocorre porque a profundidade mínima do piezômetro pode não alcançar a altura real do chorume.

Outros fatores limitantes dos piezômetros são citados por Dunnycliff (1988), como o entupimento do filtro poroso, bolhas de gás dentro do aparelho, ter um "*time lag*" muito longo, sujeito a danos causados por equipamentos de construção ou recalques ao redor do tubo, pois este deve se manter de maneira vertical, o que se torna muito difícil em um aterro sanitário, onde há grande movimentação do maciço. Kaimoto & Cepollina (1997 apud SCHULER, 2010) no seu estudo concluíram que as pressões de chorume nos maciços antigos indicam uma distribuição errada, com uma evidência muito clara de empoleiramento e bolsões.

A alta permeabilidade do material e a falta de material de cobertura adequada permite que muita água entre no aterro, aumentando o nível de chorume. Schuler (2010) mostra no estudo que a falta de drenagem também influencia diretamente a estabilidade do talude, pois o elevado nível de chorume causa o aumento da poropressão e conseqüentemente a diminuição da tensão efetiva.

4.3. INFLUÊNCIA DOS CONTATOS GEOMEMBRANA x MATERIAIS

Devido à grande necessidade de impermeabilização em aterros sanitários, frequentemente são empregados materiais geossintéticos e/ou geotêxteis, além de areias e argilas, com esse propósito. Apesar da intenção positiva dessa impermeabilização, a combinação desses materiais pode criar um ponto frágil no aterro, comprometendo sua estabilidade e permitindo que a superfície de ruptura passe entre esses contatos. Por esse motivo, foi simulada a geometria da Seção 10, considerada a mais crítica, utilizando os dados do maciço de BSE (2023), uma vez que seus valores de FS estão dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 11.682/09, detalhados com maior profundidade na seção sobre a variação do parâmetro de poropressão (ru). Além disso, foi utilizado o valor de parâmetro de poropressão (ru) de 0,488, sem deixar de considerar os dados da Tabela 23. As Figuras 40 a 57 apresentam os valores de Fator de Segurança (FS) encontrados para a variação do ângulo de atrito dos contatos.

Tabela 23 - Relação dos materiais, ângulos de atrito e referências bibliográficas para simulação dos contatos geomembrana x materiais.

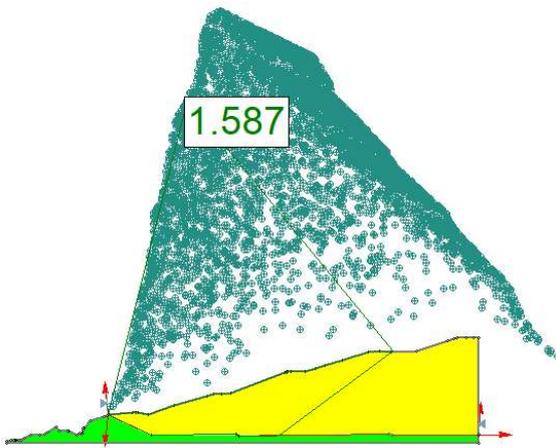
Materiais	Φ (°)	Referências Bibliográficas
Geomembrana PEAD Lisa/ Areia	14-16	Alves (2012) *residual
Geomembrana PEAD Rugosa/ Areia	33-34	Alves (2012) *residual
Geomembrana PEAD Lisa/ Argila	21	Chiarello (2022)
Geomembrana PEAD Rugosa/ Argila	30	Chiarello (2022)
Geomembrana PEAD Lisa/ Geotêxtil não tecido	15	BSE (2023)
Geomembrana PEAD Rugosa/ Geotêxtil não	23	Rebelo (2003)

tecido

Fonte: Autora, 2023.

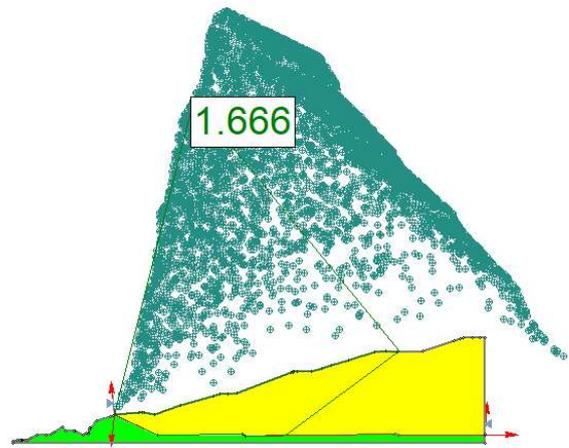
- Geomembrana PEAD Lisa (GML) – Areia; $\phi = 16^\circ$

Figura 40 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Bishop Simplificado.



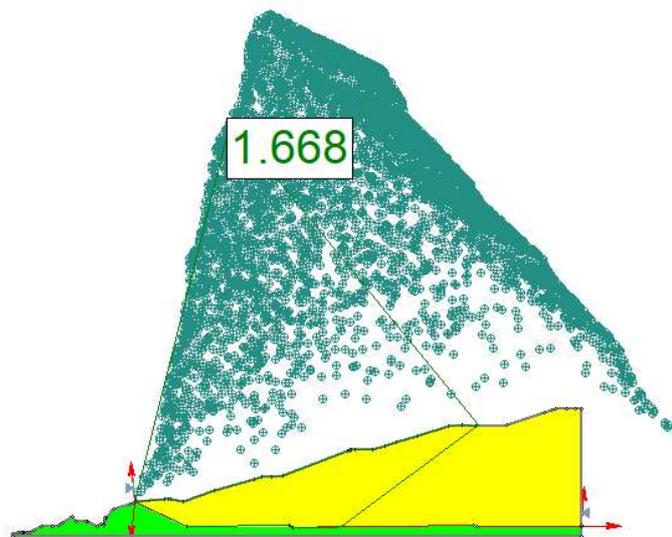
Fonte: Autora (2023).

Figura 41 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

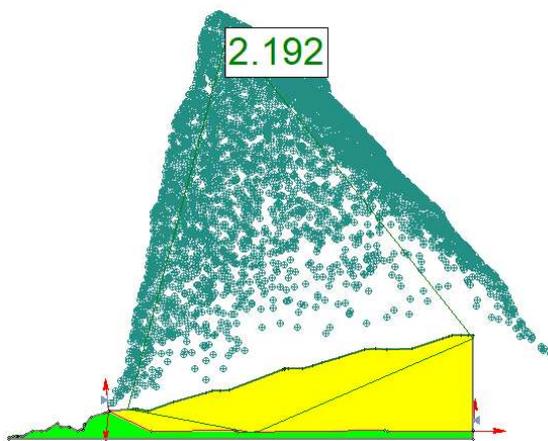
Figura 42 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Areia para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

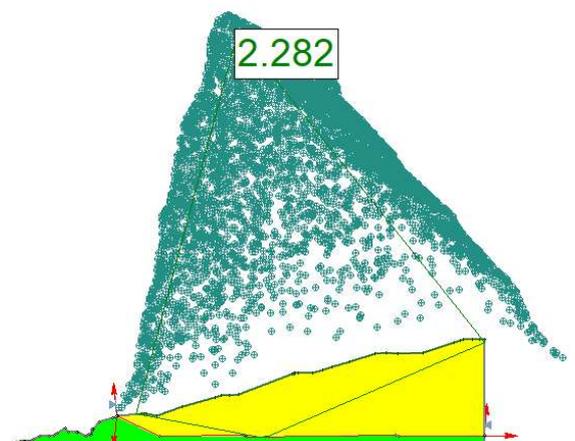
- Geomembrana PEAD Rugosa (GMR) – Areia; $\phi = 34^\circ$

Figura 43 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Bishop Simplificado.



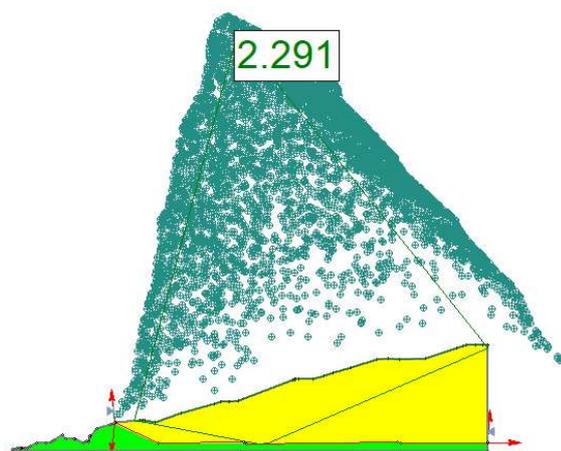
Fonte: Autora (2023).

Figura 44 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

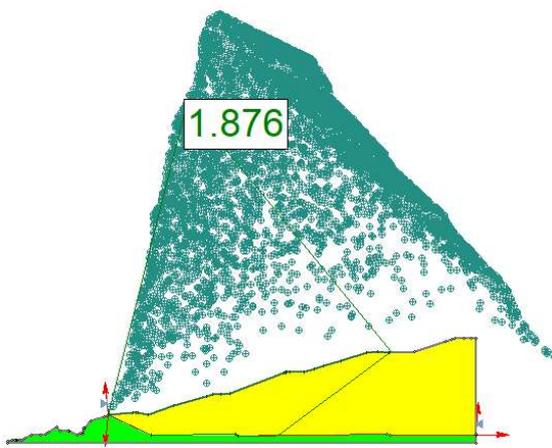
Figura 45 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Areia para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

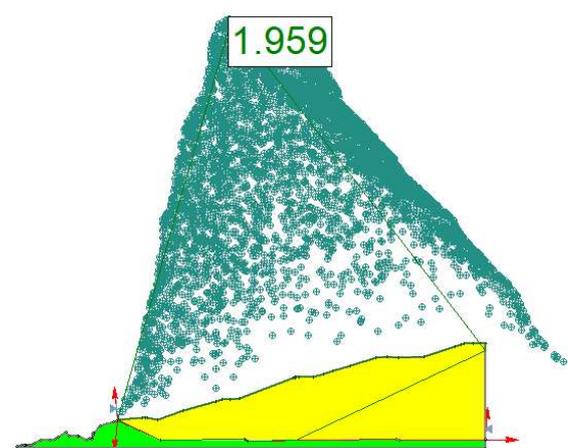
- Geomembrana Lisa (GML) – Argila; $\phi = 21^\circ$

Figura 46 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Bishop Simplificado.



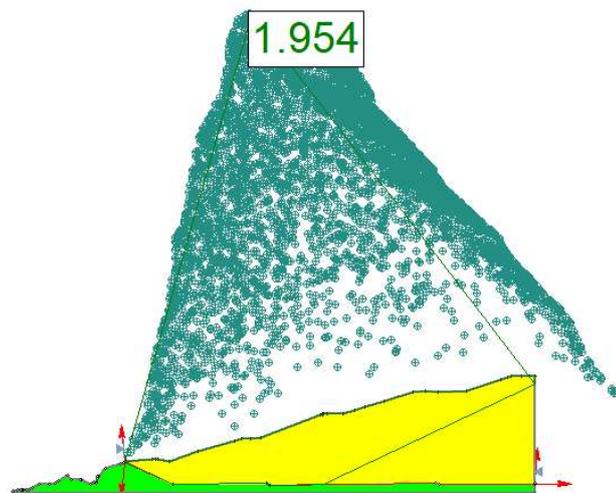
Fonte: Autora (2023).

Figura 47 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

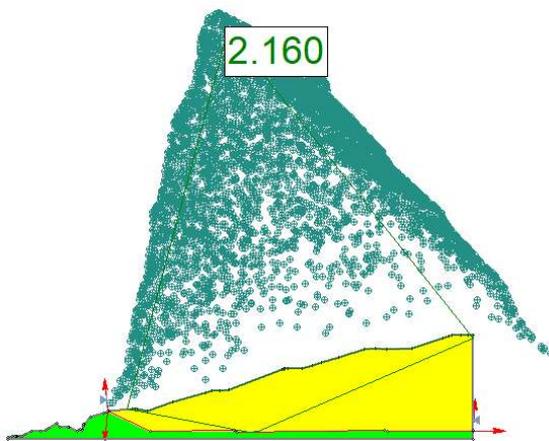
Figura 48 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Argila para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

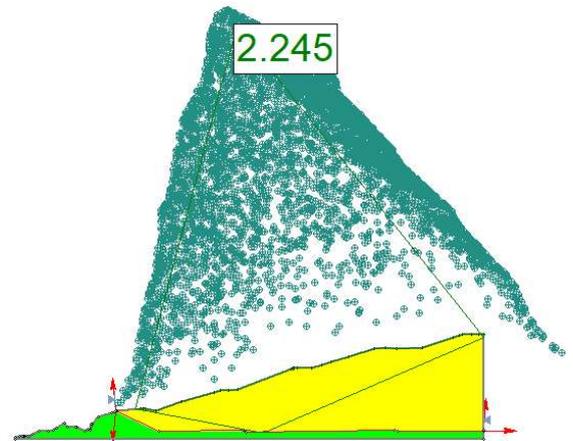
- Geomembrana Rugosa (GMR) – Argila; $\phi = 30^\circ$

Figura 49 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Bishop Simplificado.



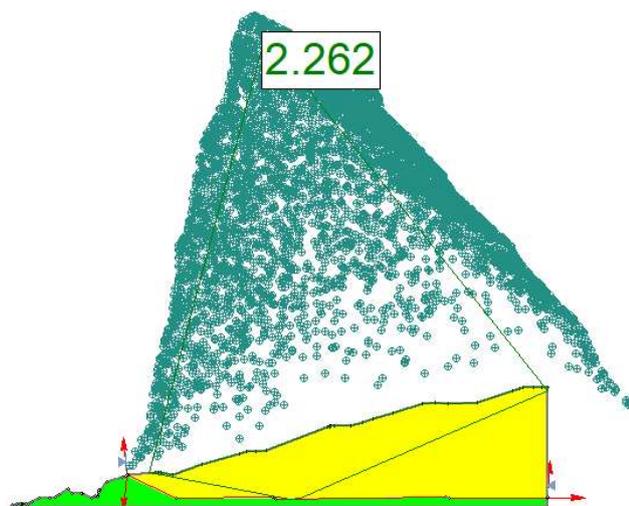
Fonte: Autora (2023).

Figura 50 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

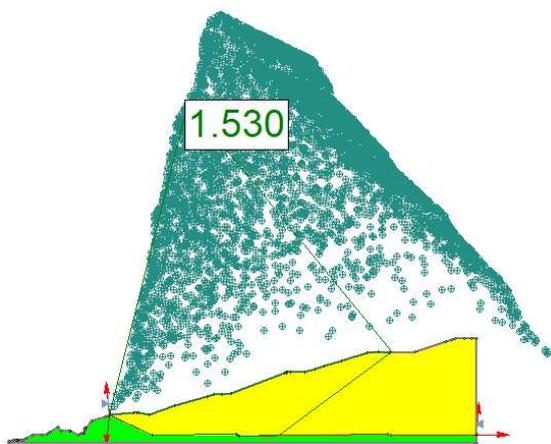
Figura 51 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

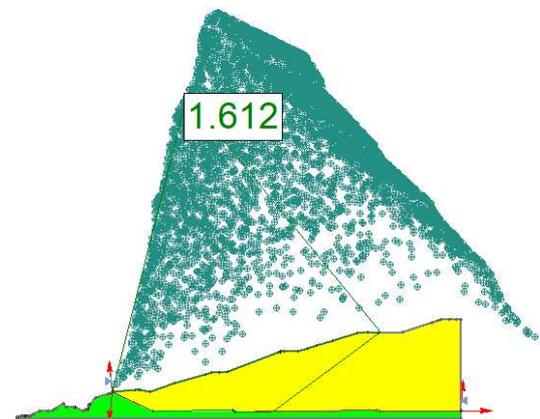
- Geomembrana Lisa (GML) – Geotêxtil não tecido; $\phi = 15^\circ$

Figura 52 - Variação do ângulo de atrito do contato
GML-Geotêxtil não tecido para Bishop
Simplificado.



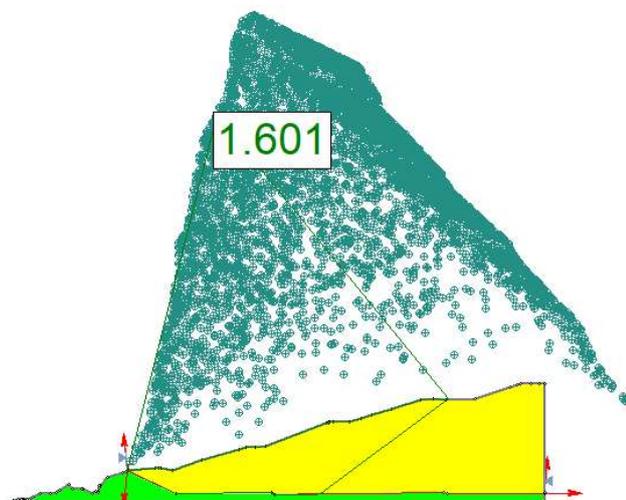
Fonte: Autora (2023).

Figura 53 - Variação do ângulo de atrito do contato
GML-Geotêxtil não tecido para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

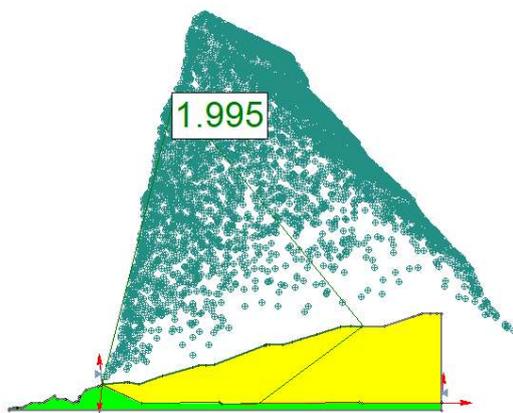
Figura 54 - Variação do ângulo de atrito do contato GML-Geotêxtil não tecido para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

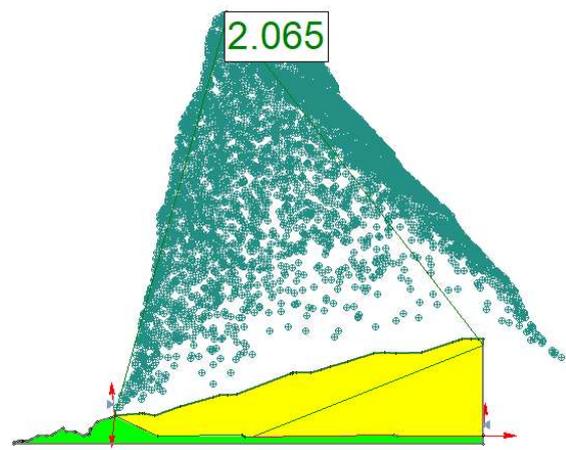
- Geomembrana Rugosa (GMR) – Geotêxtil não tecido; $\phi = 23^\circ$

Figura 55 - Variação do ângulo de atrito do contato
GMR-Geotêxtil não tecido para Bishop
Simplificado.



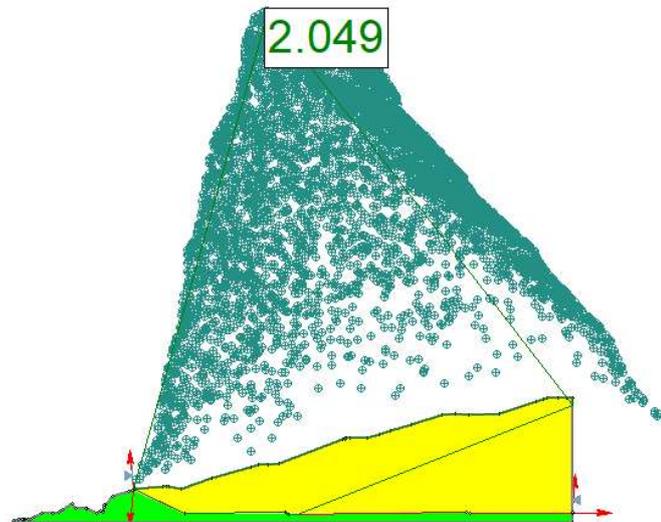
Fonte: Autora (2023).

Figura 56 - Variação do ângulo de atrito do contato
GMR-Geotêxtil não tecido para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

Figura 57 - Variação do ângulo de atrito do contato GMR-Argila para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 24 - Resumo da variação do FS em relação à variação da resistência dos contatos.

Contatos	Bishop S.	Spencer	Morgenstern-Price	Varição (%)
GML - Areia	1,587	1,666	1,668	+37%
GMR – Areia	2,192	2,282	2,291	
GML - Argila	1,876	1,959	1,954	+15%
GMR – Argila	2,160	2,245	2,262	
GML – Geotêxtil não tecido	1,530	1,612	1,601	+30%
GMR – Geotêxtil não tecido	1,995	2,065	2,049	

Fonte: Autora (2023).

Com a Tabela 12, verifica-se que as indicações da literatura para os valores de ângulo de atrito entre os contatos são muito variáveis, e a Tabela 13 vem complementá-la. Observa-se, na Tabela 24, que os Fatores de Segurança (FS) encontrados para GML – Areia e GMR – Areia, e GML – Geotêxtil não tecido e GMR – Geotêxtil não tecido apresentaram uma diferença considerável, pois tiveram um aumento de aproximadamente 0,6 (+37%) e 0,5 (+30%), respectivamente, em FS. No entanto, ao comparar o GML-Argila com o GMR-Argila, houve uma diferença menor, se comparada aos outros contatos, de aproximadamente 0,3 (15%). Conforme a NBR 11.682/09 – Estabilidade de encostas, explicitado na Tabela 18, constata-se que todos os contatos estão com o FS mínimo recomendado pela norma. Apesar de todos estarem de acordo com a norma, é possível identificar a grande sensibilidade que a variação do ângulo de atrito das interfaces de contatos entre geomembrana e materiais possui, resultando em uma significativa discrepância nos valores de FS.

Segundo Sánchez (2018), o cisalhamento da interface solo/geossintético ocorreu uma combinação de deslizamento e arado, ou seja, os grãos penetram nas superfícies das geomembranas ou geotêxteis não tecidos, criando sulcos, podendo-se aumentar a mobilização de resistência. As interfaces com geotêxtil mostraram eficiência superior (87% a 94%) as das interfaces com geomembrana texturizada (78% a 92%) e as das interfaces com geomembrana lisa (62% a 75%). O mesmo ocorre no contato do geotêxtil não tecido/ geomembrana, que as

macro asperezas das geomembranas texturizadas penetram mais no geotêxtil e produzem uma interação no núcleo, enquanto os fios superficiais do geotêxtil interagem com as micro asperezas, no caso do aumento de tensão normal. Já por tensões menores, mostrou-se influenciada pelo velcro. Nas interfaces com geomembrana lisa sob baixas e altas tensões normais, os ângulos de atrito das envoltórias diferem dos secantes, embora sejam próximos.

Chiarello (2022) afirma que a resistência de interfaces depende de parâmetros de adesão que são desenvolvidos entre os materiais em contato. Vários fatores podem modificar os valores de resistência ao cisalhamento, ainda mais fatores relacionados as características dos materiais utilizados. Além das condições essenciais dos materiais, existem situações em que há variações de resistência por modificações nas condições em que os materiais se encontram como: influência da textura dos materiais, flexibilidade da geomembrana, umidade, temperatura, tensões normais, escala dos ensaios, espessura da camada de solo para o ensaio, granulometria do solo, formas das partículas, espessura da geomembrana. O estudo também afirma que a envoltória da interface solo-GML apresenta um comportamento frágil e é bem definida pelos valores máximos de ruptura atingidos, possuindo apenas um ponto específico para cada tensão. Estes valores atingidos apresentam adesão nula, confirmando com o comportamento esperado para geomembranas lisas, devido a superfície sem rugosidade, cria uma interação com possível deslizamento das partículas.

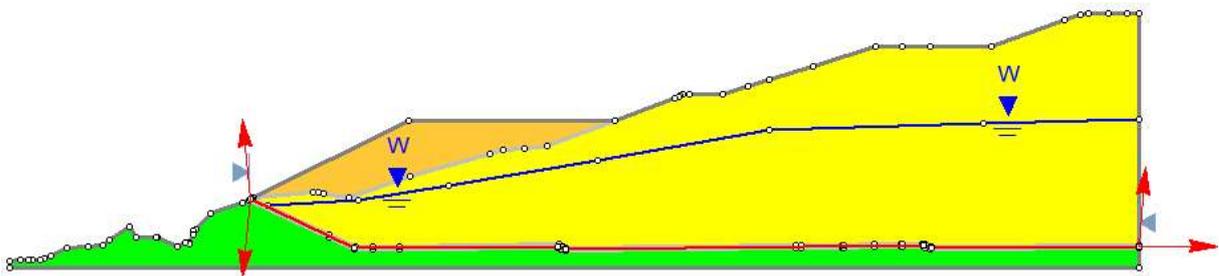
4.4. ALTERNATIVAS DE MELHORIAS DE PROJETO

Como alternativa para melhorias de projeto e mitigação de riscos em obras já executadas, foram sugeridas duas propostas. Para isso, analisou-se a geometria da Seção 10, considerada a mais crítica, e os dados do maciço de BSE (2023). Essa escolha se deu pelo fato de que os valores de FS deles, nesta seção, forem os mais baixos, não se enquadrando na NBR 11.682/09, conforme detalhado de forma mais abrangente na seção sobre a variação 4.2.

4.4.1. Mudança de geométrica com acréscimo de dique de argila compactada

Oliveira (2002) sugere que taludes de aterro sanitário devem ter inclinações máximas de 1V:1H, com bermas de 6m de largura a cada 10m. Essas bermas devem ter altura máxima de 20m para se obter um fator de segurança igual a 1,3. Para alturas máximas de 30m, a inclinação máxima recomendada é de 1V:1,5H. Por esse motivo, a inclinação utilizada seguiu a inclinação do pé, com altura máxima de 10m, conforme mostra a Figura 58.

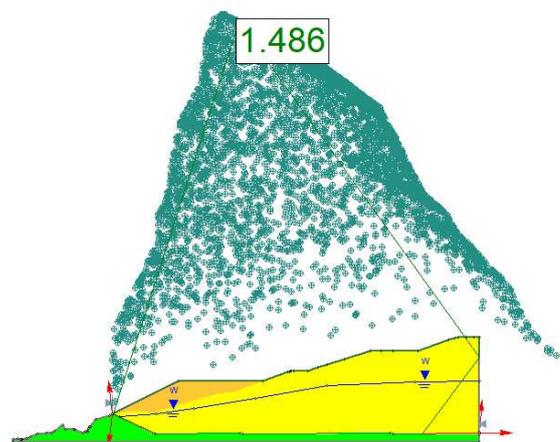
Figura 58 – Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada).



Fonte: Autora (2023).

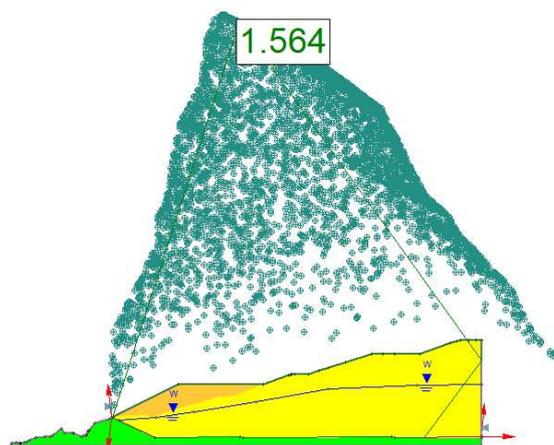
Os parâmetros adotados para o dique, foram dados de argila compactada, fornecido por Suzuki (2012), que são: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $c' = 10 \text{ kPa}$ e $\phi = 30^\circ$. Os resultados para FS encontrados na simulação no software *Slide 6.0* foram 1,486 para Bishop Simplificado, 1,564 para Spencer e 1,503 para Morgenstern-Price, como demonstra Figura 59, 60 e 61.

Figura 59 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Bishop Simplificado.



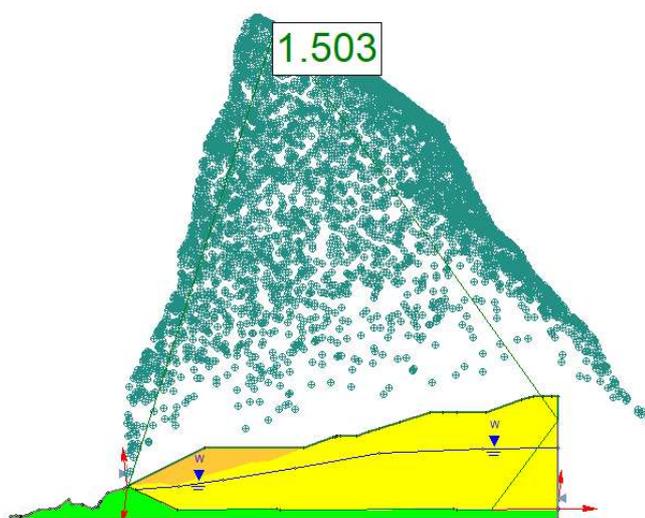
Fonte: Autora (2023).

Figura 60 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

Figura 61 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (argila compactada), FS para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

A comparação entre os maciços sem e com dique (argila compactada) é demonstrada na Tabela 25. É possível verificar que, com a colocação do dique de argila compactada, houve uma melhora significativa de FS para todos os métodos, em torno de +60%. Fica evidente que o aprimoramento com mudança de geometria, utilizando um dique de argila compactada no pé do talude, é mais eficiente em comparação ao aterro sem o dique.

Tabela 25 - Comparação do maciço sem e com dique (argila compactada).

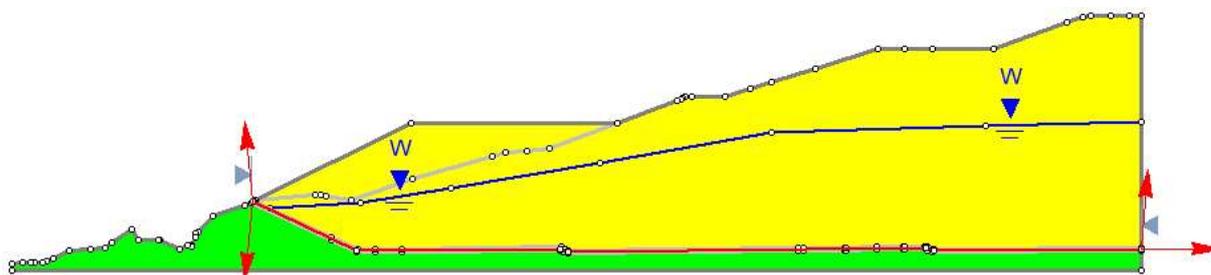
Geometria	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price
Sem dique	0,924	0,976	0,946
Com dique (argila compactada)	1,486	1,564	1,503
Variação (%)	+60,82%	+60,24%	+58,87%

Fonte: Autora (2023).

4.4.2. Mudança de geométrica com acréscimo de dique de RSU

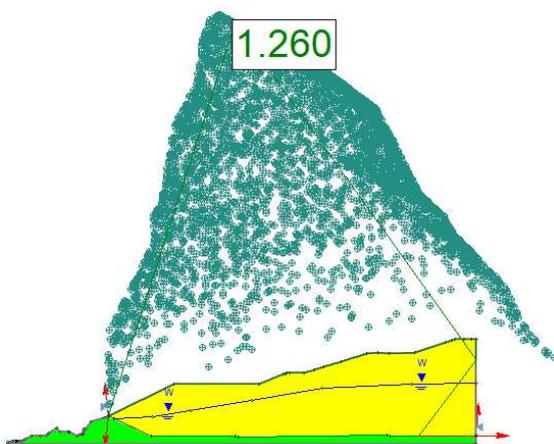
Para esta simulação, foi utilizada a mesma geometria que a do 4.4.1., ocorrendo apenas a mudança do parâmetro, que foi de argila compactada de Suzuki (2012) para parâmetros geotécnicos de BSE (2023), ou seja, a utilização do próprio RSU proveniente do aterro ($\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$, $c' = 19 \text{ kPa}$ e $\phi = 28^\circ$), conforme a Figura 62.

Figura 62 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique RSU.



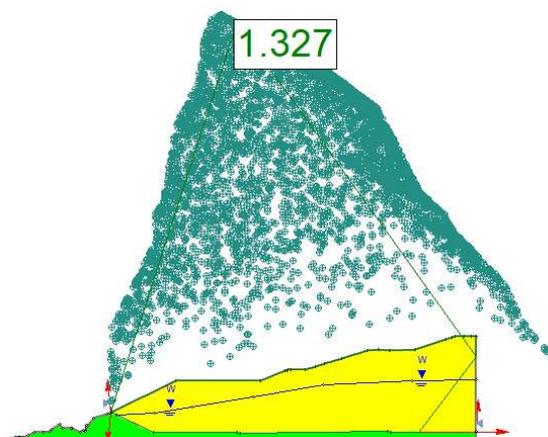
Fonte: Autora (2023).

Figura 63 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Bishop Simplificado.



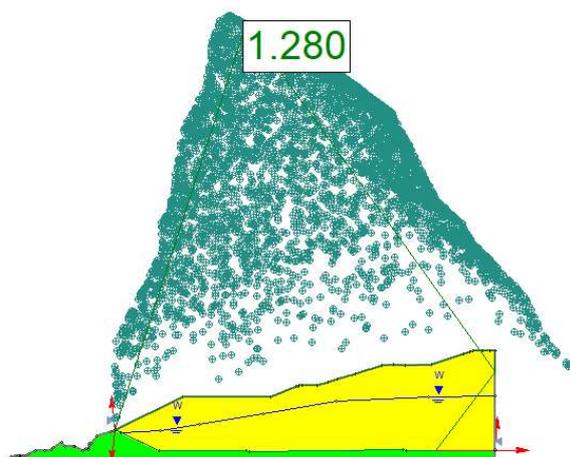
Fonte: Autora (2023).

Figura 64 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Spencer.



Fonte: Autora (2023).

Figura 65 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico BSE (2023), com dique (RSU), FS para Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

A comparação realizada entre os maciços sem e com dique (RSU) está demonstrada na Tabela 26 e Figuras 63, 64 e 65. É possível verificar que com a colocação do dique de RSU houve uma melhora no FS significativa, para todos os métodos, em torno de +36%. Se compararmos o melhoramento com dique de argila compactada e o com RSU, o de argila compactada teve um aumento de FS maior que o de RSU. O que torna discutível a disponibilidade do material, pois argila compactada, diferente de RSU, pode não estar a disposição tão facilmente.

Tabela 26 - Comparação do maciço sem e com dique (RSU).

Geometria	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price
Sem dique	0,924	0,976	0,946
Com dique (RSU)	1,260	1,327	1,280
Varição (%)	+36,36	+35,96	+35,30

Fonte: Autora (2023).

Tabela 27 - Resumo dos FS de todos as propostas de melhoramento de projeto.

Melhoramentos de Projeto	Bishop Simplificado	Spencer	Morgenstern-Price
Sem dique	0,924	0,976	0,946
Com dique (argila compactada)	1,486	1,564	1,503
Com dique (RSU)	1,260	1,327	1,280

Fonte: Autora (2023).

A Tabela 27 apresenta um resumo dos Fatores de Segurança (FS) encontrados para as propostas de melhoria de projeto, que incluem a colocação de um dique com argila compactada e outro com Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – o material presente no aterro. Ambas as propostas resultaram em aumento no FS, sendo o principal motivo a localização desses diques na base do aterro. Esses resultados estão em concordância com os achados de Suzuki (2012) e as sugestões de El Maguiri et al. (2020) em suas pesquisas, onde o primeiro também utilizou diques reforçados com geogrelhas, contribuindo ainda mais para o aumento do FS.

Boscov & Hemsli (2020) sugerem que, devido à crescente demanda por áreas destinadas a novos aterros e à dificuldade em obter licenças para eles, a utilização de diques reforçados

para a verticalização do aterro tem sido uma solução empregada para aumentar a capacidade das instalações. Ou seja, não apenas como reforço para a elevação do aterro, mas também como expansão, com taludes para Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Reiffsteck e Vignon (1996) afirmam que, devido ao aterro sanitário ser uma obra sofisticada, tem-se observado uma utilização cada vez maior de reforço com geossintéticos. Ainda existem maiores possibilidades de realizar reforço com diques. Essa estrutura, quando colocada na periferia ou dentro do aterro, pode aumentar a capacidade de armazenamento, economizando os solos que não estão disponíveis no local, além de incluir um sistema de segurança passiva, se necessário. Esse sistema não apenas aumenta a estabilidade, mas também proporciona economia nos custos devido à fácil concepção, construção e gestão.

5. CONCLUSÕES

Para as simulações realizadas no *software Slide 6.0*, foram utilizados como variáveis os parâmetros geotécnicos do maciço de Suzuki (2012), Fan et al. (2016) e BSE (2023), os métodos de análise de estabilidade de taludes de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price, e as seções 3, 6, 8 e 10 do aterro sanitário de São Leopoldo. Com essas variáveis, foram feitas análises da variação dos parâmetros de resistência e poropressão (ru), variação dos parâmetros de resistência e nível de chorume, influência dos contatos geomembrana x materiais e alternativas de melhorias de projeto.

Através da variação dos parâmetros de resistência e poropressão (ru), foram encontradas variações no FS entre o valor mínimo e máximo de +20,6% para a seção 3, +26,1% para a seção 6, +22,9% para a seção 8 e +22,7% para a seção 10. Essa diferença demonstra que existe uma grande sensibilidade no momento de definir os parâmetros geotécnicos do maciço e os seus métodos de análise. Bishop Simplificado foi o método de análise considerado mais conservador. A grande divergência nos valores de FS encontrados dá-se pela grande heterogeneidade do RSU, além de não existir um método estabelecido para a determinação de resistência deste material. Quando se fala do material, se fala de inúmeras variáveis, desde temperatura, idade, umidade, ensaios, tipos de resíduos, entre outros; o que torna cada vez maior o número de incertezas. Isso sem contar com o parâmetro de poropressão (ru), o qual leva em consideração a pressão normal naquele ponto e momento de medição. Sem ponderar os demais pontos do aterro, condições climáticas do período, profundidade do instrumento.

A variação dos parâmetros de resistência e nível de chorume apresentaram resultados ainda mais acentuados, se comparados ao item 4.1. De todos os valores de FS encontrados, cerca de +65% (23 resultados) estão em condição considerada de intervenção, pelos critérios do empreendimento. Houve uma maior variabilidade, comparada às análises com parâmetros de poropressão, de +24,9 para a seção 3, +40,6% para a seção 6, +34,2% para a seção 8 e +35,6% para a seção 10. Esses resultados nos alertam sobre a importância desse tipo de análise, a qual deve-se ter uma atenção especial para o nível de chorume no maciço. A utilização do parâmetro de poropressão tem uma representatividade importante, mas não única, ou seja, ela não avalia o comportamento do maciço em um todo, ponderar a utilização de outras variáveis para a análise minimiza o número de incertezas, as quais já são grandes. O piezômetro é muito importante para o monitoramento destas variáveis, mas ainda assim ele

traz incertezas, desde a profundidade de medição, “*time lag*” longo, danos no equipamento pelos recalques, até a possibilidade da distribuição irregular das pressões de chorume, causados pelo empoleiramento de níveis e bolsões dentro do maciço.

Sobre a influência dos contatos entre geomembrana e materiais na estabilidade dos aterros de RSU, foram realizadas análises considerando a resistência do contato da Geomembrana Lisa - Areia, Geomembrana Rugosa - Areia, Geomembrana Lisa - Argila, Geomembrana Rugosa - Argila, Geomembrana Lisa - Geotêxtil não tecido, e Geomembrana Rugosa - Geotêxtil não tecido. Os contatos entre Argila e Geomembranas Lisa e Rugosa tiveram uma variação de, aproximadamente, +15%. Se compararmos o contato da Areia e Geotêxtil não tecido com a Geomembrana Lisa e Rugosa, os contatos com a Argila tiveram uma variação menor, pois estes tiveram variação de +37% e +30%, respectivamente. Isto é, percebe-se a sensibilidade que a variação do ângulo de atrito das interfaces de contatos entre geomembrana e outros materiais possui, o que resultou em uma grande variabilidade nos valores de FS. A diferença do comportamento entre os contatos de diferentes materiais vem como mais uma variável, a qual pode ter modificações no comportamento dependendo das condições como: umidade, temperatura, flexibilidade, influência das texturas, granulometria.

Pelo fato de os fatores de segurança terem sido baixos, sugeriu-se alternativas de melhorias de projeto. A proposta de mudança de geometria com o emprego de diques é uma proposta rápida e de fácil execução. Para isso, foi estudada a mudança de geometria com duas alternativas de construção de diques: com argila compactada e com RSU. Ambas as propostas tiveram aumento no fator de segurança, comparado ao aterro sem dique. Isso deve-se ao fato da localização do dique, no pé do aterro, ser uma carga estabilizante. A solução com o RSU teve o FS mais baixo comparado ao dique com argila compactada, porém, deve-se levar em consideração que a utilização de RSU é uma solução em geral mais econômica. Esta solução permite aumentar a capacidade das instalações, a qual é um problema pela crescente demanda de áreas destinadas a novos aterros.

5.1. SUGESTÕES

Para futuras pesquisas, abrem-se sugestões de investigação sobre o comportamento do material (RSU) ao longo do tempo, levando em consideração os processos de degradação, compactação e outros fatores influenciadores. Outro ponto a ser avaliado é o impacto potencial das mudanças climáticas na estabilidade dos aterros sanitários, considerando variações nos padrões de precipitação, temperatura e eventos climáticos extremos. Além disso, sugere-se explorar o efeito de diferentes tipos de drenagem e tecnologias na redução da poropressão e do nível de chorume.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. F. **Estudo experimental do atrito da interface areia-geomembrana**. Trabalho de Conclusão. Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS. (<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/63207>), 2012.
- ABMS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro. 1992.
- _____. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- _____. **NBR 11.682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro. 2009.
- _____. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro. 1997.
- ABUEL-NAGA HM, BOUAZZA A. **Thermomechanical Behavior of Saturated Geosynthetic Clay Liners**. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering 139. pg 539-547. 2013.
- ANNAPAREDDY VSR, PAIN A. **Influence of Foundation Soil on the Seismic Factor of Safety of Geosynthetic-Lined Solid-Waste Landfills: Equivalent Linear Approach**. Nat. Hazards Rev., 21(3): 04020027. 2020.
- BABU GS, REDDY KR, and CHOUKSEY SK. **Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression**. Waste Management, 30(1), 11-22. 2010.
- BABU GS, REDDY K.R, and SRIVASTAVA A. **Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes**. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 18(1), 2014, pp. 27-37.
- BENVENUTO, C. e CUNHA, M.A. **Escorregamento em massa de lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo**. In.: REGEO'91 - SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 2, 1991, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro: ABMS, 1991, v.2, p 55-66.
- BNDES Setorial. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**. n 27. p. 59-100. Março, 2008.
- BORGATTO AVA. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.
- BOSCOV, M.E.G., ABREU, R.C. **Aterros Sanitários: previsão de desempenho x desempenho real**. In: ABMS/NRSP. *Previsão de desempenho ou comportamento real*. São Paulo, 2000. p. 7-44.

BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo, Oficina de Textos. ISBN 978-85-86238-73-4. 2008.

BOSCOV MEG, HEMSI PS. **Some topics of current practical relevance in environmental geotechnics**. *Soils and Rocks* 43(3): 461-495. 2020.

BOUAZZA A, NAHLAWI H, AYLWARD M. **In Situ Temperature Monitoring in an Organic-Waste Landfill Cell**. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering* 137. pg 1286-1289. 2011

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 3. ed., reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara**. 2010.

BRAY JD, ZEKOS D, KAVAZANJIAN JR E, ATHANASOPOULOS GA, RIEMER MF. **Shear Strength of Municipal Solid Waste**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 135; p - 709-722. June, 2009.

BSE. **Relatório de monitoramento geotécnico nº26 – aterro sanitário de são Leopoldo**. Novembro. 2023.

BYUN B, KIM I, KIM G, EUN J, LEE J. **Stability of bioreactor landfills with leachate injection configuration and landfill material condition**. *Computers and Geotechnics* 108. 234-243. 2019.

CAICEDO B, YAMIN L, GIRALDO E, CORONADO O. **Geomechanical Properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill**. *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics*. Rio de Janeiro. Anais, 2002.

CARVALHO, AS. **Análise da influência do gerenciamento de um aterro industrial na estabilidade do maciço**. TCC. UFJF. 2020.

CARVALHO, M.F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 1999.

CARVALHO MF, MACHADO SL, NASCIMENTO JCF, SANTOS AC. **Estudo Da Geração De Metano Produzido Nas Células Do Aterro Sanitário Metropolitano Centro Em Salvador Da Bahia**. X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2010.

CEN WJ, WANG H, SUN YJ. **Laboratory Investigation of Shear Behavior of High-Density Polyethylene Geomembrane Interfaces**. *Polymers*, 10, 734. 2018.

CHAO Z, SHI D, FOWMES G, XU X, YUE W, CUI P, HU T, YANG C. **Artificial intelligence algorithms for predicting peak shear strength of clayey soil-geomembrane interfaces and experimental validation**. *Geotextiles and Geomembranes* 51. pg 179–198, 2023.

CHEN WB, XU T, ZHOU WH. **Microanalysis of smooth Geomembrane–Sand interface using FDM–DEM coupling simulation.** Geotextiles and Geomembranes 49. pg 276–288. 2021.

CHIARELLO, GP. **Interação de interfaces entre solo e geomembranas por meio de ensaios de cisalhamento direto.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2022.

CRVR. **Quem somos.** 2020. Disponível em: <<https://crvr.com.br/quem-somos/>> Acesso em: 09 fev. 2023.

DACIOLO, LVP. **Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos.** Universidade de São Carlos. 2020.

DIAZ LF, SAVAGE GM, EGGERTH LL. **Alternatives for the treatment and disposal of healthcare wastes in developing countries.** Waste Management. 2005; 25:626-37.

DUNNCLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance.** New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988.

EID HT, STARK TD, DOUGLAS EVANS W, SHERRY PE. **Municipal Solid Waste Slope Failure. I: Waste And Foundation Soil Properties.** Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. May, 2000.

EL MAGUIRI A, SOUABI S, TORO MZ, IDRISSE L. **Design of the safe model of landfill fikes for developing countries.** Civil and Environmental Engineering. Vol 16, Issue 1, 11-20. 2020.

FENG SJ, CHEN ZW, CHEN HX, ZHENG QT, LIU R. **Slope stability of landfills considering leachate recirculation using vertical wells.** Engineering Geology 24, pg 76–85. 2018.

FENG SJ, WU SJ, FU WD, ZHENG QT, ZHANG XL. **Slope stability analysis of a landfill subjected to leachate recirculation and aeration considering bio-hydro coupled processes.** Geoenvironmental Disasters 8:29. 2021.

FERNANDES JG. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Experimental.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia. 2009.

GABR MA, HOSSAIN MS, BARLAZ MA. **Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste with Leachate Recirculation.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE. April, 2007.

GALVÃO JUNIOR, A. D. C. et al. **Resíduos Sólidos no Brasil.** 2014.

GIRI RK, REDDY KR. **Slope stability of bioreactor landfills during leachate injection: Effects of heterogeneous and anisotropic municipal solid waste conditions.** Waste Management & Research 32 (3). pg 186-197. 2014.

Biogás de aterro sanitário: veja os números do Brasil e do mundo. **GNPW Group**, 2021. Disponível em: <<https://www.gnpw.com.br/energia-pt/biogas-de-aterro-sanitario-veja-os-numeros-do-brasil-e-do-mundo/>>. Acesso em: 02 de jul. de 2022.

GURJÃO RIL. **Influência Da Tensão Normal Aplicada, Peso Específico E Umidade Dos Resíduos Na Resistência Ao Cisalhamento De Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB. 2021.

GUYER JP, PE, RA, FELLOW ASCE, FELLOW AEI. **Introduction to Sanitary Landfills**. Continuing Education and Development, Inc. 22 Stonewall Court Woodcliff Lake, NJ 07677. Course No: C02-018. 2009.

HARRIS JM, SHAFER AL, DEGROFF W, HATER GR, GABR M, BARLAZ MA. **Shear strength of degraded reconstituted municipal solid waste**. Geotechnical Testing Journal. V 29, n 2, p 14089, 2006.

HU J, KE H, ZHAN LT, CHEN ZY, LAN JW, POWERRIE W, CHEN YM. **Installation and performance of horizontal wells for dewatering at municipal solid waste landfills in China**. Waste Management, 103, 159-168. 2020.

HU J, WU XW, KE H, XU XB, LAN JW, ZHAN LT. **Application of electrical resistivity tomography to monitor the dewatering of vertical and horizontal wells in municipal solid waste landfills**. Eng. Geol. 254, 1–12. 2019.

HUBERT J, LIU XF, and COLLIN F. **Numerical modeling of the long-term behavior of Municipal Solid Waste in a bioreactor landfill**. Computers and Geotechnics, 72, 152-170. 2016.

HUMMER M, LECHNER P. **Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills**. Waste Management e Research, 17, 443-452, 1999.

ICLEI. **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

IGS BRASIL. **INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS**. Disponível em: <<https://igsbrasil.org.br/material-tecnico/>>. Acesso em: 13 de jul de 2022.

INGOLD TS. Friction Testing. In: ROLLING A, RIGO JM. **Geomembranes: identification and performance testing**. Cambridge: Chapman and Hall. p 141-159. 1991.

ISMAIL S, TAIB AM, RAHMAN NA, HASBOLLAH DZA, RAMLI AB. **Slope Stability of Landfill with Waste Degradation**. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). ISSN: 2278-3075, Volume 9. Issue 1, November 2019.

KAIMOTO, L.S.A. e CEPOLLINA, M. **Considerações sobre alguns condicionantes e critérios geotécnicos de projeto e executivos de aterros sanitários**. In.: SIMPÓSIO

INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 1, 1996, Porto Alegre. Anais, Porto Alegre:PUC-RS. p. 51-54.

KAVAZANJIAN E, MATASOVIC N, BONAPARTE R, SCHMERTMANN GR.
Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. Geoenvironment 2000. Vol 2. New Orleans, Louisiana FebRuary 24-26, 1995.

KUMAR G, REDDY K. **Constitutive Models for Municipal Solid Waste in Landfills.** Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges. 654-662. 2019.

LEME MAG. **Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2013.

LU X, XUE D, HUANG M, e LIM KW. **A shear hardening plasticity model with nonlinear shear strength criterion for municipal solid waste.** Computers and Geotechnics, 104, 207-215. 2018.

MACHADO SL, CARVALHO MF, and VILAR OM. **Constitutive model for municipal solid waste.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(11), 940-951. 2002.

MACIEL FJ. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2003.

MCDOUGALL J. **A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste.** Computers and Geotechnics, 34(4), 229-246. 2007

MEHDIZADEH MJ, SHARIATMADARI N, KARIMPOUR-FARD M. **Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2020.

MELO, DA. **Aterros de Resíduos: O Uso de Ferramentas de Avaliação como Apoio Decisório Para a Reabilitação Ambiental – Teoria e Prática.** Editora Appris. 1 ed. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Série Recursos Energéticos: Nota Técnica Dea 18/14. Inventário Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro, 2014.

NEGUSSEY, D. , WIJEWICKREME, W. K. D. , VAID,Y. P. **Geomembrane interface friction.** Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(1): 165-169. 1989. <https://doi.org/10.1139/t89-018>.

NORBERTO AS, CORRÊA CL, MARIANO MOH, JUCÁ JFT. **Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários.** Journal of Environmental Analysis and Progress. V. 05 N. 01x p. 108-116. 2020.

OLIVEIRA JC, PRIM ECC, CARVALHO JUNIOR AB. **Estudo da retenção de poluentes veiculados por lixiviados de aterros sanitários em solos argilosos.** In: Alternativas de

disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades. Trabalho Técnico. Florianópolis: PROSAB, 2002.

PANDEY RK, SHRIVASTAVA R, TIWARI RP. **Investigation of Shear Strength Properties of Municipal Solid Waste and Slope Stability Analysis**. International Journal for Research in Applied Science e Engineering Technology (IJRASET). Vol 5. Issue IX. Sept, 2017.

PIEIDADE JUNIOR CRC. **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2003.

PUC-RIO. **Análises Determinísticas de Estabilidade**. Certificação Digital N° 0321269/CA. 2023.

REBELO, KMW. **Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de ring shear**. Dissertação de mestrado. USP. São Carlos, 2003.

ReCESA. REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos Sólidos - Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários - Guia do profissional em treinamento. Nível 2**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.) – Belo Horizonte. 2008.

REDDY KR, HETTIARACHCHI H, PARAKALLA NS, GANGATHULASI J, BOGNER JE. **Geotechnical Properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA**. Waste Management 29, 952-959. 2009.

REICHERT, GA. **Manual Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**. 2007.

REIFFSTECK P, VIGNON JF. **Innovative, protective three dimensional geocomposite for bank protection: A case study**. Geosynthetics: Applications, Design and Construction; De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds); pp. 957-960. 1996.

REMÉDIO, FH. **Análise De Estabilidade De Taludes De Aterro De Resíduos Urbanos Utilizando Parâmetros Geotécnicos De Propostas Bibliográficas E Correlações Com Nspt**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2014.

SÁNCHEZ, NP. **Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais**. Teses de Doutorado. Universidade Federal de Brasília. UNB. 2018.

SCHULER, AR. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ. 2010.

SHARIATMADARI N, SADEGHPOUR AH, RAZAGHIAN F. **Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste**. International Journal of Civil Engineering. Geotechnique. 2014.

SILVEIRA, JFA. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

SLIDE 2.0 OVERVIEW. **Rocscience**, 2021. Disponível em: <<https://www.roscience.com/help/slide2/documentation>>. Acesso em: 19 de fev de 2023.

SHU S, LI Y, SUN Z, SHI J. **Effect of gas pressure on municipal solid waste landfill slope stability**. Waste Management e Research. 2021.

SILVA AKM, MOTA FSB. **Caracterização dos resíduos sólidos urbanos: aproveitamento do biogás**. 1. ed. - Curitiba: Appris, 2019.

STARK TD, EID HT, DOUGLAS EVANS W, SHERRY PE. **Municipal Solid Waste Slope Failure. Ii: Stability Analyses**. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. Juni, 2000.

STARK TD, HUVAJ-SARIHAN N, LI G. **Shear strength of municipal solid waste for stability analyses**. Environ Geol (2009) 57:1911–1923.

TELLES, ACM. **Análise De Estabilidade De Um Talude Rompido Na Rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ**. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

TOWNSEND TG, KADAMBALA R, KUMAR S, JAIN P. **In-Situ Measurements of Pore Water Pressures in Landfilled Waste in Response to Liquids Addition**. GEOCONGRESS: GEOTECHNICS OF WASTE MANAGEMENT AND REMEDIATION. 2008.

VERTEMATTI JC. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2 ed. Editora Blucher. São Paulo. 2015.

YANG R, XU Z, CHAI J, QIN Y, LI Y. **Permeability test and slope stability analysis of municipal solid waste (MSW) in Jiangcungou Landfill, Shaanxi, China**. Journal of the Air and Waste Management Association. 17 Sep 2015.

YOUSEFI M, SHARIATMADARI N, NOORZAD A, MOHAMMADI A, MAHMOODI M. **A comparison between constitutive models for the municipal solid waste**. Waste Management e Research. 10 Aug 2021.

ZHAN TLT, CHEN YM, LING WA. **Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China**. Engineering Geology 97, 97-111. 2008.

ZHANG W, LIN W, CHEN Y. **Pore pressure monitoring and slope stability analysis of a waste landfill**. Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Volume 29, Issue SUPPL. 2, Pages 3628 - 3632. September, 2010.

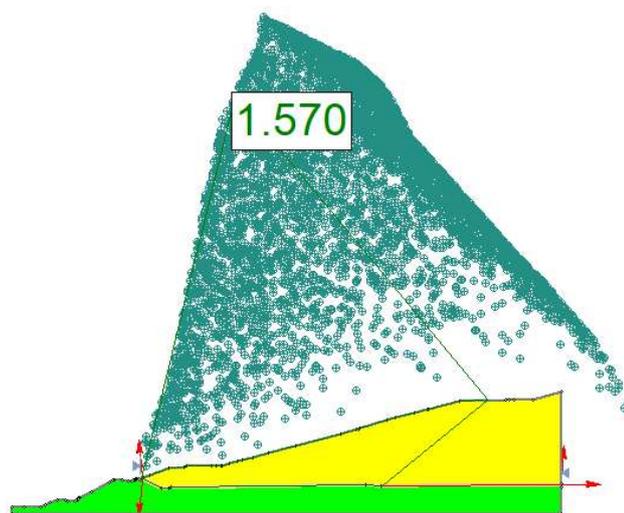
ZHAO YR, XIE Q, WANG GL, ZHANG YJ, ZHANG YX, SU W. **A study of shear strength properties of municipal solid waste in Chongqing landfill, China**. Environ Sci Pollut Res. Springer. 2014.

ZHANG Z, WANG Y, FANG Y, PAN X, ZHANG J, XU H. **Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills.** Waste Management e Research. 2020.

ZUQUETTE, L. V. **GEOTECNIA AMBIENTAL.** RIO DE JANEIRO: ELSEVIER, 2015.

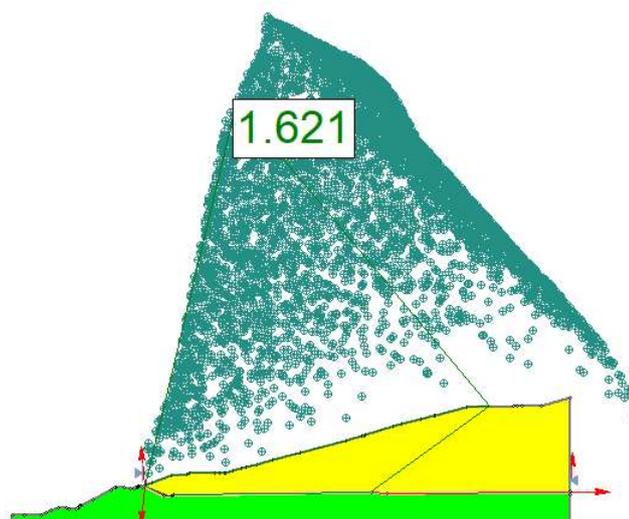
APÊNDICE A – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para parâmetro geotécnico de Suzuki (2012).

Figura A66 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



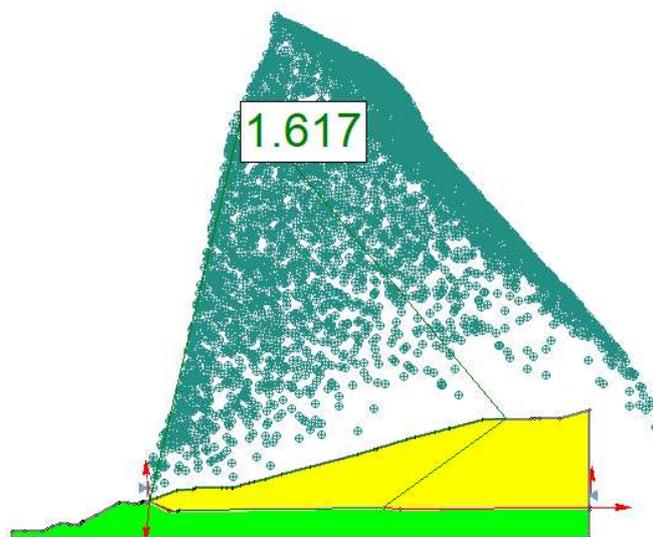
Fonte: Autora (2023).

Figura A67 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



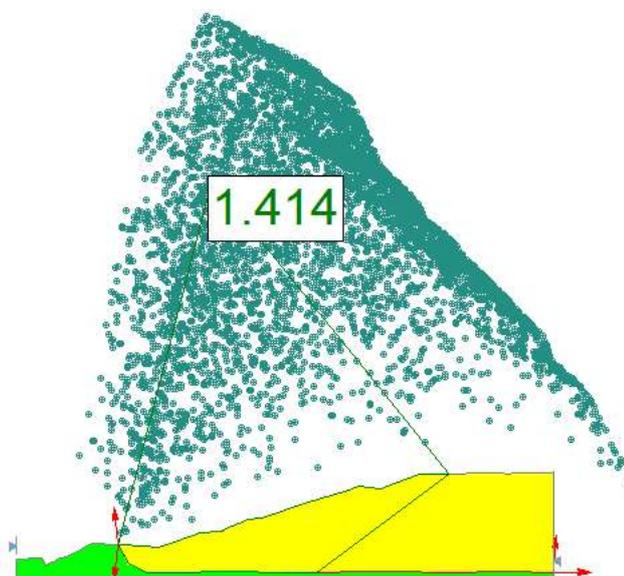
Fonte: Autora (2023).

Figura A68 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern - Price.



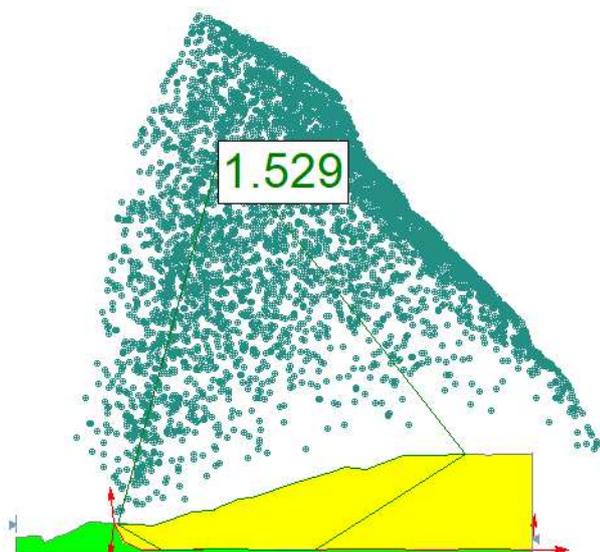
Fonte: Autora (2023).

Figura A69 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



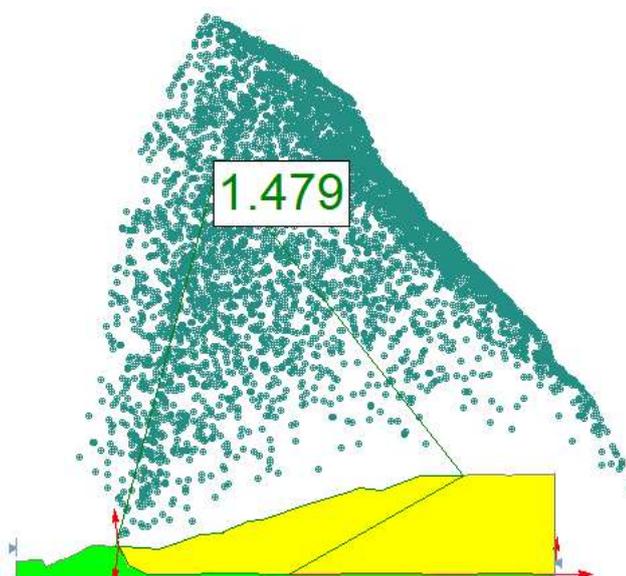
Fonte: Autora (2023).

Figura A70 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



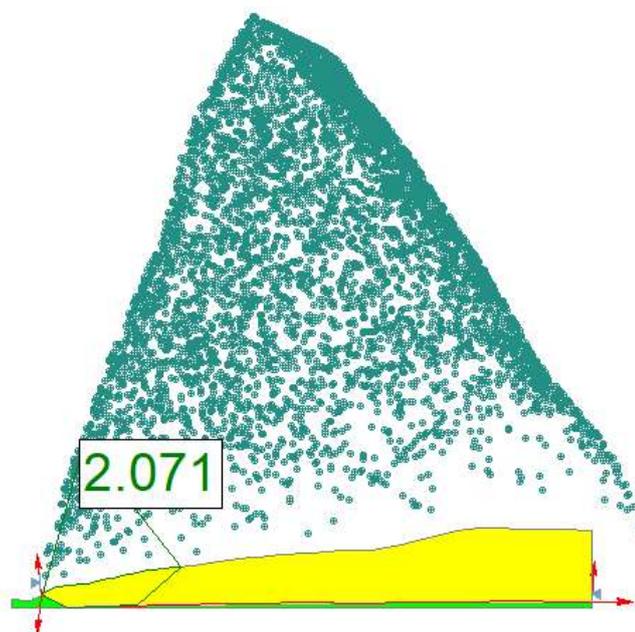
Fonte: Autora (2023).

Figura A71 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



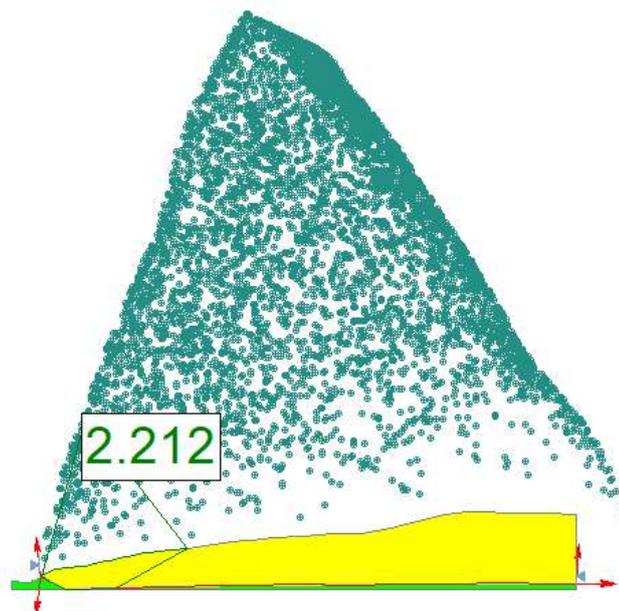
Fonte: Autora (2023).

Figura A72 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



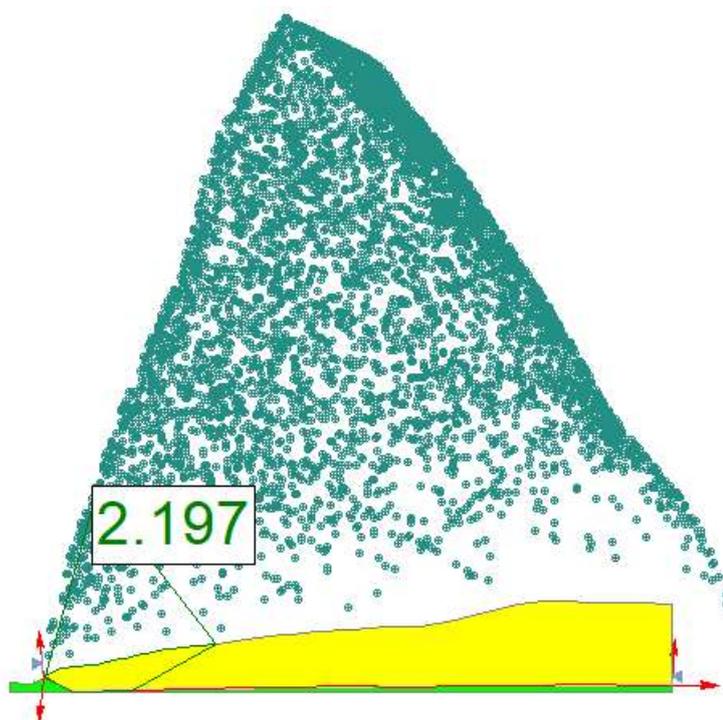
Fonte: Autora (2023).

Figura A73 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spemcer.



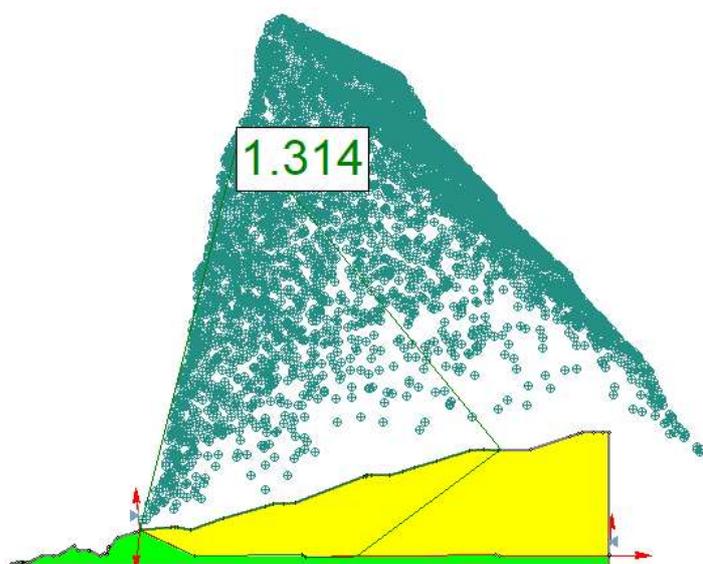
Fonte: Autora (2023).

Figura A74 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



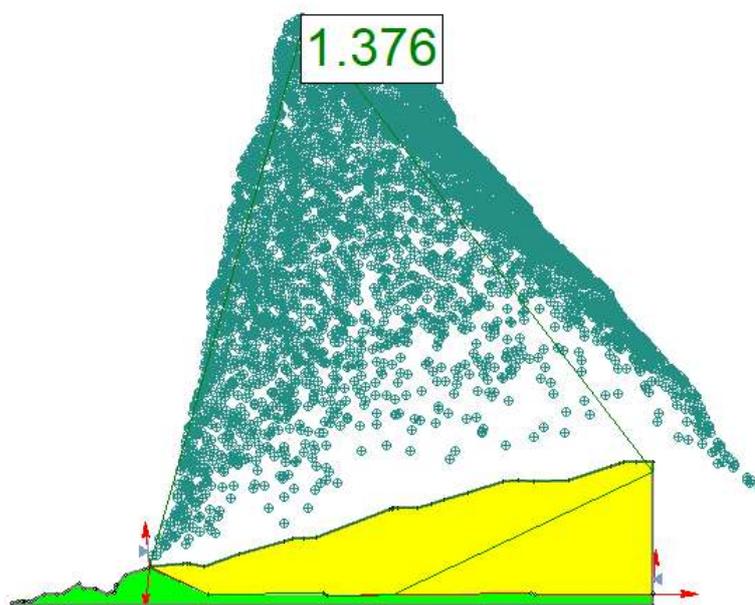
Fonte: Autora (2023).

Figura A75 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



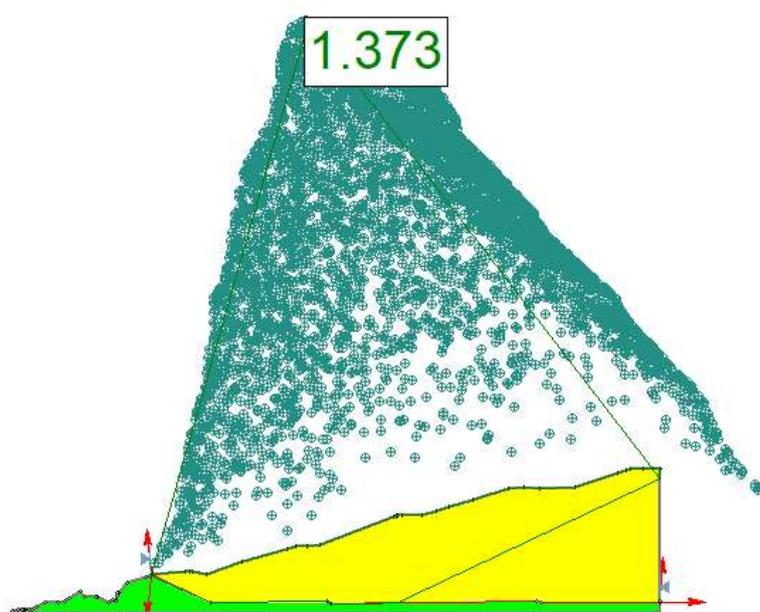
Fonte: Autora (2023).

Figura A76 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

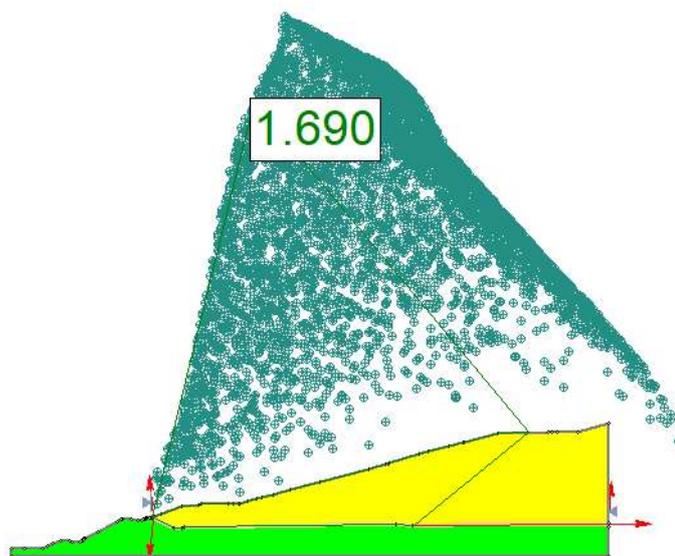
Figura A77 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

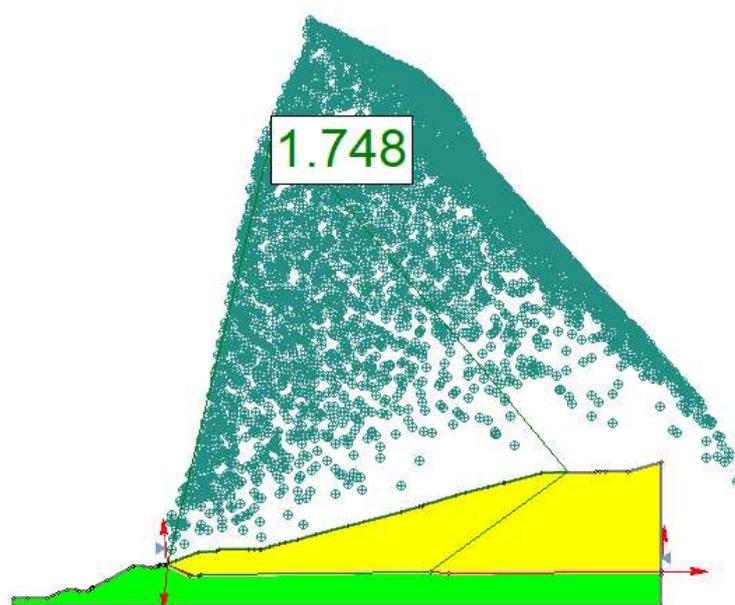
APÊNDICE B – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para Fan *et al.*(2016).

Figura B78 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan *et al.* (2016) e Método Bishop Simplificado.



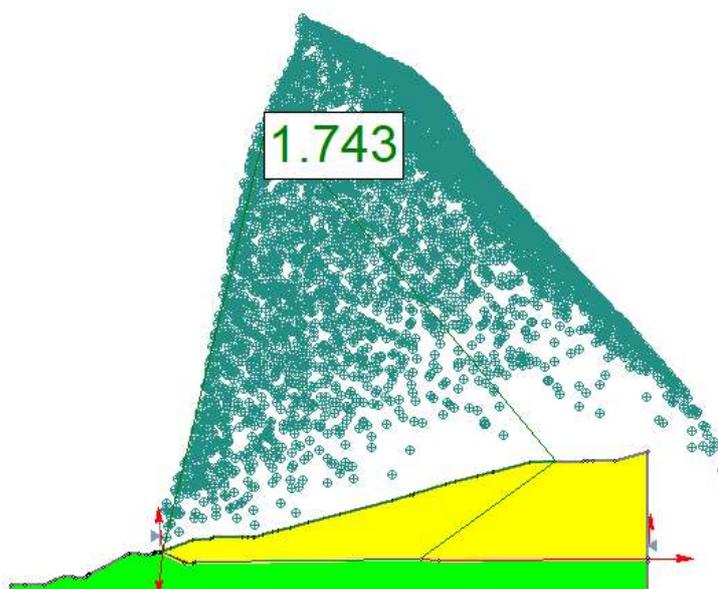
Fonte: Autora (2023).

Figura B79 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan *et al.* (2016) e Método Spencer.



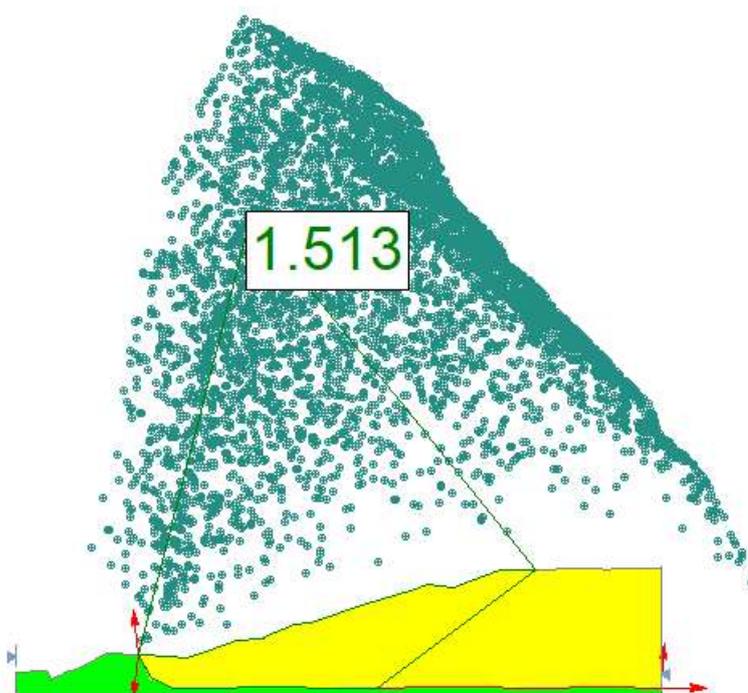
Fonte: Autora (2023).

Figura B80 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



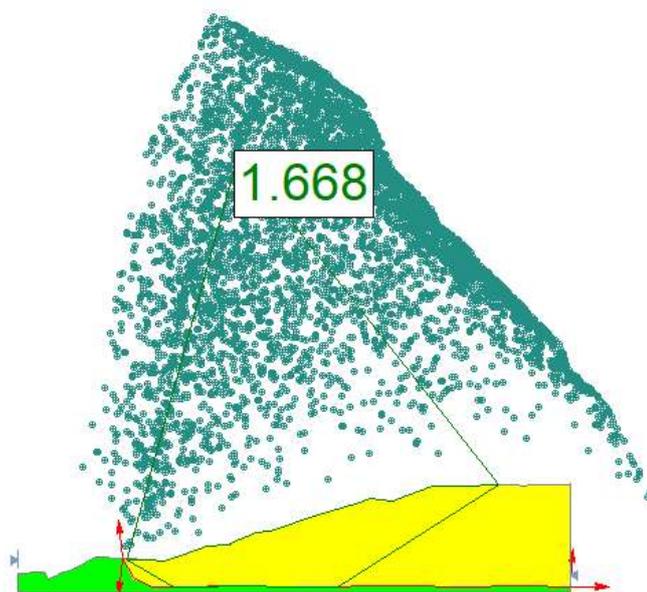
Fonte: Autora (2023).

Figura B81 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



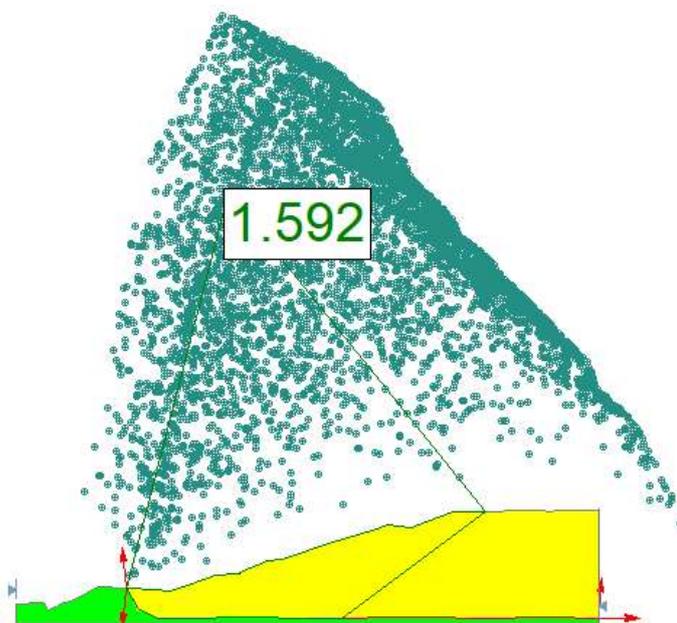
Fonte: Autora (2023).

Figura B82 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



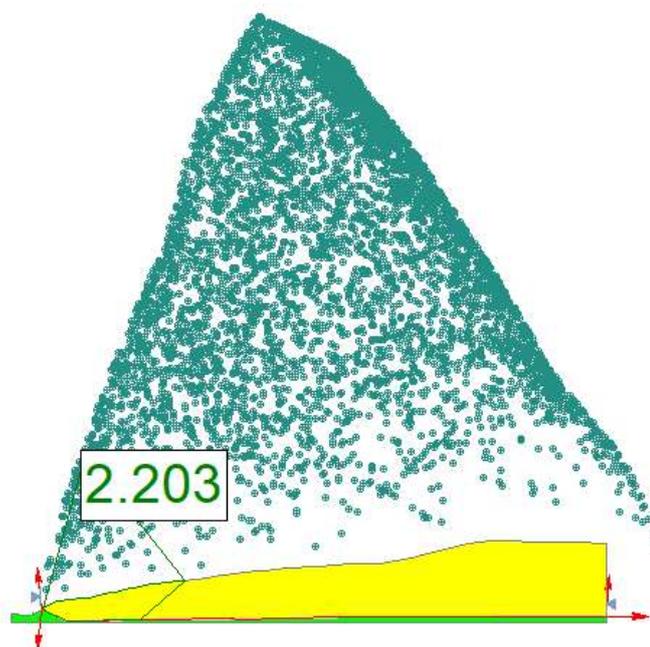
Fonte: Autora (2023).

Figura D83 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



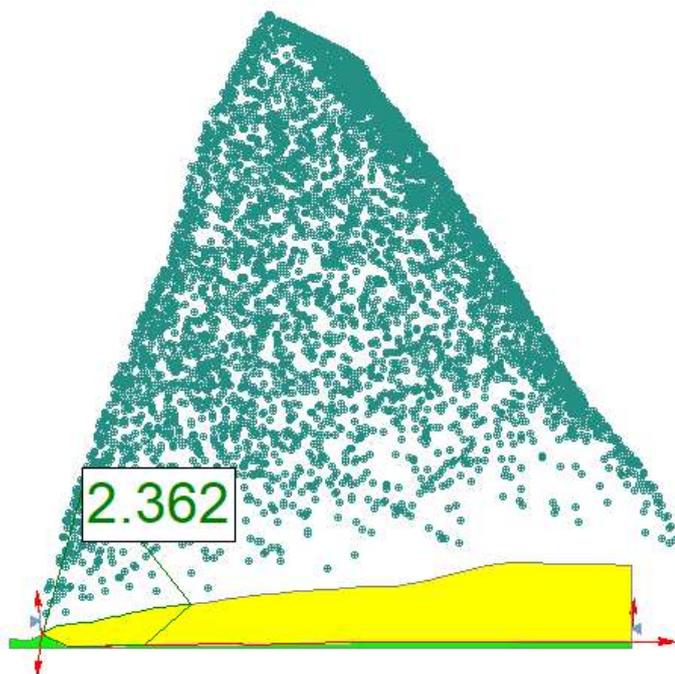
Fonte: Autora (2023).

Figura B84 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



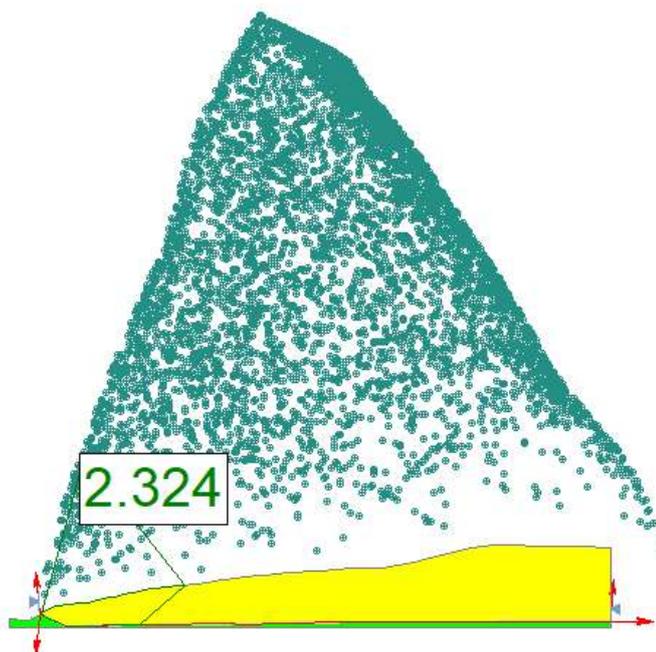
Fonte: Autora (2023).

Figura B85 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



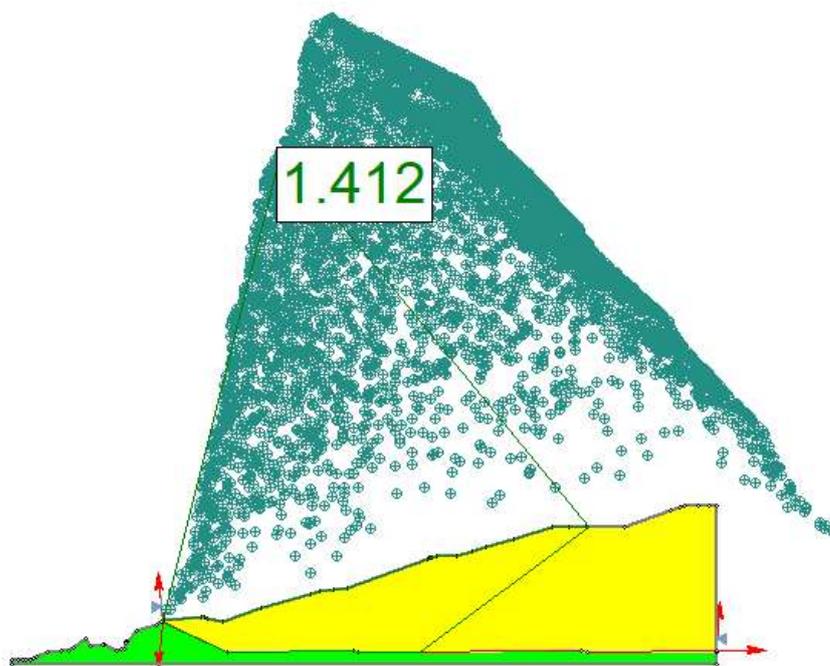
Fonte: Autora (2023).

Figura B86 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



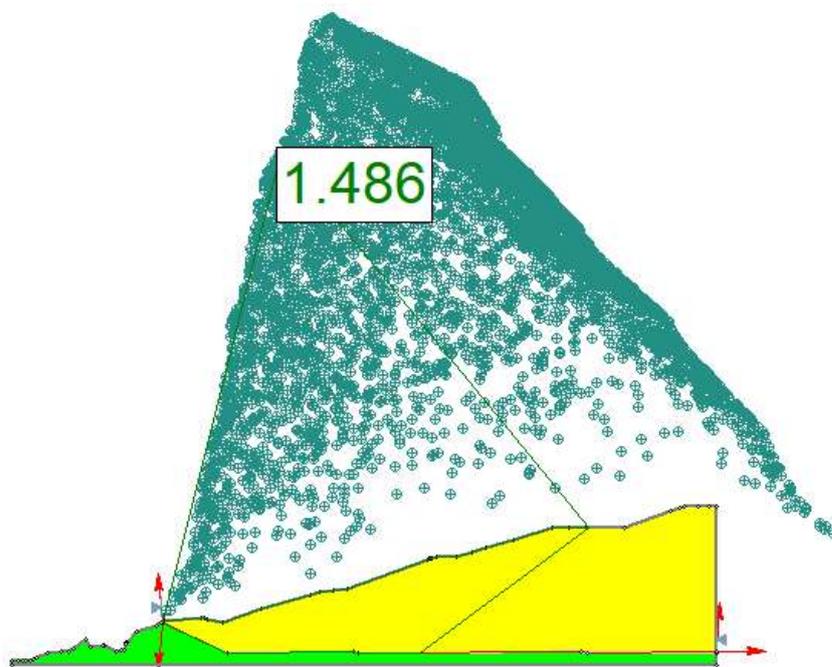
Fonte: Autora (2023).

Figura B87 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



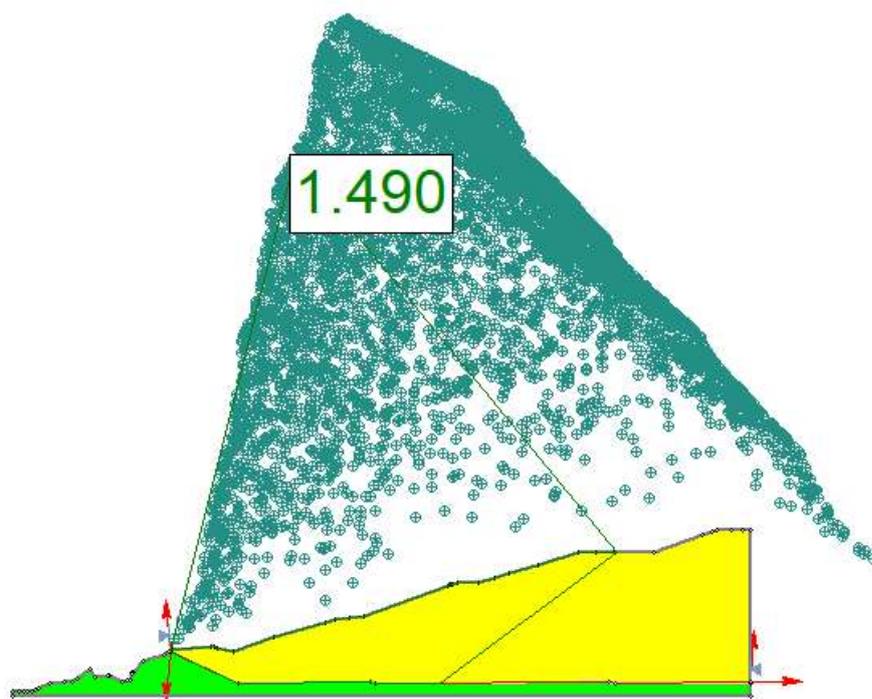
Fonte: Autora (2023).

Figura B88 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

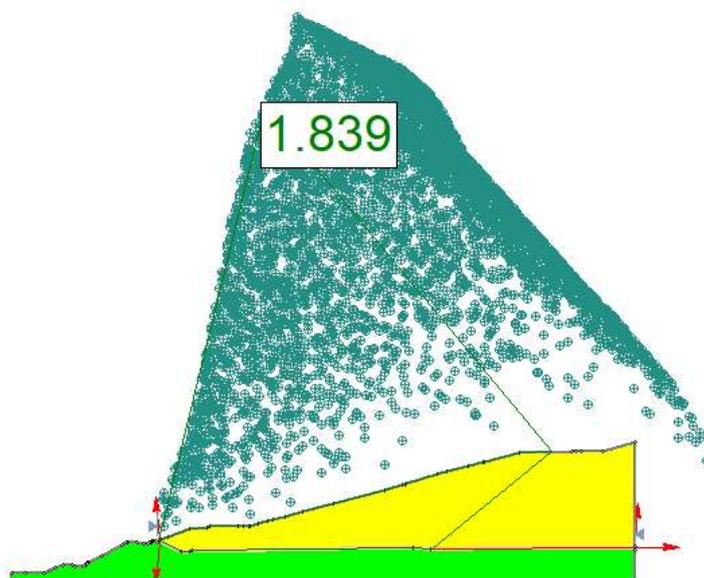
Figura B89 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

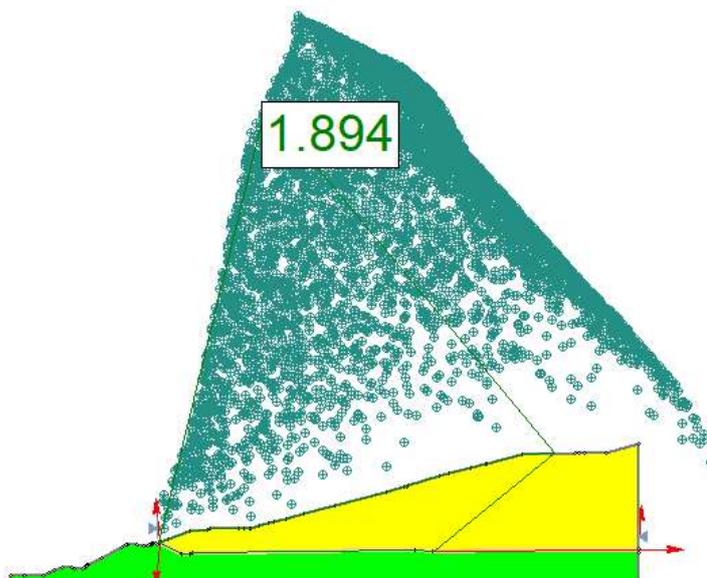
APÊNDICE C – Figuras que demonstram a simulação com o parâmetro de poropressão (ru) para BSE (2023).

Figura C90 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



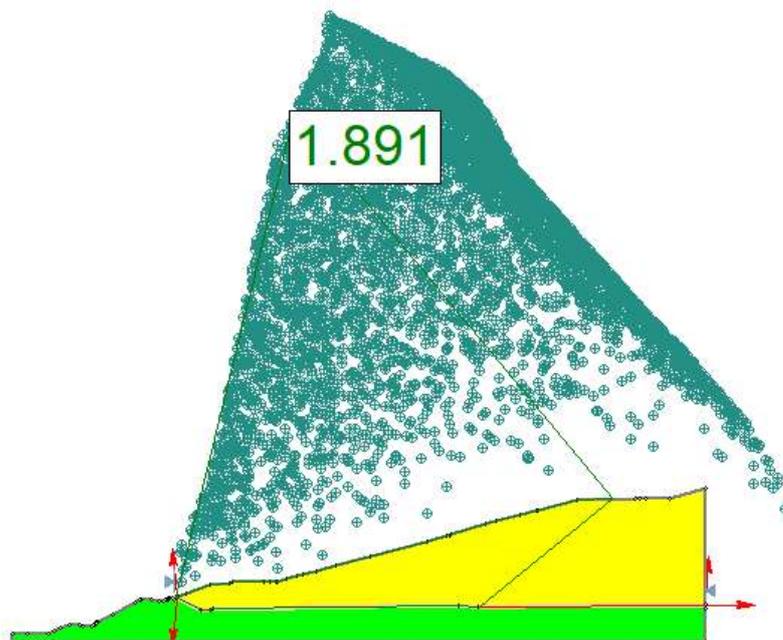
Fonte: Autora (2023).

Figura C91 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



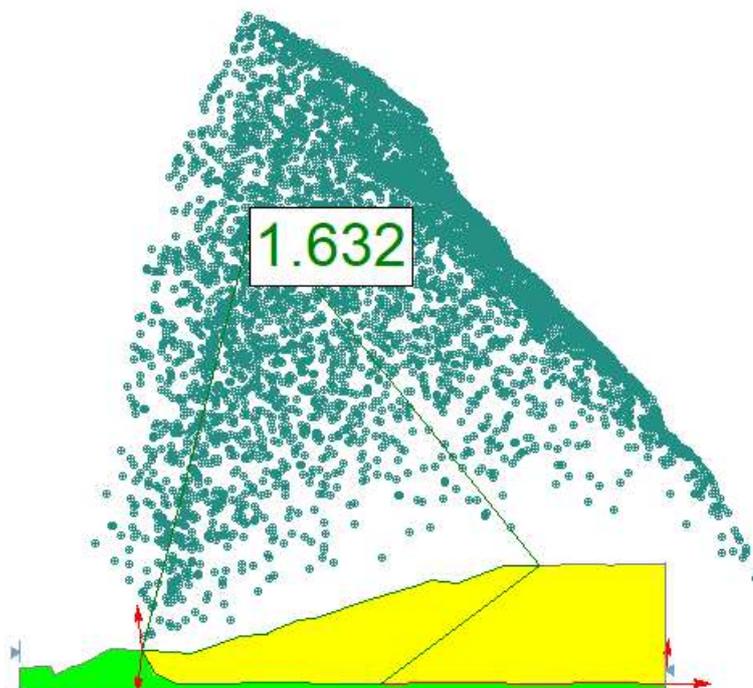
Fonte: Autora (2023).

Figura C92 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



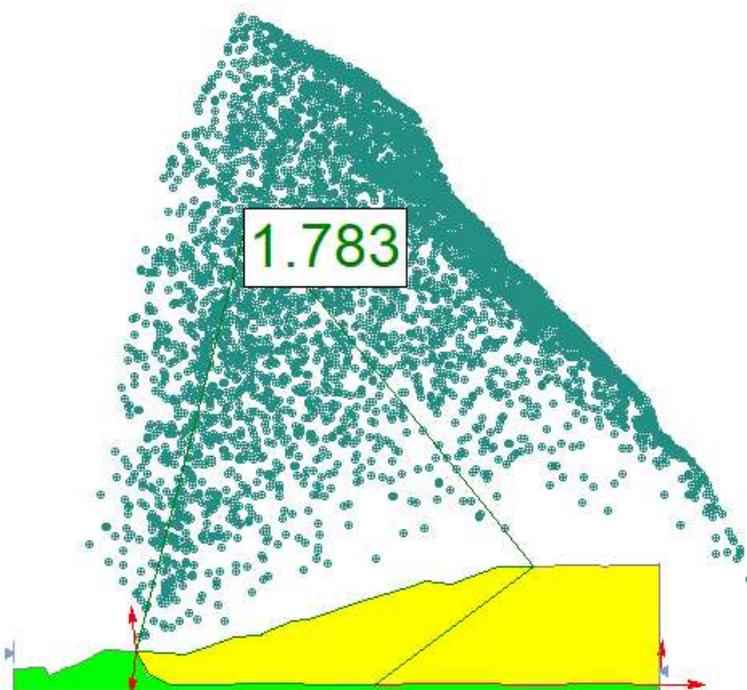
Fonte: Autora (2023).

Figura C93 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



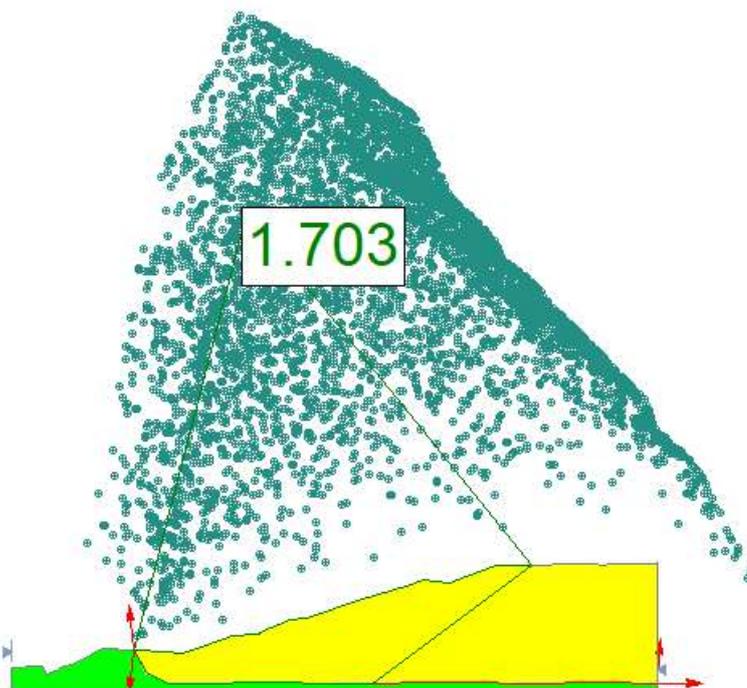
Fonte: Autora (2023).

Figura C94 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



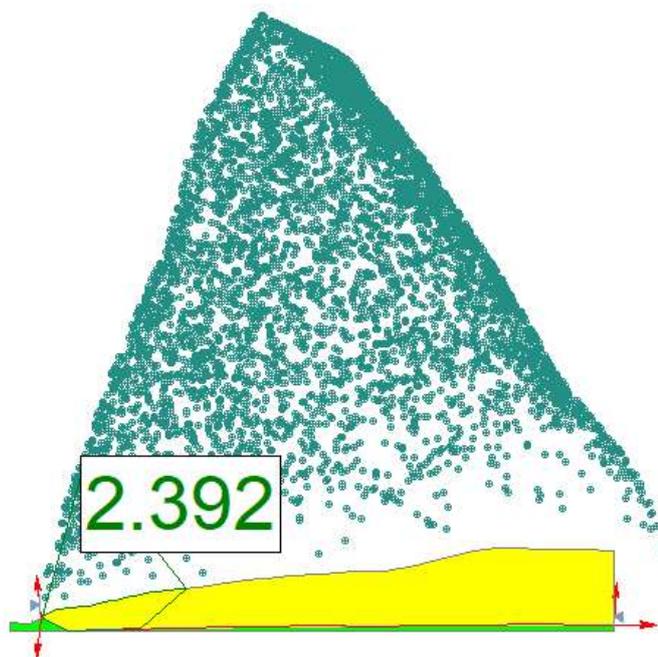
Fonte: Autora (2023).

Figura C95 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



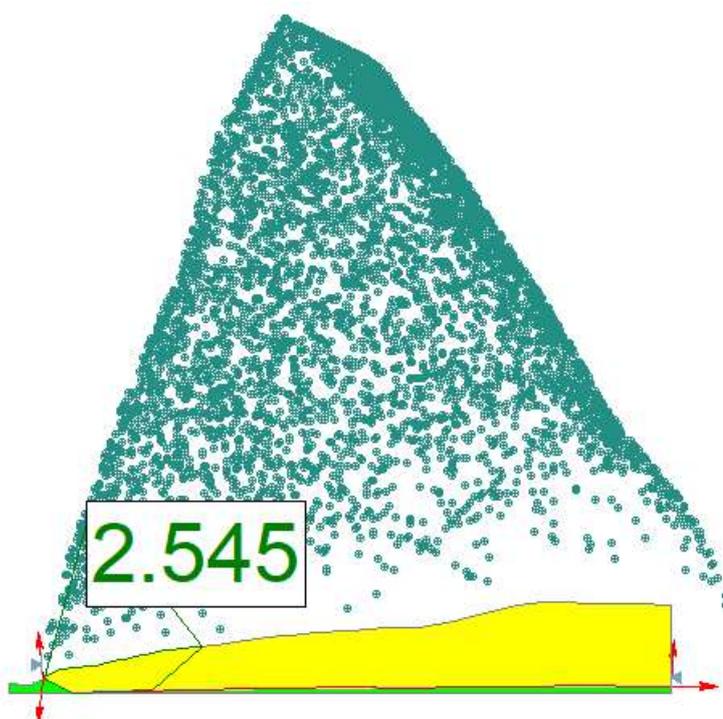
Fonte: Autora (2023).

Figura C96 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



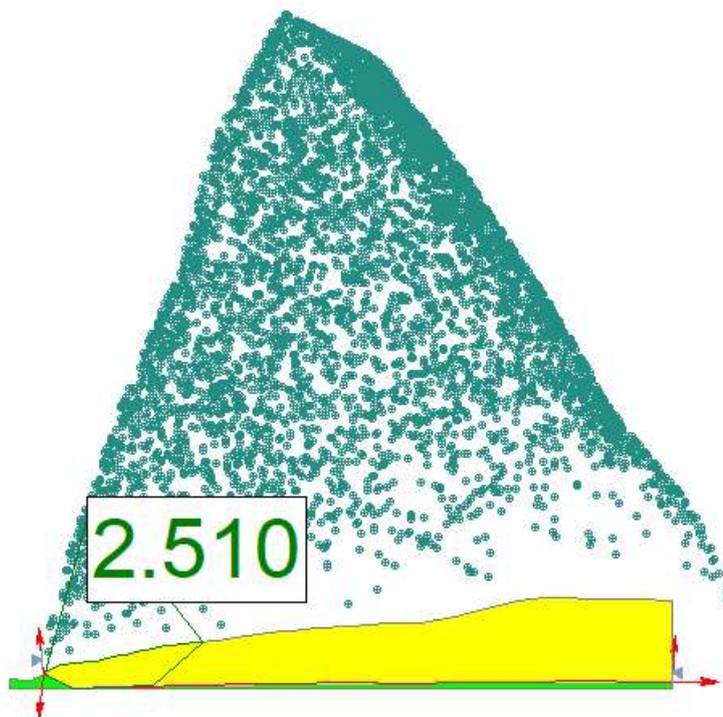
Fonte: Autora (2023).

Figura C97 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



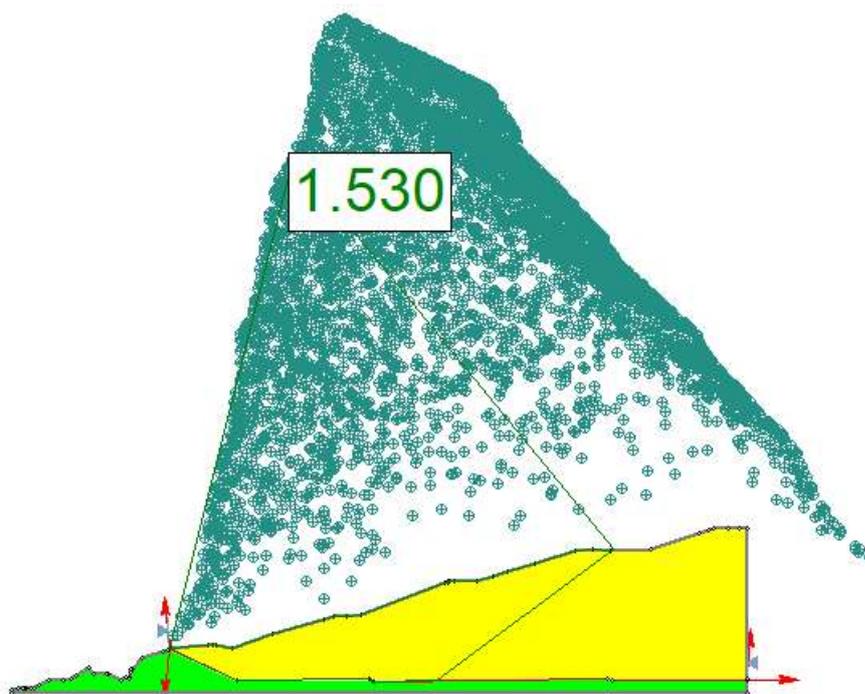
Fonte: Autora (2023).

Figura C98 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



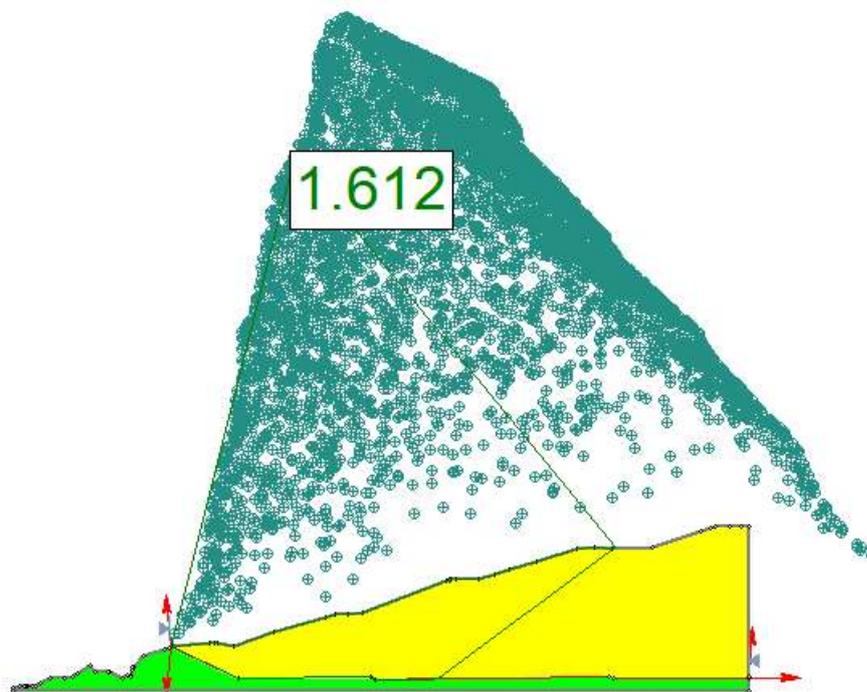
Fonte: Autora (2023).

Figura C99 - Simulação com parâmetro de poropressão (r_u), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



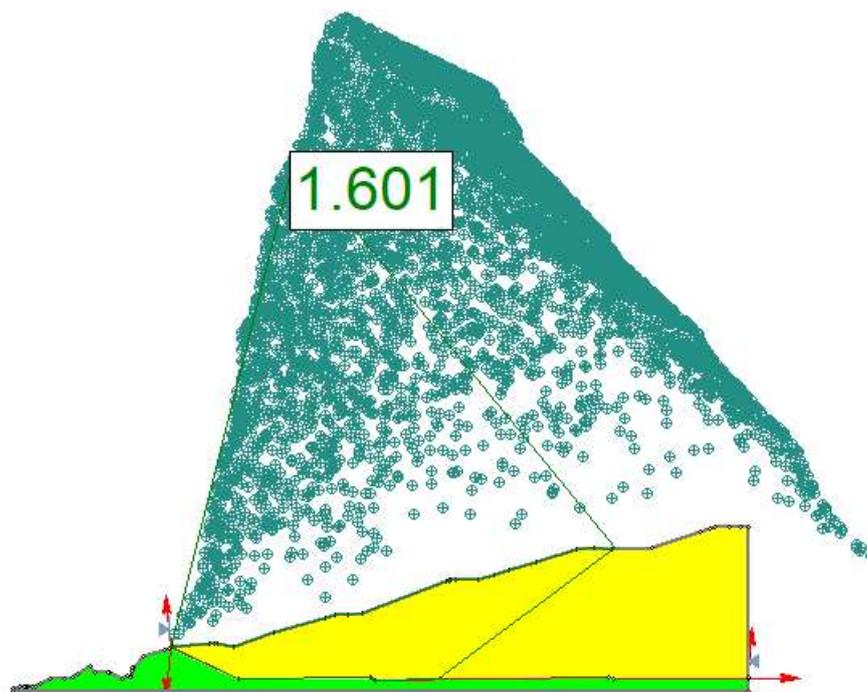
Fonte: Autora (2023).

Figura C100 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

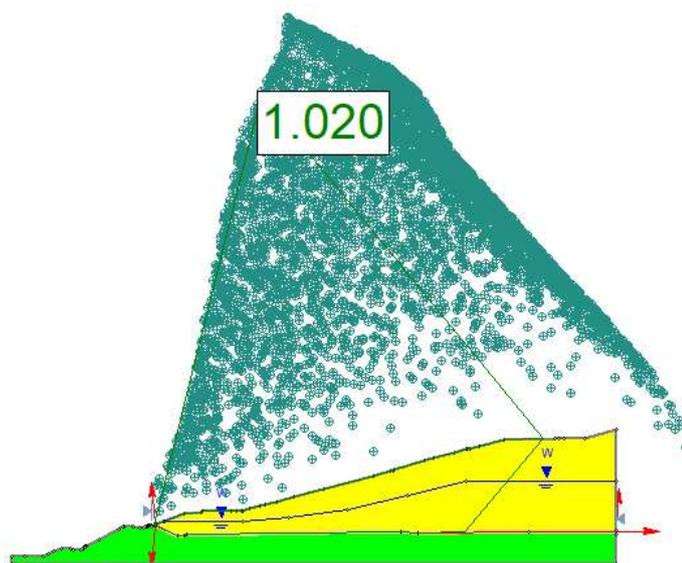
Figura C101 - Simulação com parâmetro de poropressão (ru), Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

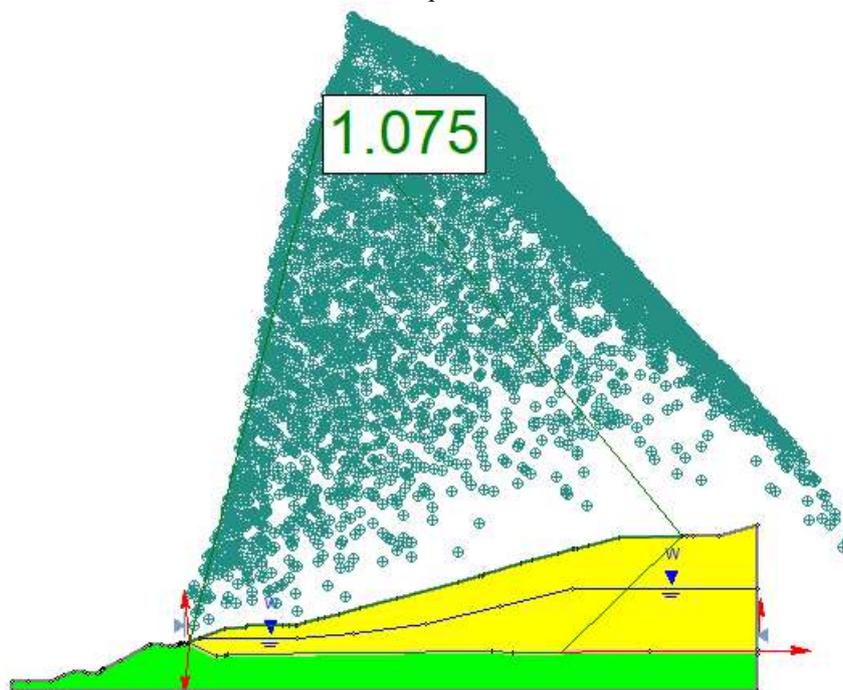
APÊNDICE D – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para Suzuki (2012).

Figura D102 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



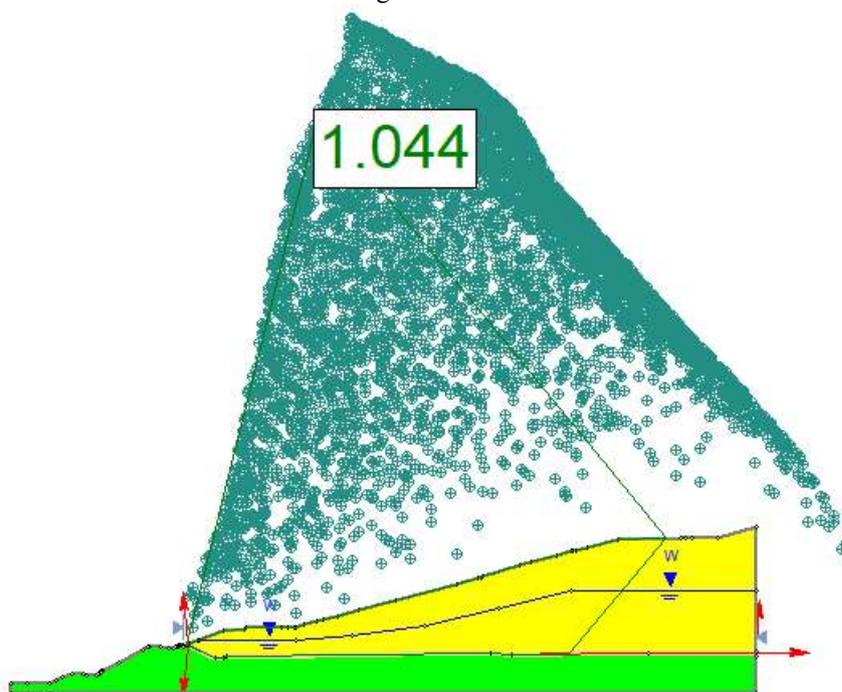
Fonte: Autora (2023).

Figura D103 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



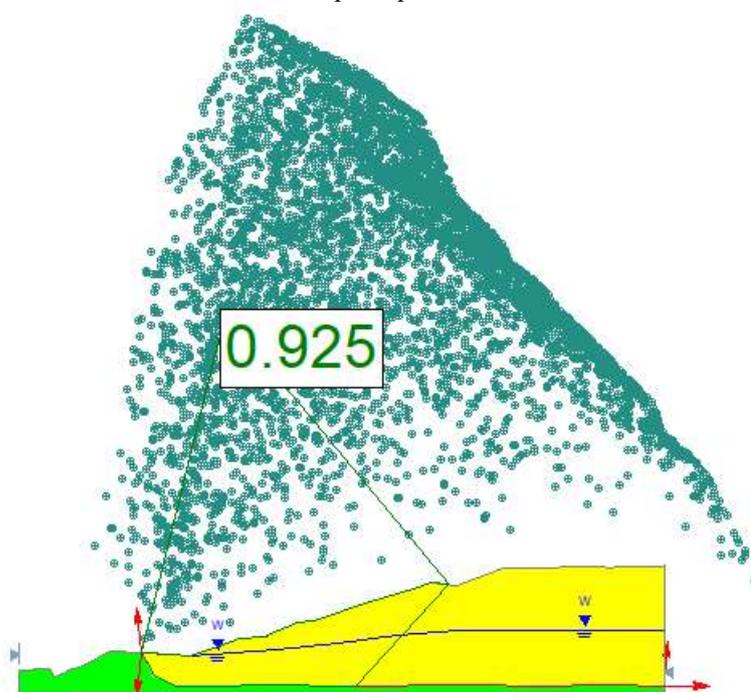
Fonte: Autora (2023).

Figura D104 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



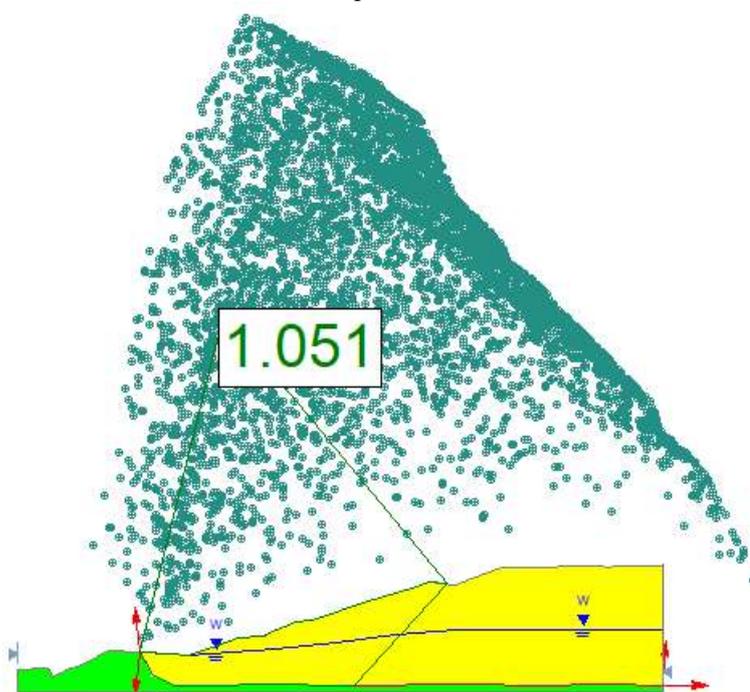
Fonte: Autora (2023).

Figura D105 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



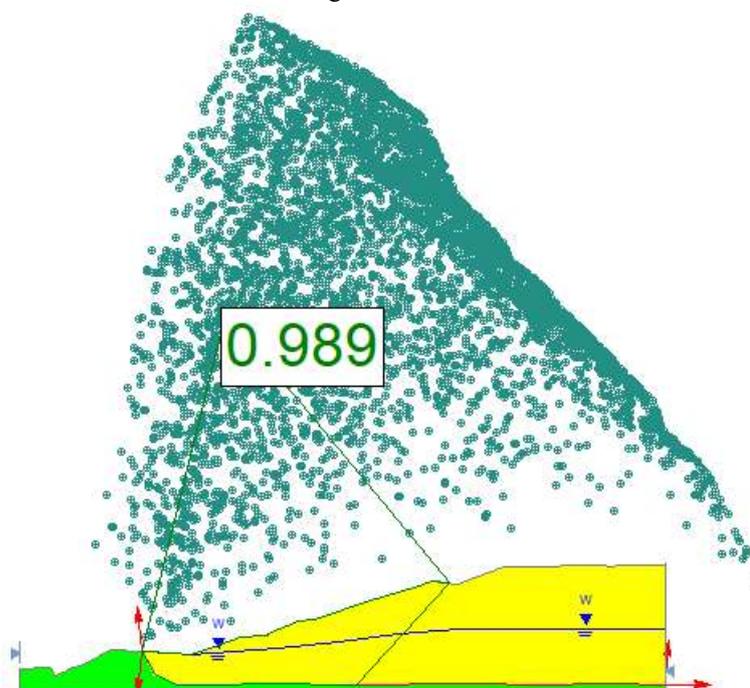
Fonte: Autora (2023).

Figura D106 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



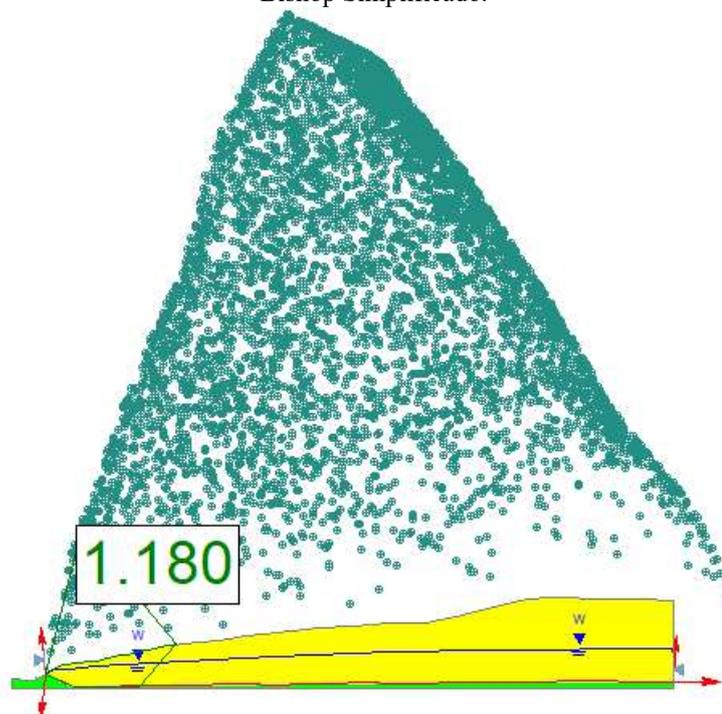
Fonte: Autora (2023).

Figura D107 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



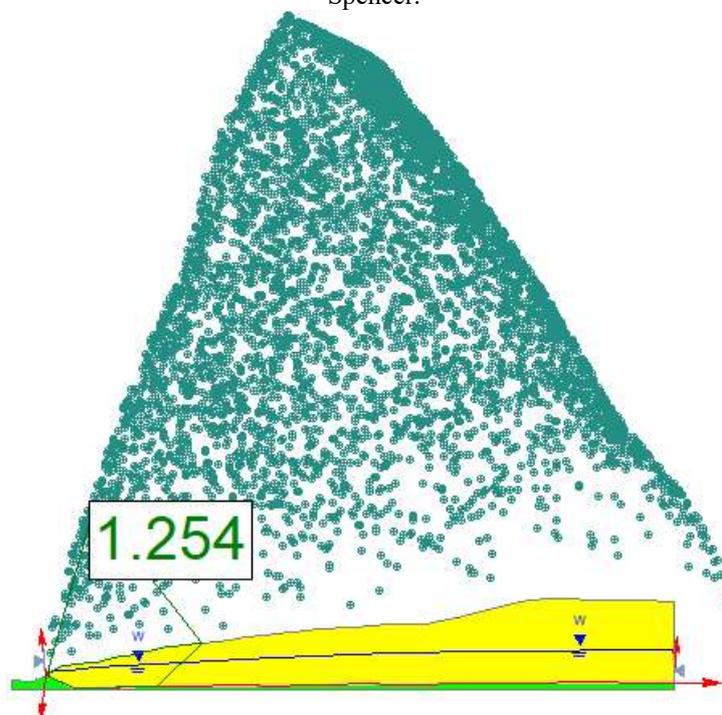
Fonte: Autora (2023).

Figura D108 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



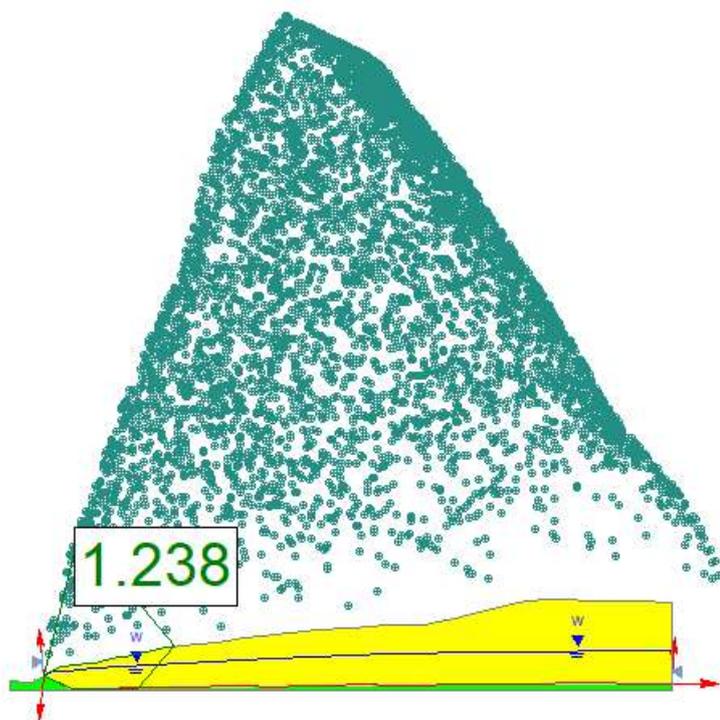
Fonte: Autora (2023).

Figura D109 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



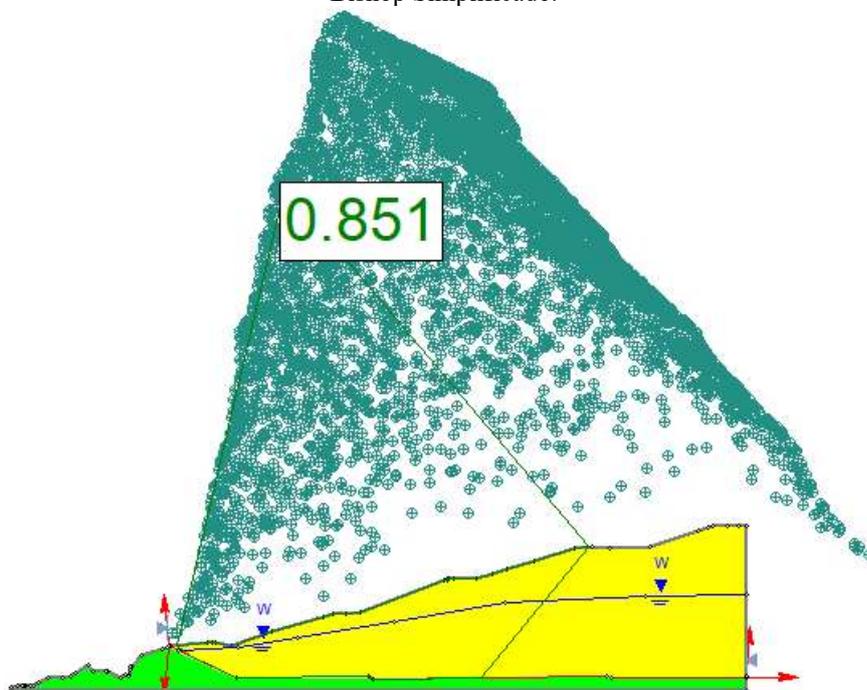
Fonte: Autora (2023).

Figura D110 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



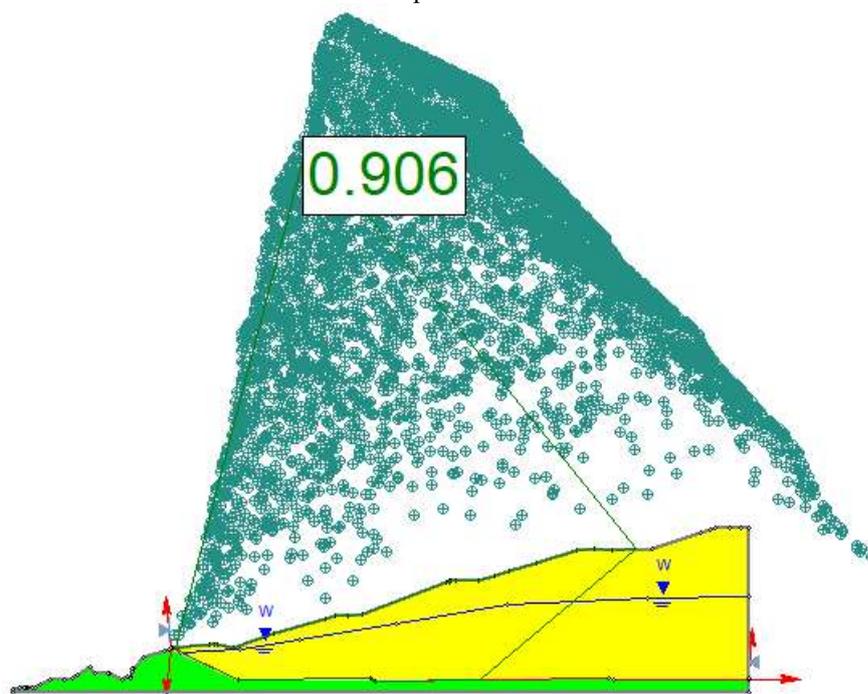
Fonte: Autora (2023).

Figura D111 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Bishop Simplificado.



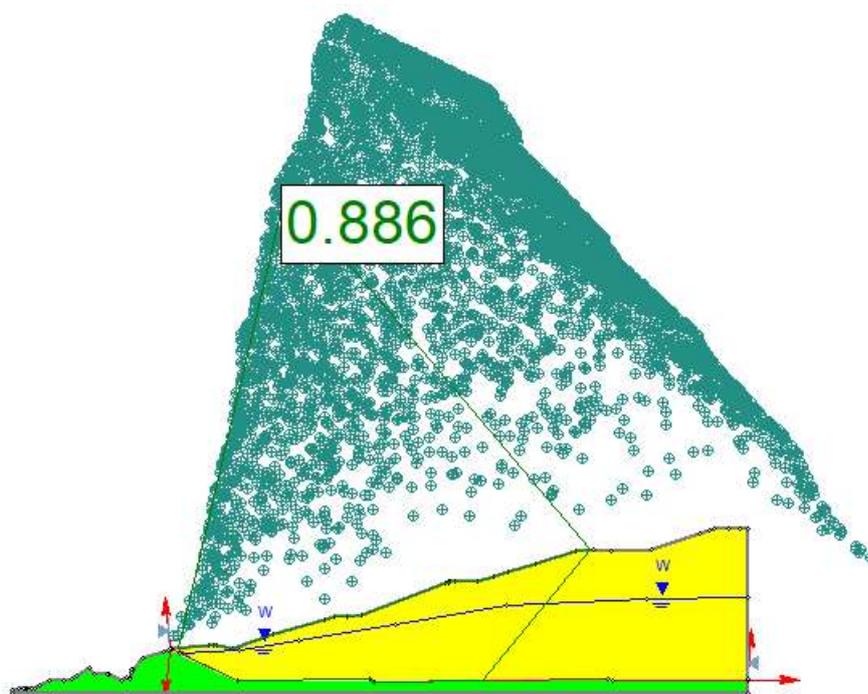
Fonte: Autora (2023).

Figura D112 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

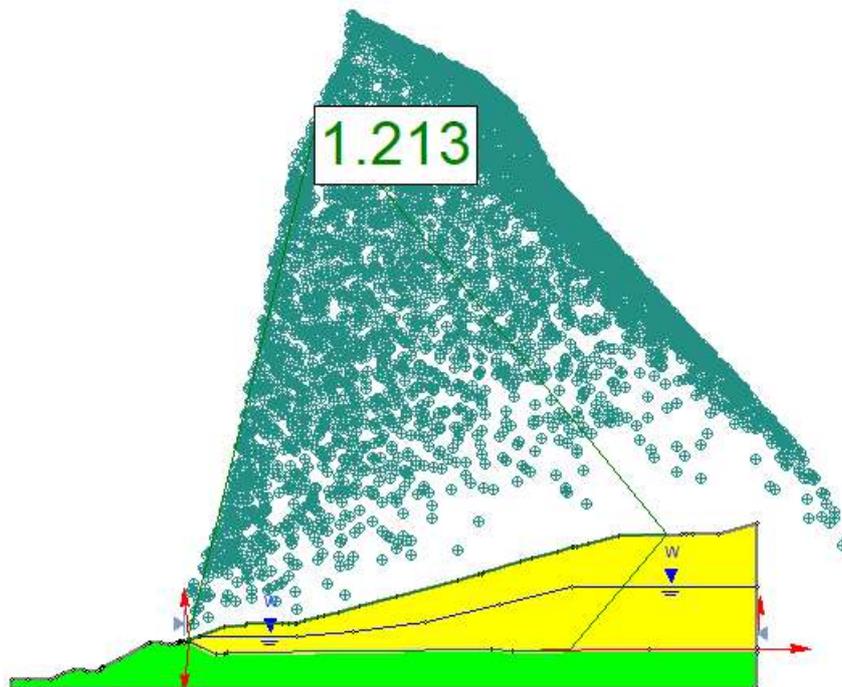
Figura D113 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Suzuki (2012) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

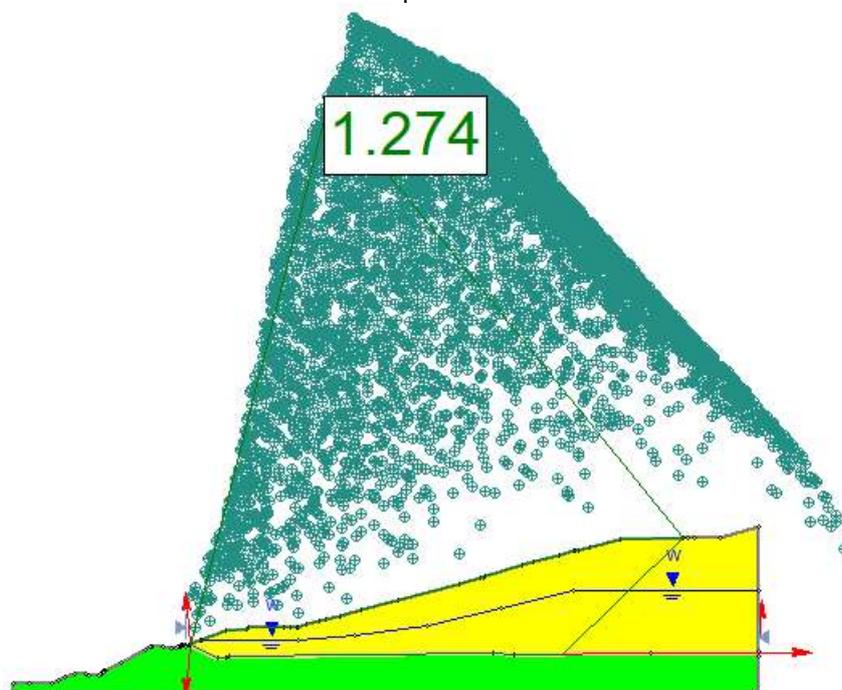
APÊNDICE E – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para Fan *et al.* (2016).

Figura E114 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



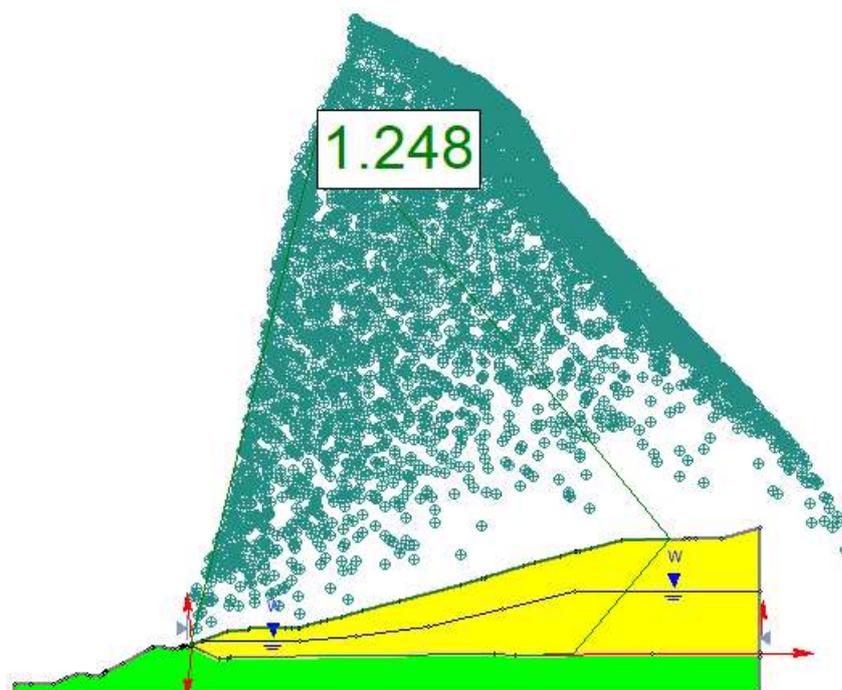
Fonte: Autora (2023).

Figura E115 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



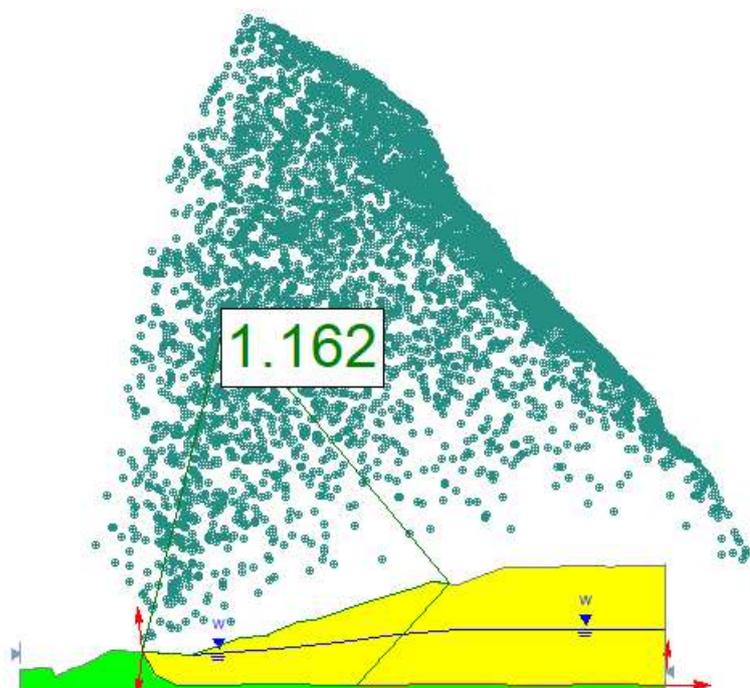
Fonte: Autora (2023).

Figura E116 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



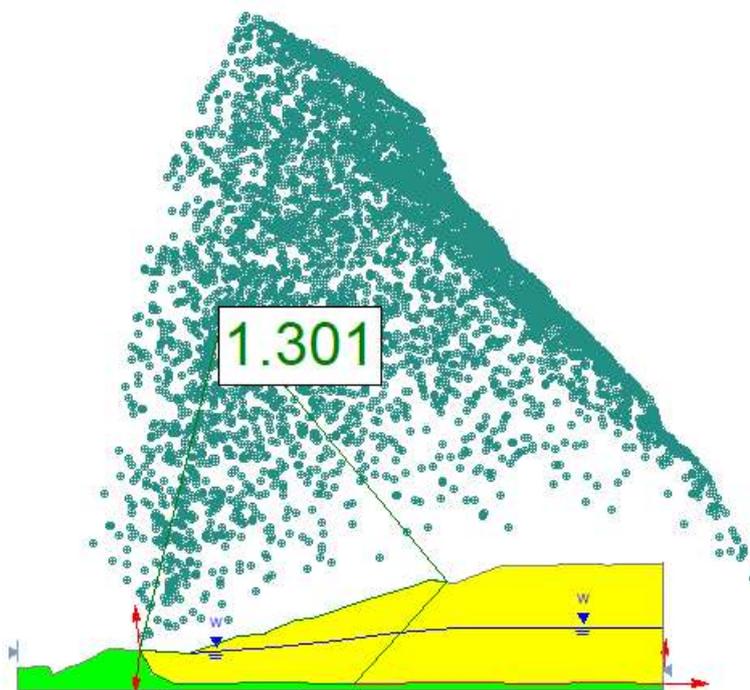
Fonte: Autora (2023).

Figura E117 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



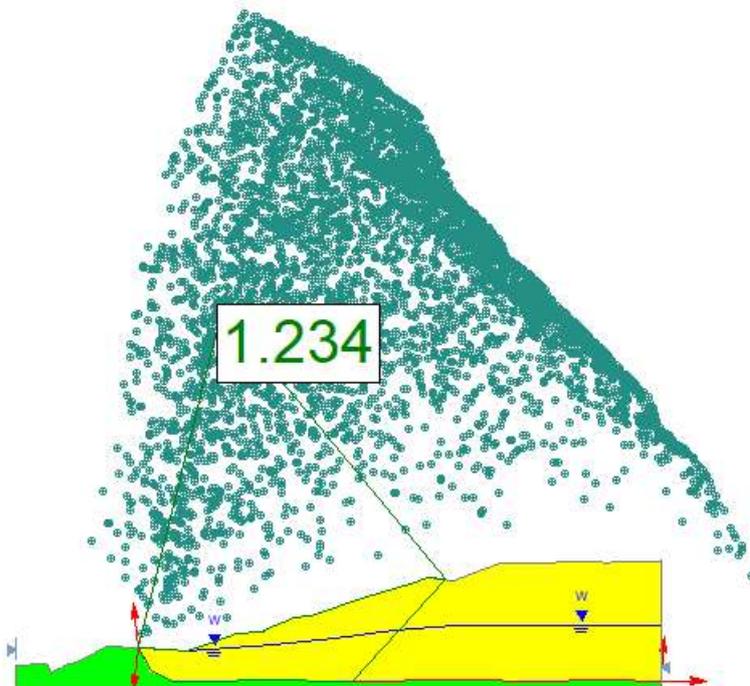
Fonte: Autora (2023).

Figura E118 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



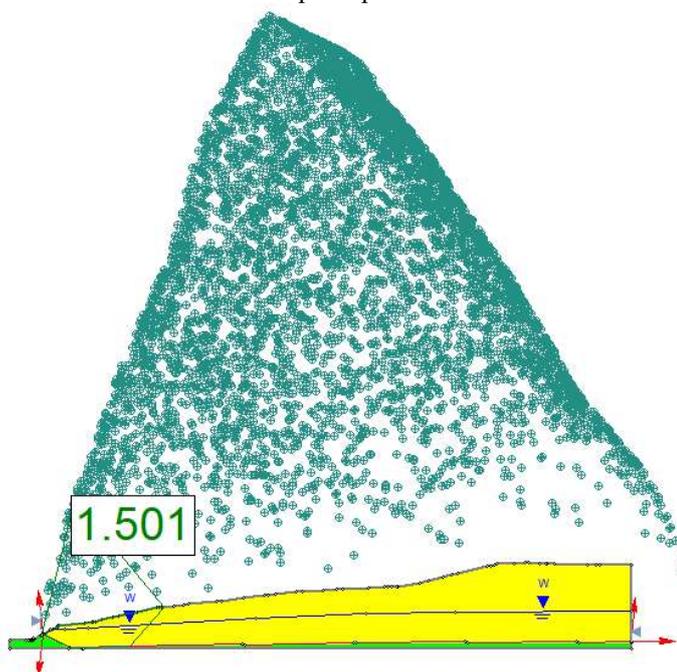
Fonte: Autora (2023).

Figura E119 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



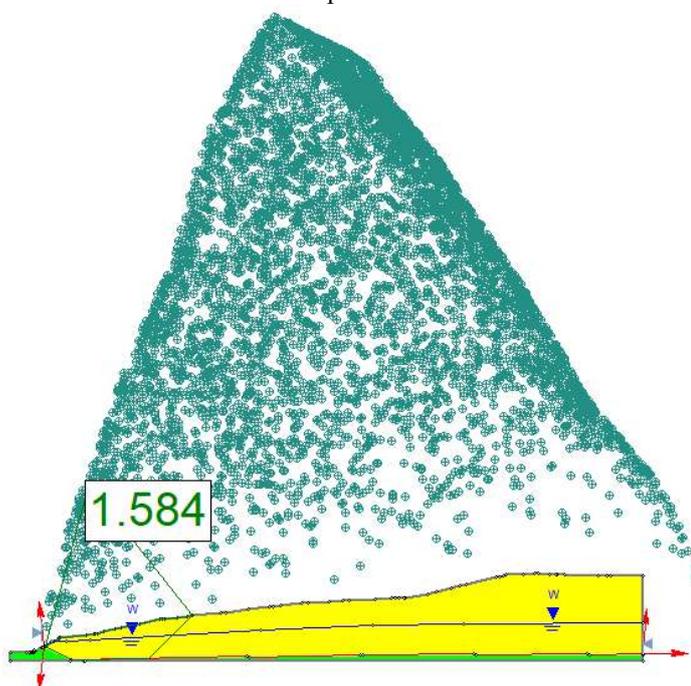
Fonte: Autora (2023).

Figura E120 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



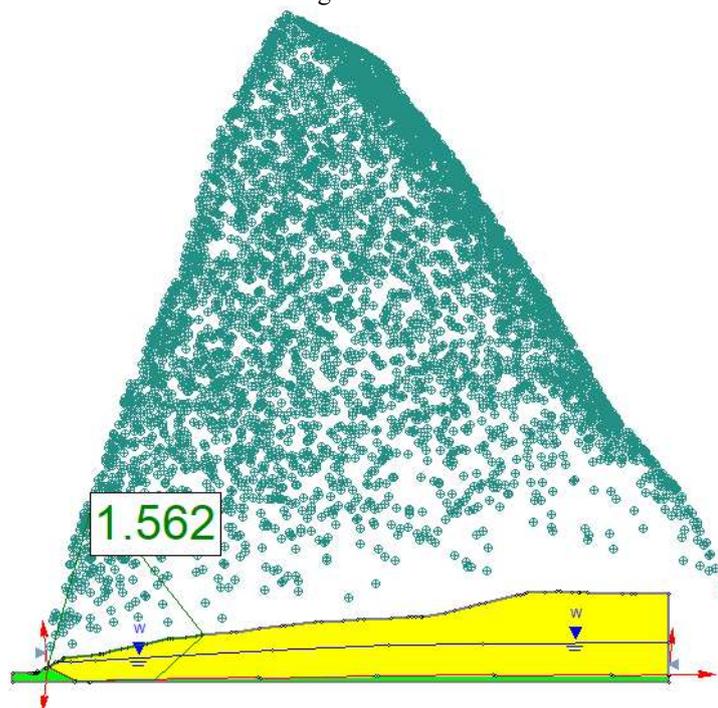
Fonte: Autora (2023).

Figura E121 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



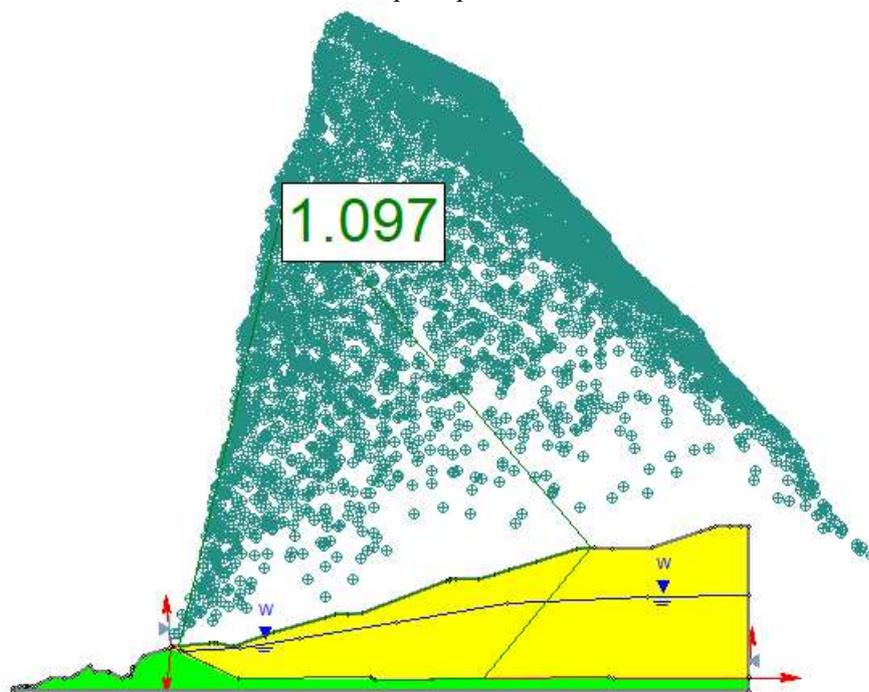
Fonte: Autora (2023).

Figura E122 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



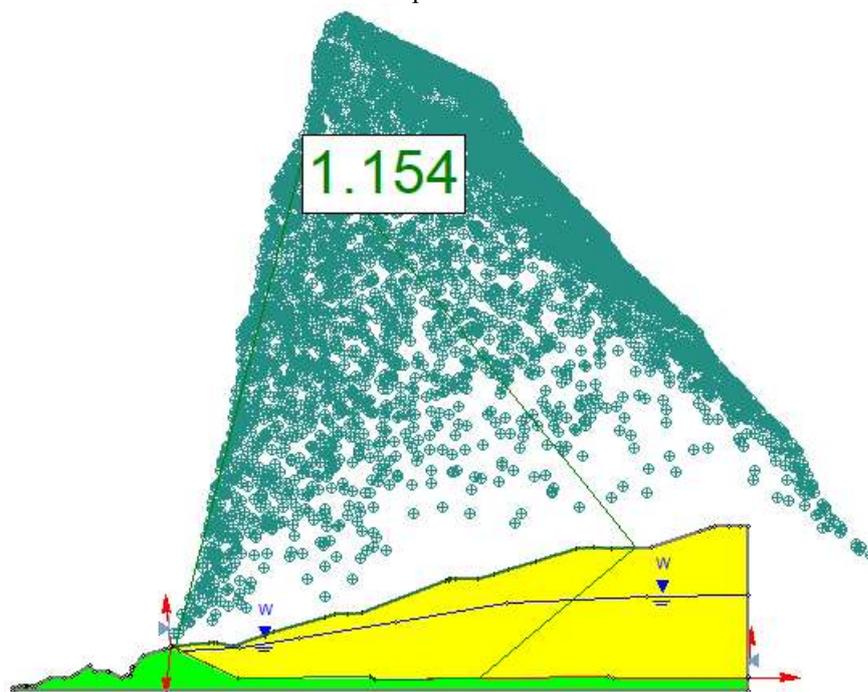
Fonte: Autora (2023).

Figura E123 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Bishop Simplificado.



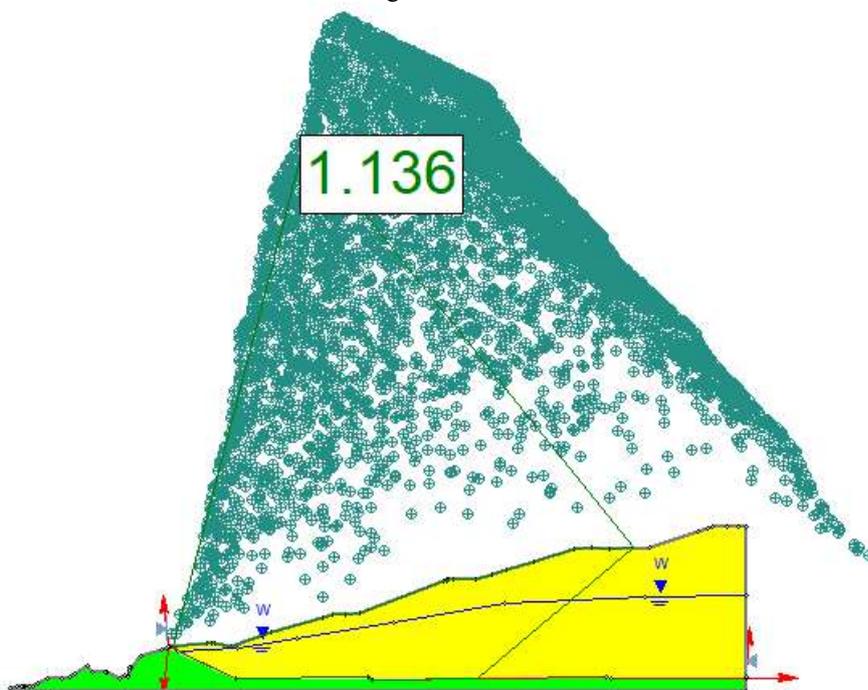
Fonte: Autora (2023).

Figura E124 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

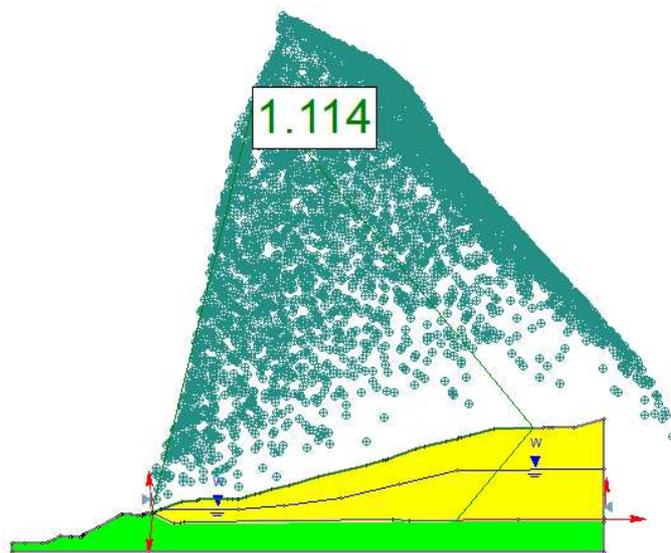
Figura E125 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de Fan et al (2016) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).

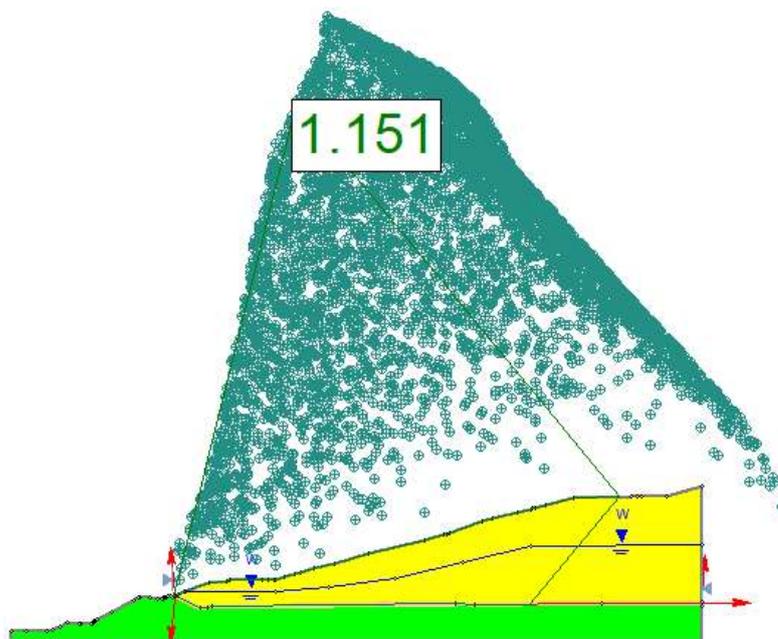
APÊNDICE F – Figuras que demonstram a simulação com nível de chorume para BSE (2023).

Figura F126 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



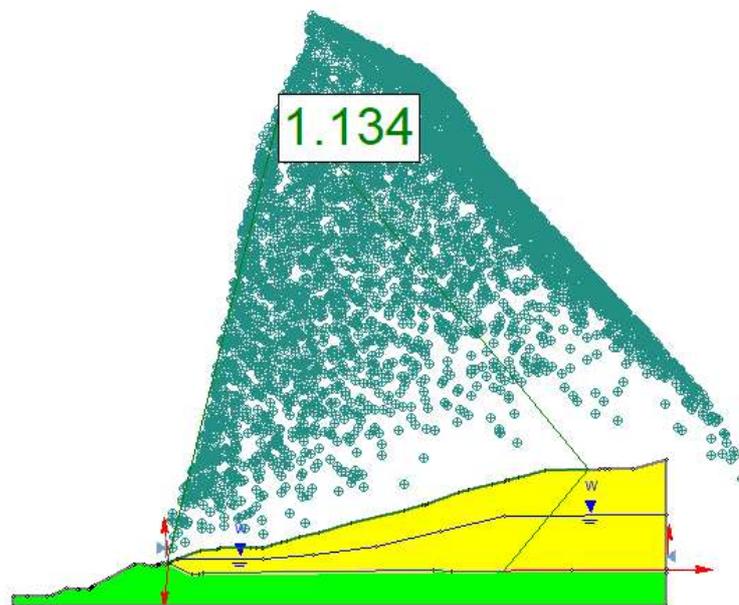
Fonte: Autora (2023).

Figura F127 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spemcer.



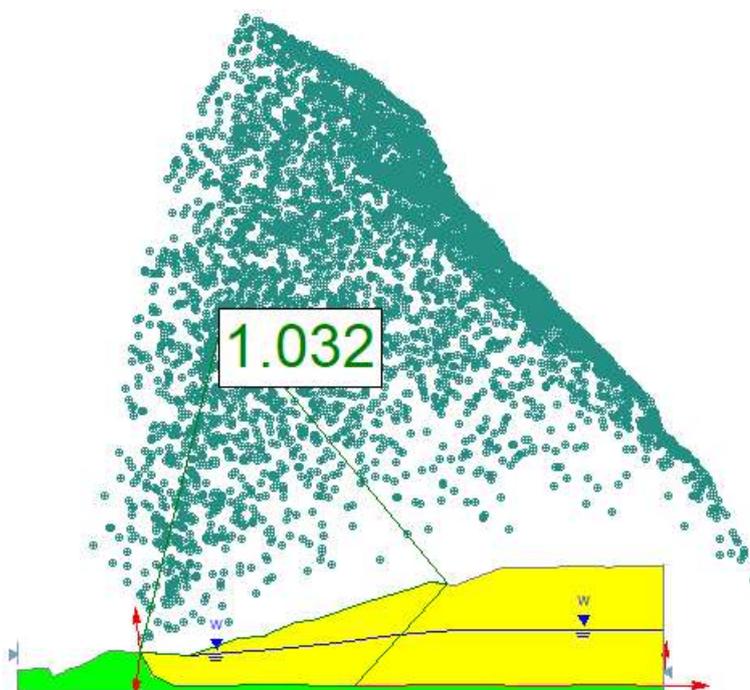
Fonte: Autora (2023).

Figura F128 - Simulação com nível de chorume, Seção 3, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



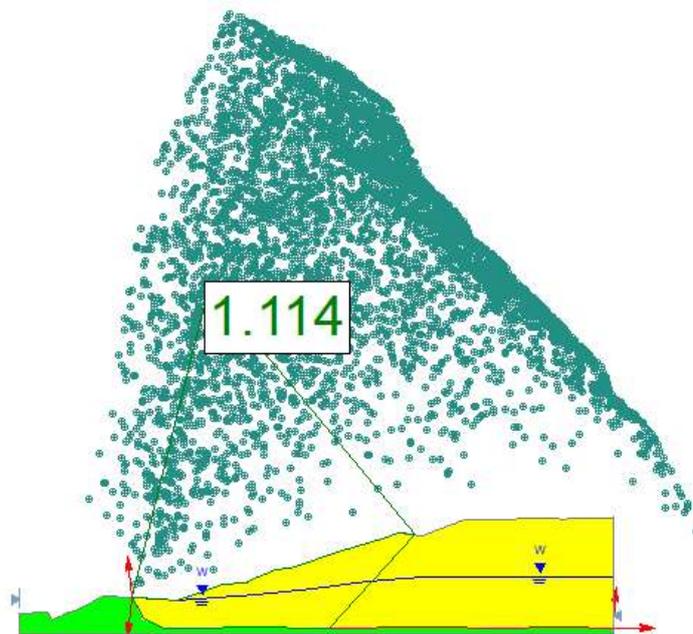
Fonte: Autora (2023).

Figura F129 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



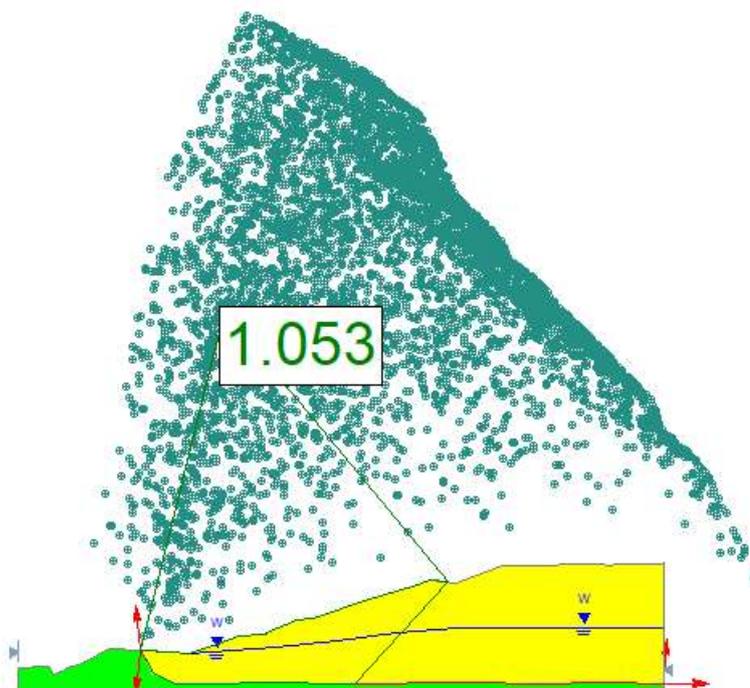
Fonte: Autora (2023).

Figura F130 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



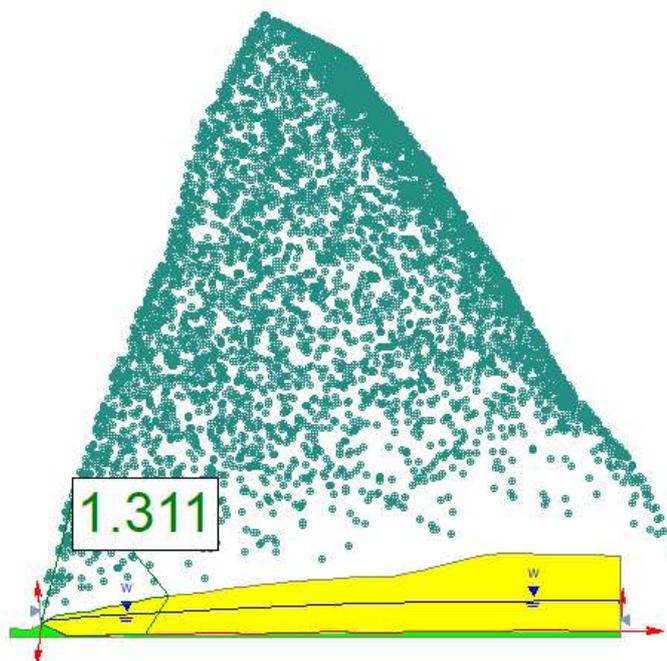
Fonte: Autora (2023).

Figura F131 - Simulação com nível de chorume, Seção 6, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



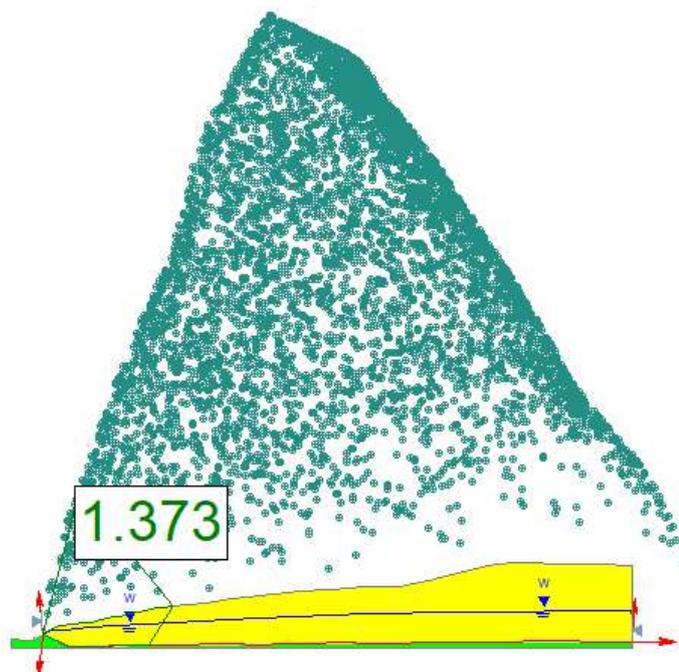
Fonte: Autora (2023).

Figura F132 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



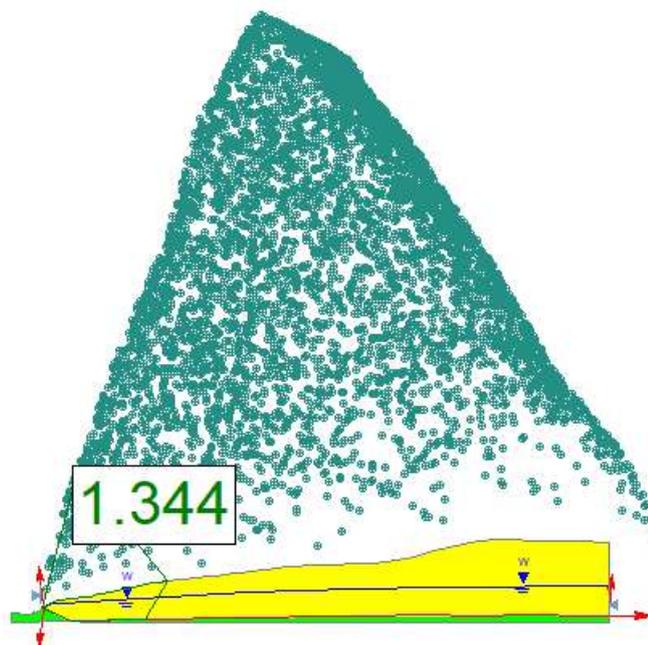
Fonte: Autora (2023).

Figura F133 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



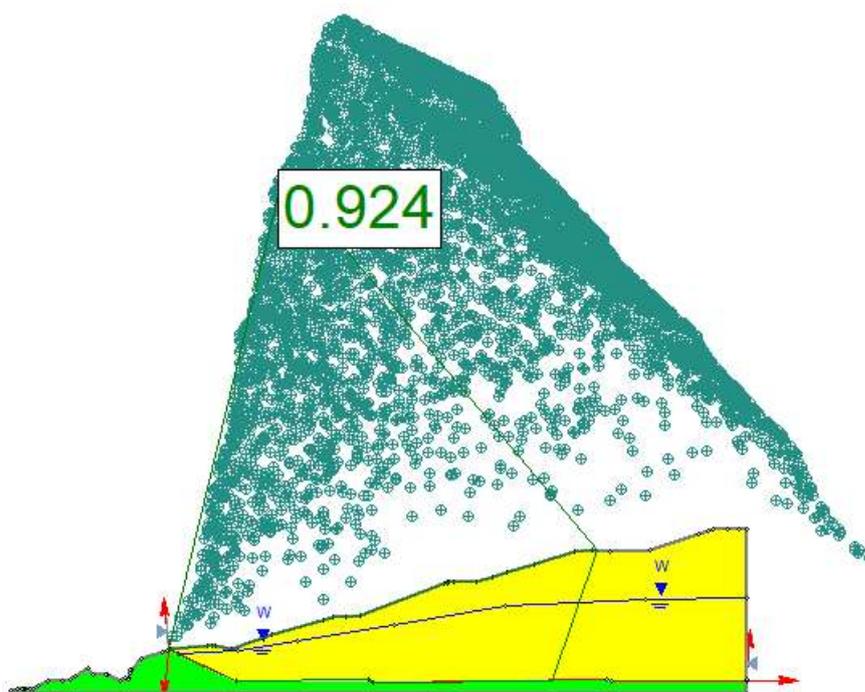
Fonte: Autora (2023).

Figura F134 - Simulação com nível de chorume, Seção 8, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



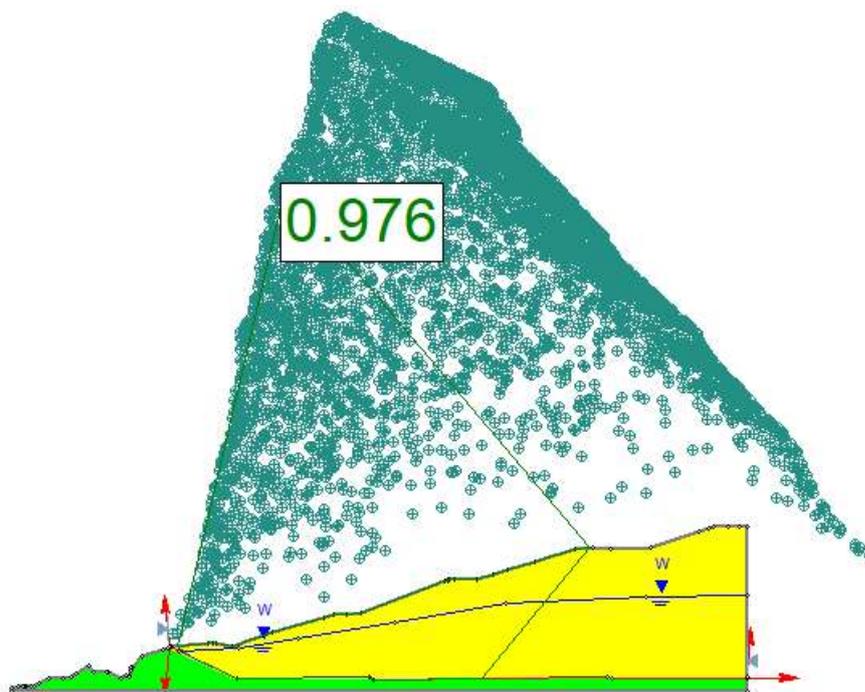
Fonte: Autora (2023).

Figura F135 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Bishop Simplificado.



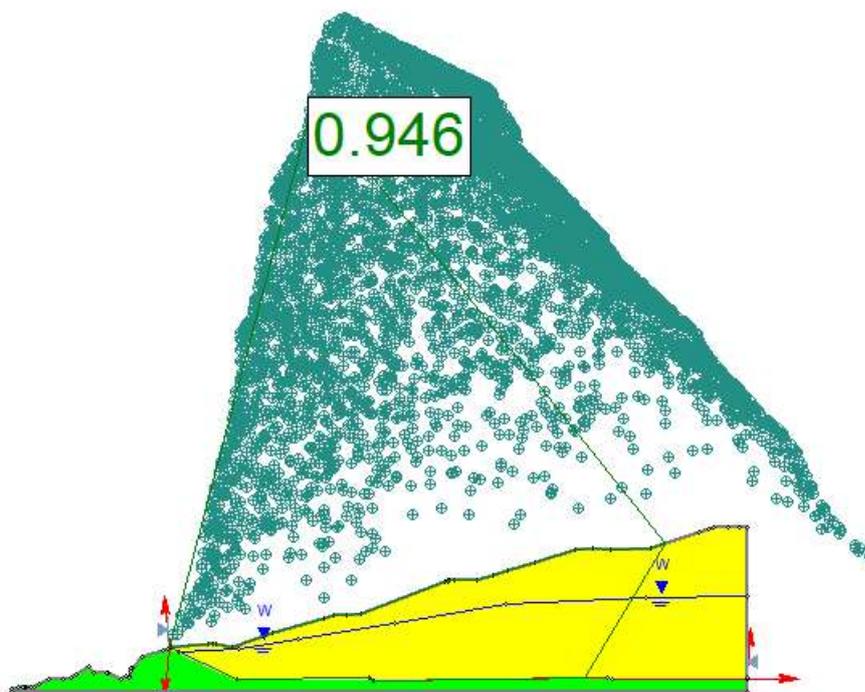
Fonte: Autora (2023).

Figura F136 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Spencer.



Fonte: Autora (2023).

Figura F137 - Simulação com nível de chorume, Seção 10, parâmetro geotécnico de BSE (2023) e Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2023).