



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Otimização da geometria de taludes de aterros sanitários implementando técnicas de reforço de solos

Simão Luís Salzedas Lopes



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

P. PORTO

2021

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Otimização da geometria de taludes de aterros sanitários implementando técnicas de reforço de solos

Optimization of landfill slope geometry implementing soil reinforcement techniques

Simão Luís Salzedas Lopes

1161590

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor António Agostinho Martins Mendonça, Professor Adjunto Convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Cândido Gonçalves Freitas

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor António Agostinho Martins Mendonça

Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Simão Luís Salzedas Lopes**, em 10 de Novembro de 2021 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **17 (dezassete) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

Dedico esta dissertação a meus Pais...

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

- A meus Pais, primeiramente porque sem eles nada seria possível e pela educação que me proporcionaram, com trabalho e honestidade podemos alcançar todos os nossos objetivos. Vocês são o meu exemplo.
- À Braval – Valorização e Tratamento de Resíduos Urbanos S.A., pela oportunidade de estágio e em nome pessoal ao Dr. Pedro Machado pela simpatia e disponibilidade com que abraçou esta oportunidade.
- Ao orientador Doutor Agostinho Mendonça, por ser o “cérebro” da temática da dissertação, enaltecer o incansável acompanhamento, disponibilidade e principalmente paciência ao longo destes meses. Foi um prazer.
- Aos meus irmãos, Diana e Miguel, pelo apoio e capacidade sobrenatural de suportar o meu mau humor.
- Aos meus amigos Daniel, Eduardo, Gonçalo, Diogo, José P., Inês, José A., pois a ajuda deles foi essencial.
- A toda a minha família em geral.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Aterro sanitário; Resíduos; Reforço; Estabilidade; Incremento de volume.

Resumo

Muitos aterros sanitários em Portugal enfrentam um período de mudança, a transição de lixeiras para aterros controlados ocorreu há aproximadamente 24 anos. Atualmente muitas estruturas já se encontram no limite de ocupação e necessitam de intervenções complementares para que acomodem os resíduos depositados. O caso de estudo apresentado nesta dissertação foi realizado no aterro sanitário da empresa Braval – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos S.A, responsável pela gestão de resíduos urbanos do Baixo Cavado (Braga) e que atualmente enfrenta um grande problema de falta de espaço para receber os resíduos. O projeto de ampliação de uma nova célula de aterro ainda não foi aprovado e a acumulação de resíduos em certas células potencia a instabilidade dos taludes das estruturas. O objetivo desta dissertação passa por perceber a influência da aplicação de técnicas de reforço de solos num aterro de resíduos para incremento de volumes garantindo sempre a estabilidade, bem como o estudo do custo-benefício que este incremento representa. Aplicando o software de análise de estabilidade de taludes SLOPE|W foi realizado um estudo com duas abordagens. Inicialmente, aplicando o incremento num aterro de raiz, reforçando a estrutura com comprimentos de reforço semelhantes e posteriormente aplicando comprimentos distintos mediante a zona de influência numa intervenção de renovação de um aterro correspondendo ao caso das condições atuais. Os resultados obtidos garantem a estabilidade da estrutura assegurando incrementos dos volumes de encaixe e, conseqüentemente, da vida útil das infraestruturas. Para a primeira abordagem foram obtidos incrementos de volumes máximos de 38% e um custo mínimo por resíduo de $2\text{€}/m^3$. Para a segunda abordagem o incremento foi de 17% para um custo de $8\text{€}/m^3$.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Landfill; Waste; Reinforcement; Stability; Volume increment.

Abstract

Many landfills in Portugal face a period of change, the transition from dumps to controlled landfills took place approximately 24 years ago. Currently, many structures are already at the occupancy limit and need additional interventions to accommodate the deposited waste. The case study presented in this dissertation was carried out at the landfill of the company Braval – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos SA, responsible for the management of urban waste in Baixo Cavado (Braga) and which currently faces a significant problem of lack of space to receive the waste. The project to expand a new landfill cell has not yet been approved and the accumulation of waste in certain cells enhances the instability of the structures' slopes. The objective of this dissertation is understand the influence of the application of soil reinforcement techniques in a waste landfill to increase volumes, always guaranteeing stability, as well as the study of the cost-benefit that this increase represents. Using SLOPE|W slope stability analysis software, a study was carried out with two approaches. Initially, applying the increment in a root embankment, reinforcing the structure with similar reinforcement lengths and later applying different lengths through the influence zone in an intervention to renovate an embankment corresponding to the case of the current conditions. The results obtained guarantee the stability of the structure, ensuring increments in the fitting volumes and, consequently, in the useful life of the infrastructures. For the first approach, maximum volume increments of 38% and a minimum cost per waste of $2\text{€}/\text{m}^3$ were obtained. For the second approach, the increase was 17% for a cost of $8\text{€}/\text{m}^3$.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	6
1.1.1. <i>Evolução dos resíduos sólidos</i>	6
1.1.2. <i>Tipos de resíduos</i>	8
1.1.3. <i>Hierarquia da gestão dos resíduos</i>	8
1.1.4. <i>Valorização dos resíduos</i>	9
1.1.5. <i>Produção mundial de resíduos</i>	10
1.1.6. <i>Cenário nacional</i>	10
1.1.7. <i>Produção de resíduos</i>	12
1.1.7.1. <i>Caracterização física</i>	13
1.1.7.2. <i>Destinos RU</i>	13
1.1.8. <i>Confinamento de RSU</i>	16
1.1.9. <i>Legislação</i>	19
2. ESTABILIDADE DE TALUDES.....	25
2.1. TEORIA DO EQUILÍBRIO LIMITE	26
2.2. MÉTODOS DAS FATIAS	27
2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	29
2.4. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS (MDF)	30
2.5. PROGRAMA DE CÁLCULO SLOPE/W	31
3. REFORÇO DE SOLOS.....	35
3.1. INTRODUÇÃO	35
3.2. SOLUÇÕES DE REFORÇO.....	36
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS	36
3.4. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS	37
3.5. CONCEITOS DE DIMENSIONAMENTO DE TALUDES COM REFORÇO COM GEOSSINTÉTICOS.....	39
4. CASO DE ESTUDO	43
4.1. ENQUADRAMENTO GERAL	43
4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	49
4.2.1. <i>Estado de fraturação</i>	50
4.2.2. <i>Estado de alteração</i>	50
4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	52
4.4. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	52
4.5. CARACTERIZAÇÃO GERAIS DO ATERRO	52
4.6. CONCLUSÕES	57
5. ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	61
5.1. ESTABILIDADE DOS TALUDES DO CASO DE ESTUDO	61
5.1.1. <i>Perfil analisado</i>	61
5.1.2. <i>Geologia subjacente ao perfil</i>	61
5.1.3. <i>Análise de estabilidade através do programa de cálculo slope/w</i>	63
1) <i>Parâmetros de cálculo</i>	63
5.2. POSSÍVEIS SOLUÇÕES DE INCREMENTO DE VOLUME	67
5.2.1. <i>Estabilidade de taludes de um aterro realizado de raiz</i>	67
5.2.2. <i>Reforço escolhido</i>	69
5.2.3. <i>Aplicação do reforço</i>	70
5.2.4. <i>Comparação dos resultados</i>	73
5.2.5. <i>Principais conclusões das modelações</i>	75
5.2.6. <i>Solução de reforço do talude atual</i>	76
6. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO.....	83
6.1. CUSTOS.....	83

6.1.1.	<i>Discriminação dos custos</i>	83
6.1.2.	<i>Relação entre acréscimo de volumes, m/lineares de reforço e custos</i>	83
6.1.3.	<i>Rácio custo por m³ de resíduos</i>	84
6.2.	CRITÉRIOS DE DECISÃO.....	86
7.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91
7.1.	CONCLUSÕES	91
7.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	92
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	97

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de superfícies de rotura em taludes (adaptado de Pant, 2016).	4
Figura 2. Relação FS com e sem utilização de reforço (adaptado de Koda, E., et al., 2020).	5
Figura 3. Evolução sanitária (adaptado de Lofrano & Brown, 2010).	7
Figura 4. Principais resíduos ao longo do tempo (adaptado de Chandrappa & Das, 2012).	7
Figura 5. Hierarquia da gestão dos resíduos.	9
Figura 6. Produção de resíduos por regiões do Mundo (adaptado de Kaza, et al., 2018).	10
Figura 7. Evolução do número de lixeiras ativas (adaptado de MAOTDR).	11
Figura 8. Caracterização física dos resíduos produzidos em 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020). ...	13
Figura 9. Destinos dos RU entre 2015 e 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	14
Figura 10. Destinos diretos dos RU por SGRU (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	15
Figura 11. Destinos finais dos RU (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	15
Figura 12. RUB depositados em aterro por SGRU entre 2018 e 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	18
Figura 13. Comparação entre comportamento de solo reforçado e não reforçado	35
Figura 14. Diferentes tipos de geotêxteis, em que a) e b) geotêxteis não tecido; c) e d) geotêxteis tecido (adaptado de Paula, 2012).	38
Figura 15. Exemplos de geogrelhas (adaptado de Medeiros, 2008).	38
Figura 16. Dimensionamento de taludes reforçados com geossintéticos, em que: a) possíveis mecanismos de rotura e b) deformações possíveis (adaptado de Paula, 2012).	39
Figura 17. Instalações ecoparque Braval, em que: a) Aterro sanitário; b) Estação de triagem; c) Unidade de tratamento mecânico e central de valorização orgânica; d) Ecocentro; e) Unidade de valorização de biogás; f) Estação de tratamento de lixiviados.	43
Figura 18. Mapa instalações ecoparque Braval 2021 (Google Earth, 2021).	44
Figura 19. Células aterro Braval (Google Earth, 2021).	44
Figura 20. Localização nova célula de ampliação aterro Braval (Google Earth, 2021).	46
Figura 21. Ponto de observação para área de nova célula ampliação de aterro (foto tirada por autor, 06/07/2021)	47
Figura 22. Escavação realizada para remediação do problema de deposição de resíduos (foto tirada por autor, 06/07/2021).	48
Figura 23. Células aterro Braval com incremento da célula 2.1 (Google Earth, 2021).	48
Figura 24. Geologia aterro sanitário Braval (Google Earth, 2021).	49
Figura 25. Granito de Briteiros (foto tirada por autor, 06/07/2021)	50
Figura 26. Litologia do substrato (foto tirada por autor, 06/07/2021).	51
Figura 27. Percurso de descarga dos resíduos (Google Earth, 2021).	53
Figura 28. Zona de descarga de resíduos (foto tirada por autor, 06/07/2021).	54
Figura 29. Representação da zona de descarga e espalhamento dos resíduos no levantamento topográfico 2021.	55
Figura 30. Representação da queda de resíduos entre bancadas na célula 2 segundo levantamento topográfico 2021.	56
Figura 31. Queda de resíduos entre bancadas na célula 2 (foto tirada por autor, 06/07/2021).	56
Figura 32. Esquematização do perfil de cálculo.	61
Figura 33. Geologia subjacente à célula 2 do aterro	62
Figura 34. Talude do aterro atual com respetiva geologia.	62
Figura 35. Talude existente com representação de camadas de terras entre resíduos.	63
Figura 36. Talude situação atual no slope/w, em que: a) modelo e b) resultados da retroanálise.	65
Figura 37. Modelo atual para simplificação de calculo.	66
Figura 38. Relação entre FS do talude atual e situação para $FS \geq 1,5$ para valores de parâmetros definidos.	67
Figura 39. Geometria dos modelos de cálculo com 55° de inclinação, em que: a) talude com 0 bancadas; b) talude com 1 bancadas e c) talude com 2 bancadas.	68
Figura 40. Aspecto do geotêxtil Mirafi PET (adaptado de Materials, 2021).	69
Figura 41. Aplicação de reforço homogêneo em talude de 55° com 1 bancadas.	70
Figura 42. Espaçamento entre reforços.	70
Figura 43. Resultado slope/w para modelação talude 55° com 1 bancada, em que: a) modelo e b) resultados.	71

Figura 44. Aplicação de reforço heterogéneo em talude de 55° com 1 bancadas.	72
Figura 45. Resultado modelação reforço heterogéneo talude 55° com 1 bancadas em que: a) modelo e b) resultados.	73
Figura 46. Relação entre FS para reforço homogéneo e reforço heterogéneo.	74
Figura 47. Relação entre m/lineares de reforço para as diferentes soluções.	75
Figura 48. Endentamento do talude existente.	76
Figura 49. Representação do talude de endentamento comparativamente à inclinação atual e face de acréscimo com reforço.	77
Figura 50. Resultado ótimo para talude de aterro atual.	77
Figura 51. Resultado slope/w para resultado ótimo para talude de aterro atual.	78
Figura 52. Adaptação do modelo teórico para condições atuais.	79

Índice de quadros

Quadro 1. Infraestruturas de gestão de RU construídas (adaptado de Marçal & Ferreira, 2019).....	12
Quadro 2. Quantidade de RU produzidos (em 103t) (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	12
Quadro 3. Posicionamento de Portugal face à meta de prevenção de resíduos (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	16
Quadro 4. Posicionamento de Portugal face à meta de deposição de RUB em aterro (Adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).	17
Quadro 5. Requisitos mínimos a que os aterros devem obedecer (adaptado de Decreto-Lei nº 73/2011 de 11 de Junho).....	20
Quadro 6. Evolução métodos de fatias.....	27
Quadro 7. Equações da estática aplicadas (adaptado de Geostudio, 2021).	28
Quadro 8. Características e relações das forças entre camadas (adaptado de Geostudio, 2021).	28
Quadro 9. Geossintéticos que podem desempenhar a função de reforço (adaptado de: (Paula, 2012)).	37
Quadro 10. Resumo da capacidade de deposição adicional e programação previsional temporal da exploração da célula de ampliação.	45
Quadro 11. Áreas e volumes de cada célula do aterro Braval.....	53
Quadro 12. Valores dos parâmetros mecânicos definidos para geologia e bancada de disfarce.....	63
Quadro 13. Resumo do processo iterativo para parâmetros mecânicos dos resíduos.....	64
Quadro 14. Valor dos parâmetros utilizados para os diferentes materiais.	64
Quadro 15. FS obtido para as diferentes inclinações de talude e respetivo número de bancadas.	68
Quadro 16. Elementos de custo associados a cada abordagem.	83
Quadro 17. Discriminação de custos.	83
Quadro 18. Quadro resumo para volumes de encaixe, metros lineares de reforço e custos para solução de raiz e caso atual.....	85
Quadro 19. Rácio custo por m ³ de resíduos.	87

(página propositadamente em branco)

Índice de anexos

Anexo I – Características dos resíduos que os tornam perigosos;

Anexo II – Mapa de distribuição dos SGRU em Portugal Continental;

Anexo III – Municípios ao encargo da Braval;

Anexo IV – População abrangida pela Braval;

Anexo V – Pontos de observação do aterro Braval;

Anexo VI – Topografia das células 1 e 2 e localização do perfil de estudo;

Anexo VII – Mapa das sondagens realizadas na zona envolvente ao aterro;

Anexo VIII – Resultados das sondagens representativas (S1 e S5);

Anexo IX – Linha de terreno natural e escavação do perfil de cálculo;

Anexo X – Diferentes modelos até chegar ao talude com geologia final;

Anexo XI – Bibliografia utilizada para obtenção do valor dos parâmetros mecânicos de solo bancada de disfarce e geologia subjacente ao aterro;

Anexo XII – Retroanálise realizada;

Anexo XIII – Cálculo dos coeficientes sísmicos;

Anexo XIV – Catálogo geotêxtil utilizado (Mirafi Pet);

Anexo XV – Esquematização da aplicação de geotêxtil com reforço heterogéneo com 20 metros de comprimento;

Anexo XVI – Representação dos modelos com e sem reforço e respetivos fatores de segurança;

Anexo XVII – Sequência de modelos até chegar a solução ótima;

Anexo XVIII – Pormenorização dos volumes de encaixe, metros lineares de reforço e custos para a solução de raiz e caso atual;

Anexo XIX – Rácio custo/benefício.

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

FS – Fator de Segurança

IGAOT – Inspeção Geral do Ambiente e Ordenamento do Território

MEF – Métodos Elementos Finitos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RUB – Resíduos Urbanos Biodegradáveis

SGRU – Serviços de Gestão de Resíduos Urbanos

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

Esta dissertação surge na modalidade protocolar de estágio curricular entre o Instituto Superior de Engenharia do Politécnico do Porto e a empresa Braval–Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A em Braga. O protocolo visa possibilitar o aluno a desenvolver um projeto que se adequa ao grau de complexidade definido para a unidade curricular, numa organização externa ao ISEP, com o objetivo de obter o grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

O tema da dissertação foi inspirado num artigo publicado em Fevereiro de 2020 denominado “Landfill Slope Stability Improvement Incorporating Reinforcement in Reclamation Process Applying Observational Method” e uma dissertação desenvolvida na Florida Atlantic University, datada em Agosto de 2016 e denominada “Stability Analysis of Geosynthetic Reinforced MSW Landfill Slopes Considering Effects of Biodegradation and Extreme Wind Loading”. Ambos os documentos relacionam o incremento de volume do aterro sanitário utilizando reforços geossintéticos, promovendo sempre a segurança estrutural do aterro.

Os resíduos produzidos resultam de todas as atividades da sociedade contemporânea, desde atividades domésticas até industriais. A gestão dos mesmos é um desafio para qualquer empresa ou município (Remedio, 2014).

O destino desses resíduos será maioritariamente para aterros sanitários, que são estruturas complexas que funcionam em diversos sistemas para que os resíduos sejam armazenados de forma segura e que impliquem o mínimo impacto ao meio ambiente (Pant, 2016).

Os hábitos e metas a cumprir perspetivam uma redução de percentagem de resíduos depositados em aterro, contudo, a necessidade de espaço, ainda que em menor volume, continuará a ser necessária. No entanto, tal necessidade, por implicar tendencialmente cada vez menores volumes, potencia a adoção de novas soluções, como seja a reabilitação de estruturas existentes, e/ou o desenvolvimento de técnicas inovadoras como as abordadas nos dois documentos acima citados.

A engenharia inerente a um aterro sanitário lida principalmente com a prevenção dos efeitos das ameaças e incómodos ambientais. Um dos maiores problemas quando se projeta um aterro com bancadas é a segurança geotécnica da estrutura. Ao analisar a estabilidade do aterro, a tarefa prioritária consiste em determinar a elasticidade dos materiais do aterro e de todos os parâmetros mecânicos associados, com o objetivo de avaliar potenciais deslocamentos e analisar cenários de rotura de talude de resíduos (Koda, E., et al., 2020).

A estabilidade é determinada pela relação entre as tensões de corte atuantes e resistentes. Os cenários de rotura (Figura 1) podem ser causados por fatores externos como eventos climáticos

ou fatores internos como o aumento da tensão de corte causado por excesso de carregamento (Pant, 2016).

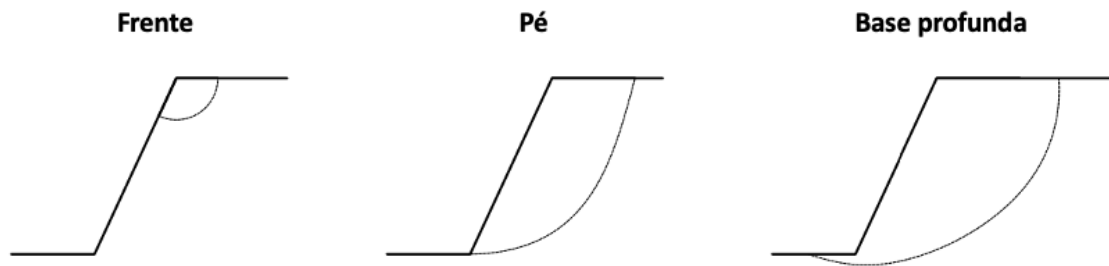


Figura 1. Tipos de superfícies de rotura em taludes (adaptado de Pant, 2016).

Os resíduos urbanos depositados em aterro são materiais altamente diversificados física, química, mecanicamente e, também, geotécnicamente, pois dependem da composição morfológica, idade e estado da compactação. Por terem estas características distintas o processo de avaliação e modelação do comportamento geotécnico das estruturas tornar-se mais difícil. Esta modelação refere-se principalmente às análises de deformação e estabilidade dos taludes de aterros sanitários (Koda, E., et al., 2020).

O presente estudo diz respeito ao aterro sanitário nas instalações da Braval, empresa responsável pela valorização e gestão de resíduos sólidos de 6 municípios na zona do baixo Cávado (Braga).

Atualmente a Braval apresenta um problema de falta de espaço para receber as 300 ton de resíduos que diariamente chegam às suas instalações. Com a demora na aprovação do novo projeto de ampliação, a solução passa por adotar medidas de recurso. Pequenas escavações para encaixe de material e sobreposição pouco controlada de resíduos, são algumas das operações implementadas para mitigar as dificuldades.

Com o objetivo de estudar e aplicar uma solução que promova não só a estabilidade, mas também o incremento de volumes de encaixe, suportada em processos de fácil execução e custos competitivos com alternativas mais convencionais.

Para cumprir os objetivos estudou-se uma série de técnicas de melhoramento das condições do talude que envolveram a aplicação de geotêxtil e solos com características mecânicas melhoradas. Atualmente, os geossintéticos disponíveis no mercado oferecem uma ampla gama de aplicação em muitos projetos de engenharia (Koda, E., et al., 2020). A utilização destes elementos num aterro sanitário, para o fim descrito, corresponde a um processo pouco ou nunca implementado em Portugal, mas já estudado e aplicado em alguns países.

Utilizando o exemplo de aplicação discriminado em Koda, E., et al., 2020, é obvia a melhoria do coeficiente de segurança com a utilização de técnicas de reforço de solos.

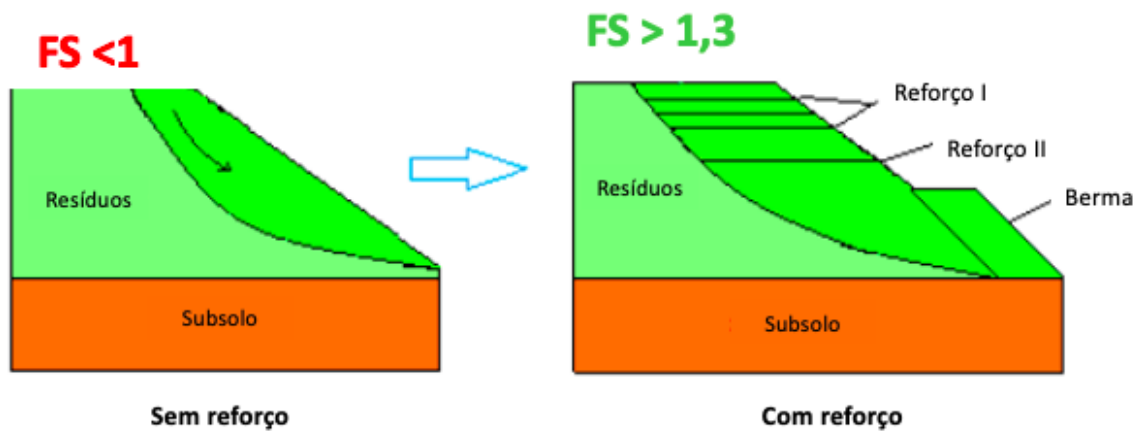


Figura 2. Relação FS com e sem utilização de reforço (adaptado de Koda, E., et al., 2020).

A aplicação destes elementos é muito vantajosa, numa ótica técnica e económica, comparativamente a alternativas mais tradicionais (Koda, Kawalec, Kiersnowska, & Osinski, 2020). Mais concretamente, em cenários com limitações de espaço e pouca facilidade em alterações estruturais dos taludes existentes.

Para uma melhor visualização do corpo da dissertação, é necessário saber que está dividida em 7 capítulos, em que:

- I. Introdução
- II. Estabilidade de aterros sanitários
- III. Reforço de solos

Capítulos que sustentam o documento a nível teórico, fornecendo os conceitos base que se aplicarão nas metodologias e abordagens realizadas nos capítulos seguintes.

- IV. Caso de estudo

Inclui a descrição das instalações do ecoparque Braval, são mencionadas as características do aterro existente, identificados os problemas de instabilidade e definida a zona de estudo. Há ainda uma caracterização geológica do aterro.

V. Análise de estabilidade

Modelação do perfil representativo da zona destacada no capítulo anterior para o caso de uma célula e talude específico. Definição de parâmetros mecânicos dos diferentes elementos de talude através de um processo de retroanálise

Análise dos modelos de incremento de volume, descrevendo as abordagens adotadas, para o cenário de incremento do volume de raiz (novo aterro) e aplicação apenas para o caso atual (renovação e reforço de capacidade).

VI. Proposta de otimização

Descrição dos custos e comparação dos valores percentuais de acréscimo de volumes de encaixe e quantidade de reforço para cada modelo desenvolvido. Posteriormente, realiza-se um estudo dos gastos totais e o volume de acréscimo que resulta no cálculo do rácio custo-benefício (€/m^3 de resíduos).

VII. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Abordagem geral aos resultados obtidos ao longo do documento e indicações para desenvolvimentos futuros, com o intuito de promover novos estudos sobre esta temática.

1.1. Enquadramento teórico

1.1.1. Evolução dos resíduos sólidos

O *homo sapiens*, conhecido como Homem moderno habita na Terra há mais de 200 000 anos, durante grande parte desse tempo como caçador (Lofrano & Brown, 2010).

Devido às características nómadas, os resíduos produzidos seriam em pouca quantidade e rapidamente devolvidos à terra e decompostos em ciclos naturais.

Os primeiros problemas associados a resíduos surgem com a fixação permanente em comunidades, ocorrida há cerca de 10 000 anos, passando a adotar primordialmente a agricultura (Lofrano & Brown, 2010).

A eliminação de excrementos, resíduos alimentares, animais em decomposição, seriam os principais resíduos.

A evolução sanitária (Figura 3) foi ocorrendo ao longo dos séculos, tendo passado por várias adaptações e melhoramentos, até aos dias de hoje.

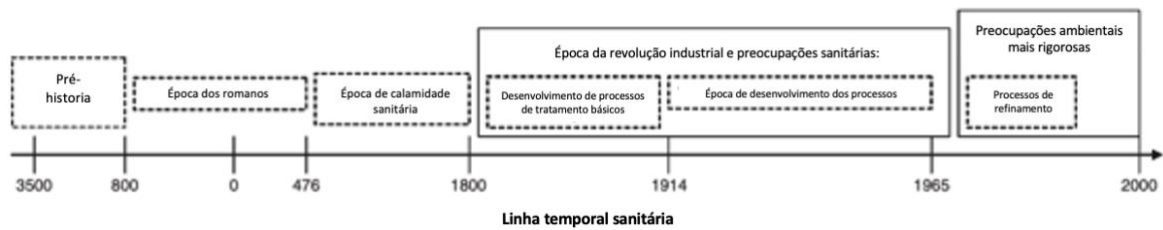


Figura 3. Evolução sanitária (adaptado de Lofrano & Brown, 2010).

Os resíduos são responsáveis por mudanças nas populações mundiais ao longo da História como é caso de pragas e muitas doenças. Os europeus costumavam expelir os seus resíduos domésticos, sem qualquer critério, diretamente para as ruas. Atualmente o mesmo fenómeno acontece mas em países em vias de desenvolvimento. A Figura 4 mostra a evolução dos tipos de resíduos ao longo dos tempos.

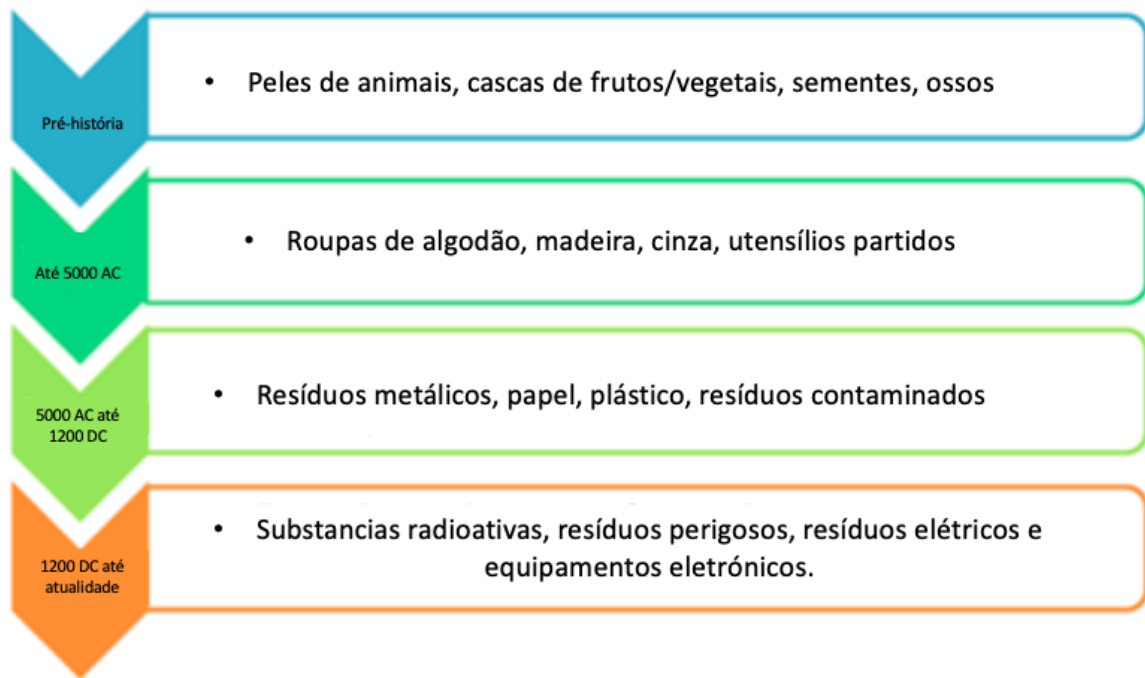


Figura 4. Principais resíduos ao longo do tempo (adaptado de Chandrappa & Das, 2012).

Com o desenvolvimento da ciência foram surgindo novos produtos e substâncias. As características dos resíduos passaram assim de meramente orgânicos, onde se inclui restos de animais, frutas ou ossos, até aos resíduos mais complexos e perigosos, como por exemplo os resíduos de origem radioativa ou eletrónica (Chandrappa & Das, 2012).

1.1.2. Tipos de resíduos

A diferenciação de resíduos foi muito importante para a proteção ambiental, devido aos impactos que a sua produção pode representar. Por outro lado, esta diferenciação ajuda a uma melhor gestão dos mesmos.

A gestão de um resíduo é efetuada de acordo com as suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Em Portugal, a classificação dos resíduos é feita segundo a sua origem. De acordo com o DL nº 73/2011 os resíduos podem ser:

- **Resíduos inertes (RI)** – não sofrem transformações químicas, físicas ou biológicas relevantes, mas em contrapartida, não podem ser inflamáveis ou solúveis, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química. Não podem ser biodegradáveis e se entrarem em contato com outras substâncias não as podem afetar negativamente evitando o risco de poluição ambiental ou para a saúde humana. Não colocam em risco a qualidade das águas subterrâneas e/ou superficiais.
- **Resíduos urbanos não perigosos (RU)** – resíduos provenientes de habitações e outras proveniências (sempre semelhantes a nível da natureza ou composição aos resíduos provenientes de habitações). Incluem-se neste grupo os resíduos produzidos pelos agregados familiares, por pequenos produtores de resíduos semelhantes (produção diária inferior a 1.100l) e por grandes produtores de resíduos semelhantes (produção diária igual ou superior a 1.100l).
- **Resíduos não perigosos de origem industrial (RINP)** – resíduos que não apresentam as características de perigosidade constantes (consultar Anexo I).
- **Resíduos perigosos (RP)** – resíduos que apresentam uma ou mais das características de perigosidade constantes (consultar Anexo I).

1.1.3. Hierarquia da gestão dos resíduos

A hierarquização da gestão dos resíduos (Figura 5), definida pela união europeia, prioriza os tratamentos e formas de valorização a dar aos resíduos.



Figura 5. Hierarquia da gestão dos resíduos.

Os resíduos não deverão ser vistos como lixo, mas sim como recursos. De acordo com o modelo apresentado é priorizada a etapa de redução dos resíduos. O objetivo será a minimização da produção quantitativa e qualitativa, reduzindo a quantidade e a perigosidade dos mesmos, respetivamente (Pereira, 2015).

Quando a redução não pode ser minimizada, promove-se a reutilização, que consiste na utilização de um produto mais que uma vez, independentemente de desempenhar a mesma função ou não, posteriormente seguem-se as etapas de reciclagem e outros tipos de valorização.

A deposição de resíduos em aterro é vista como última opção de tratamento de resíduos devendo ser utilizada o mínimo possível.

1.1.4. Valorização dos resíduos

Na valorização o resíduo é visto como um recurso passível de ser utilizado como substituto de outros materiais. Consiste então na transformação ou recuperação dos resíduos com finalidade de servirem um fim útil.

Os resíduos contêm frações orgânicas e inorgânicas que podem ser recuperadas se for adotada uma técnica de valorização adequada.

A valorização pode ser dividida em três grandes grupos:

- **Valorização multimaterial:** corresponde à reciclagem e reutilização direta;
- **Valorização orgânica:** consiste na transformação da fração orgânica dos resíduos em compostos com diversas aplicações;
- **Valorização energética:** consiste na transformação dos resíduos em energia, pode ocorrer por inceneração dos resíduos ou por combustão dos gases, biogás, por eles produzido.

1.1.5. Produção mundial de resíduos

A produção de resíduos é uma consequência natural da urbanização, crescimento económico e aumento da população. Nos últimos anos a produção de resíduos cresce conforme as projeções estimadas. Em 2016 a produção foi de 2,01 mil milhões de toneladas (Kaza, et al., 2018). A Figura 6 mostra a distribuição percentual da produção de resíduos em diferentes regiões do Mundo.

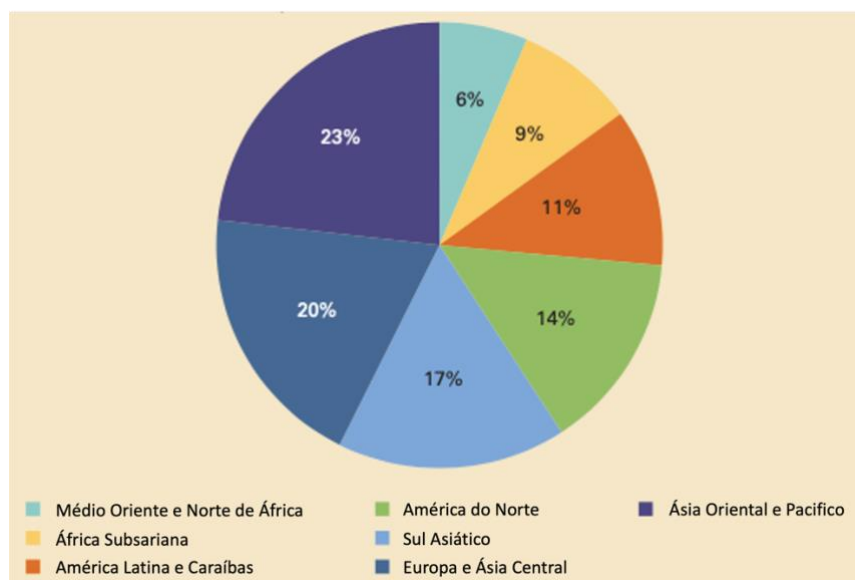


Figura 6. Produção de resíduos por regiões do Mundo (adaptado de Kaza, et al., 2018).

1.1.6. Cenário nacional

Em Portugal, até 1996, a gestão dos RSU era responsabilidade das autarquias que incluíam as etapas de recolha e deposição, não havendo qualquer triagem na fonte ou no destino final. (Trotta, 2011).

Os resíduos eram depositados em lixeiras, locais bastante isolados, longe de aglomerados populacionais e sem qualquer cuidado de proteção dos solos. A deposição destes resíduos representava um atentado ambiental constituindo um foco de poluição e de contaminação dos terrenos e aquíferos (Duarte, 2009).

Em 1996 existiam em Portugal 341 lixeiras, das quais, 96 na região norte, 83 na região centro, 50 na região de Lisboa e vale do Tejo e 20 na região do Algarve.

De forma a controlar os resíduos e aplicar praticas de prevenção ambiental, foi publicado em 1997, o Plano Estratégico para Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU). Segundo Trotta (2011) as suas prioridades seriam:

- o encerramento e reabilitação de todas as lixeiras;
- a criação de infraestruturas de recolha, transporte e tratamento dos RU;

- criação de incentivos para o desenvolvimento da reciclagem e recolha seletiva.

Este plano foi rapidamente implementado no nosso país recorrendo aos fundos estruturais disponibilizados pela união europeia sendo imposto um conjunto de metas, obrigações e regras controladas pela comissão europeia.

A partir de 2002 todas as lixeiras municipais encerraram (Duarte, 2009). Na Figura 7 podemos observar a evolução do número de lixeiras ativas.

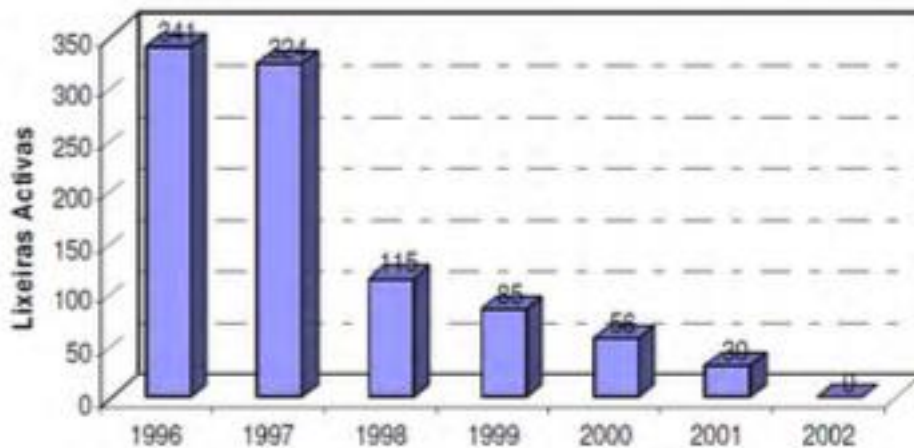


Figura 7. Evolução do número de lixeiras ativas (adaptado de MAOTDR).

A deposição dos resíduos passou então a realizar-se em aterros sanitários, dimensionados com sistemas de isolamento dos solos e de minimização de produção de lixiviados (Silva, 2014).

Segundo (Marçal & Ferreira, 2019) os serviços de gestão de resíduos urbanos são responsáveis pela recolha, transporte, triagem, valorização e eliminação dos resíduos urbanos. Existem 23 SGRU, em que, 12 são multimunicipais e 11 são intermunicipais. No Anexo II é possível ver todos os SGRU distribuídos geograficamente.

O Quadro 1 mostra as infraestruturas de gestão de resíduos urbanos existentes em Portugal continental.

Quadro 1. Infraestruturas de gestão de RU construídas (adaptado de Marçal & Ferreira, 2019).

Infraestruturas existentes	Nº em unidades
Aterros	32
Tratamento mecânico	5
Tratamento mecânico e biológico	18
Central de valorização orgânica (RSel)	5
Central de valorização energética	2
Estação de triagem	30
Estação de transferência	90
Ecocentros	197

Os sistemas de gestão de RU têm dois objetivos:

- incremento do desvio de resíduos de aterro;
- aumento da quantidade dos resíduos enviados para reciclagem.

1.1.7. Produção de resíduos

No ano de 2019 verificou-se um ligeiro aumento na produção de resíduos em comparação com anos anteriores. Produziram-se assim um total de 5 007 mil toneladas de RU (Portugal continental). Este aumento pode ter duas razões, a primeira será o aumento de produção de resíduos devido ao crescimento económico, a segunda será o fracasso na estratégia de prevenção da produção de resíduos, sendo o valor obtido escasso face aos resultados esperados.

Quadro 2. Quantidade de RU produzidos (em $10^3 t$) (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

Região	2015	2016	2017	2018	2019
Portugal Continental	4 523	4 640	4 745	4 945	5 007
Região Autónoma da Madeira	110	119	124	126	129
Região Autónoma dos Açores	132	132	137	142	146
Total	4 765	4 891	5 007	5 213	5 281
Varição face ao ano anterior	1%	3%	2%	4%	1%

1.1.7.1. Caracterização física

Com base na Portaria nº 851/2009, de 7 de Agosto, na Figura 8 são apresentados os resultados da caracterização física dos RU produzidos em Portugal Continental.

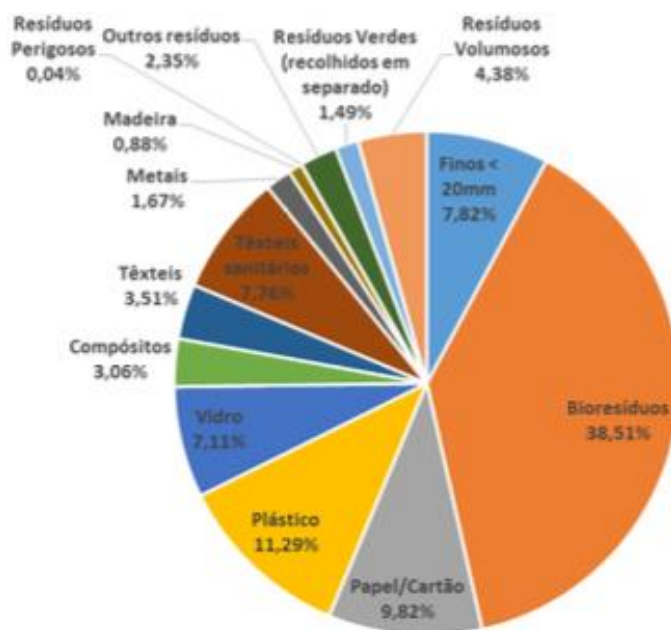


Figura 8. Caracterização física dos resíduos produzidos em 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

O grupo mais representatividade dos resíduos recolhidos são os biorresíduos com 38,51%, posteriormente temos os plásticos (11,29%), papel e cartão (9,82%), finos <20mm (7,82%), têxteis sanitários (7,76%) e vidro (7,11%). Por fim, com percentagens inferiores a 5% temos os resíduos volumosos (4,38%), têxteis (3,51%), e compósitos (3,06%), entre outros grupos.

1.1.7.2. Destinos RU

Segundo Marçal & Ferreira (2020) após a recolha dos RU é necessário realizar a distribuição relativa aos seus destinos. A Figura 9 representa os destinos dos RU entre 2015 a 2019 em Portugal continental.

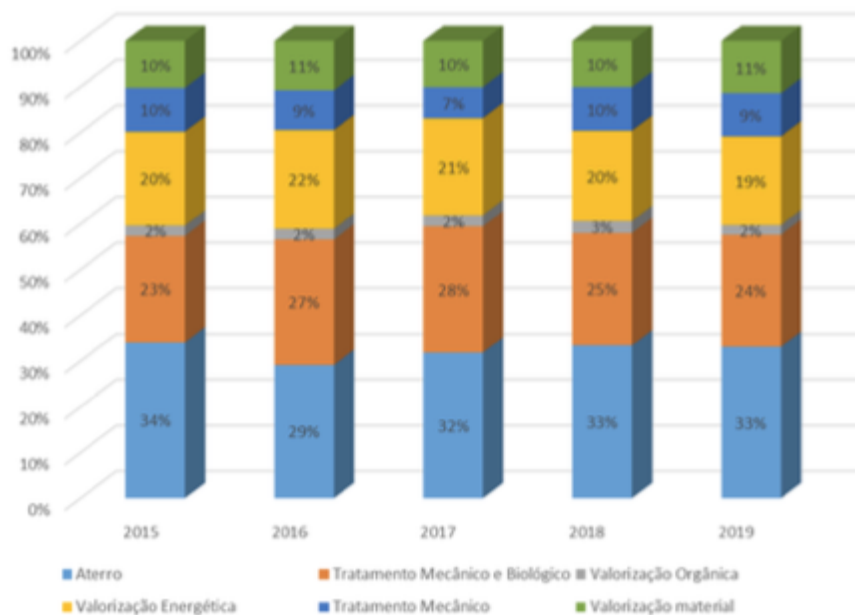


Figura 9. Destinos dos RU entre 2015 e 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

Através da análise do gráfico anterior é possível verificar que a maioria dos resíduos seguem diretos para o conjunto de operações de valorização, mas como destino individual, o aterro represente a maior taxa percentual (33%), relativamente a 2019. Outra observação será o facto da tendência registada desde 2015 a nível percentual para todas as operações de valorização. Sem interferir na evolução positiva do cumprimento da hierarquia dos resíduos, verifica-se uma estabilização percentual da quantidade de resíduos recolhidos seletivamente para valorização, face ao total de RU produzidos, cenário esse que vai no sentido inverso à estratégia comunitária e nacional para os RU. A Figura 10 permite uma comparação entre os diferentes SGRU nacionais em termos de encaminhamento direto dos resíduos.

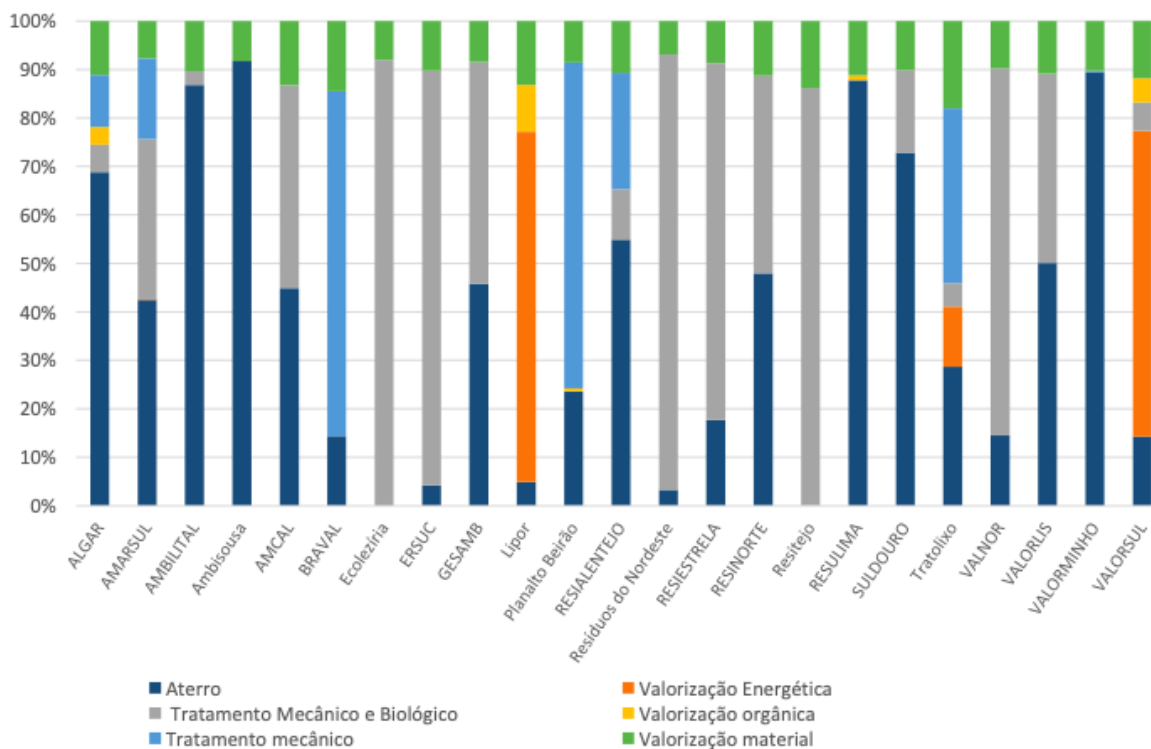


Figura 10. Destinos diretos dos RU por SGRU (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

Em 2019, 8 SGRU depositaram diretamente em aterro mais de 50% dos RU produzidos, valor muito elevado face às metas definidas. Contudo, a justificação pode ser dada devido à paragem para manutenção de unidades de tratamento mecânico e biológico de alguns SGRU.

Dessa forma a Figura 10 esquematiza o total de resíduos encaminhados para cada um dos respetivos destinos finais.

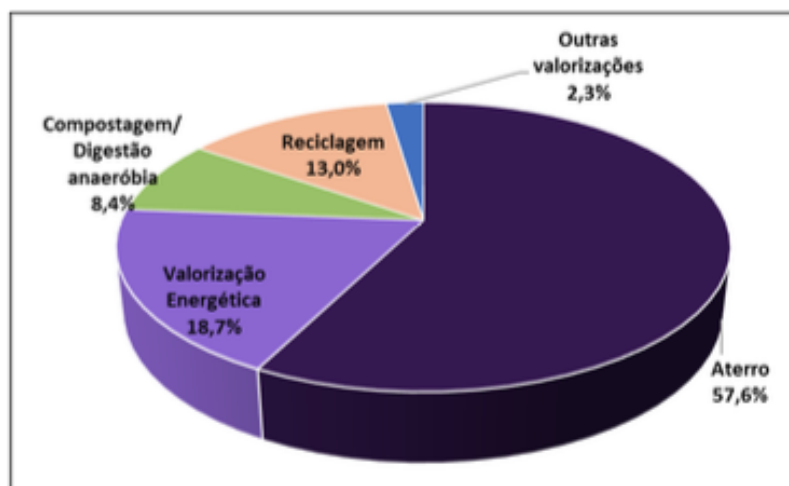


Figura 11. Destinos finais dos RU (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

Conclui-se assim que a fração total de resíduos depositados em aterro, por via direta ou indireta (rejeitados dos processos de tratamento e valorização), constitui quase 58% do total de resíduos geridos.

1.1.8. Confinamento de RSU

Segundo o PERSU 2020 são estabelecidas metas nacionais para vários indicadores cujo posicionamento nacional se analisa seguidamente.

Relativamente à meta nacional de prevenção de resíduos, que menciona uma redução mínima de produção de resíduos por habitante, de 10% em peso, relativo ao valor de 2012 recorre-se à expressão:

$$\text{Redução da produção per capita (\%)} = \frac{\text{Capitação RU no ano de análise}}{\text{Capitação RU em 2012}} \quad (1)$$

Considerando que o valor de capitação de RU calculado para 2012 foi de 456 *Kg/hab.ano*, o Quadro 3 apresenta os resultados obtidos para 2019.

Quadro 3. Posicionamento de Portugal face à meta de prevenção de resíduos (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

	Redução de produção per Capita (%)	Produção per Capita (Kg/hab.ano)
Resultados obtidos 2019	(+) 113 *	513
Metas 2020 face a 2012	10	410

*Para valor dos resultados obtidos em 2019 não houve uma redução, mas sim um aumento de 13% face a 2012.

Será necessário um decréscimo de produção de resíduos em cerca de 20% para atingir a meta de prevenção definida para 2020. Este objetivo será de difícil execução tendo por base a tendência verificada nos últimos anos.

No que diz respeito ao posicionamento face à meta nacional de deposição de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) em aterro, que estipulada no artigo 5.º da Diretiva Aterros, transposta para a legislação nacional através do artigo 8.º do Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, e tendo em conta a derrogação de 4 anos concedida a Portugal, deve verificar-se que até julho de 2020 a redução para 35% da quantidade total de RUB depositadas em aterro, face aos quantitativos totais produzidos em 1995. Para o cálculo aplicou-se a metodologia proposta pelo PERSU 2020:

$$\text{Deposição de RUB em aterro (\%)} = \frac{(0,55 \times RUDat + 0,59 \times RRTMDat)}{RUB \text{ produzidos em 1995}} \quad (2)$$

Em que:

RUDat é a quantidade de resíduos depositados em aterro;

RRTMDat é a quantidade de resíduos rejeitados de TM depositados em aterro.

O Quadro 4 resume o posicionamento de Portugal em 2019, face à meta definida para 2020.

Quadro 4. Posicionamento de Portugal face à meta de deposição de RUB em aterro (Adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

	RUB depositados em aterro (%)	RUB depositados em aterro (ton)
Resultados obtidos 2019	45	1 014 897
Meta 2020 face a 1995	35	788 452

As metas foram analisadas para os diferentes SGRU nacionais com o objetivo de perceber o comportamento de cada um, bem como responsabilizar os incumpridores, garantindo uma distribuição proporcional dos esforços face às metas nacionais.

A Figura 12 representa o posicionamento dos SGRU face à meta de deposição de RUB em aterro.

Meta 2020 face a 1995

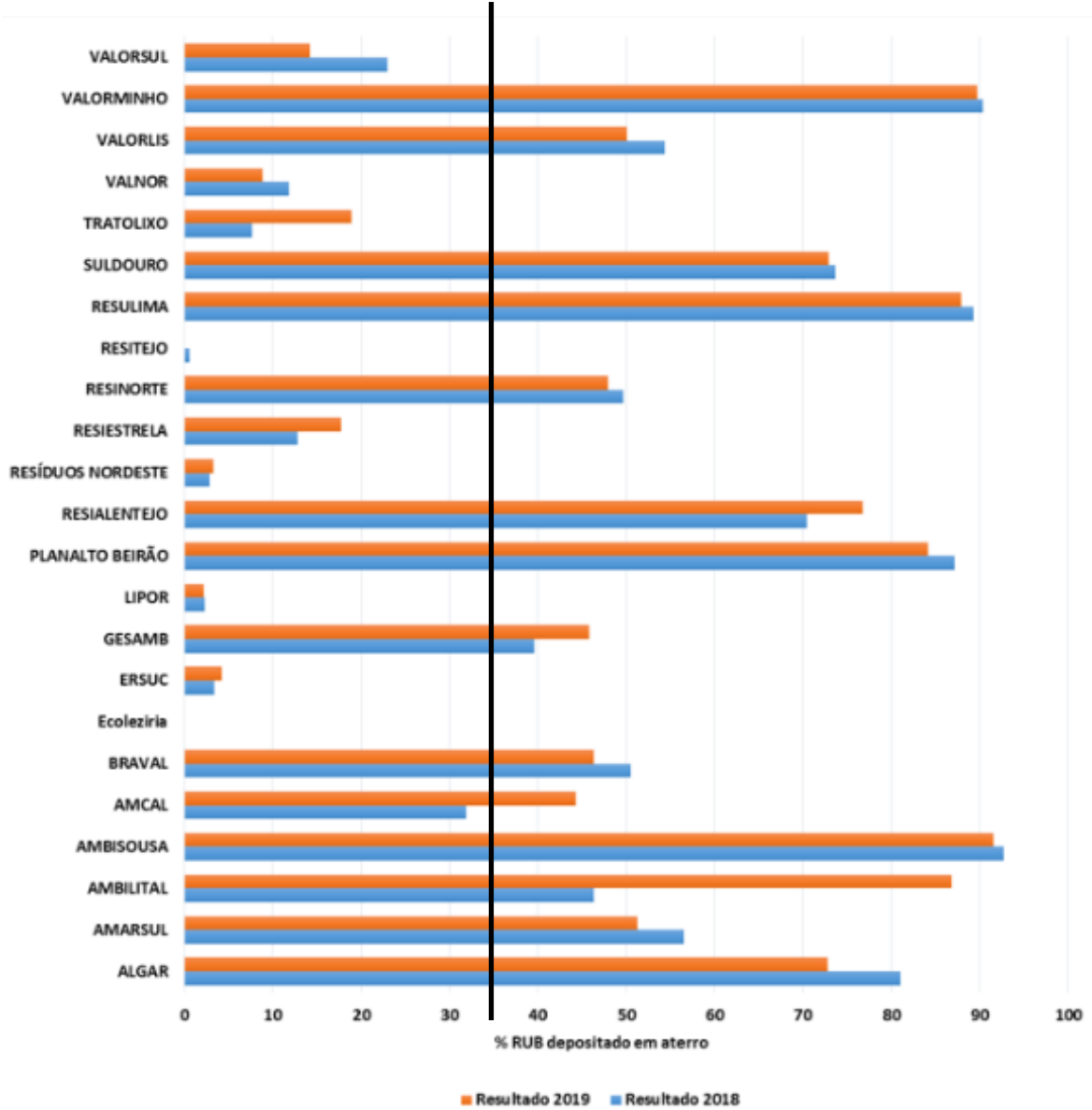


Figura 12. RUB depositados em aterro por SGRU entre 2018 e 2019 (adaptado de Marçal & Ferreira, 2020).

1.1.9. Legislação

O Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de abril, relativa à deposição de resíduos em aterros (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

Segundo a legislação portuguesa, os aterros são classificados por diferentes classes: aterros para resíduos inertes, aterros para resíduos não perigosos e aterros para resíduos perigosos. Esta diferenciação deve-se aos diferentes tipos de resíduos admissíveis em cada classe.

O aterro, em função da sua classe, tem obrigatoriedade de cumprir requisitos técnicos específicos, nomeadamente, requisitos de localização, controlo de emissões e proteção do solo e das águas, estabilidade, entre outros.

Segundo o artigo 11.º, ponto 1, que define os requisitos para a localização/enquadramento do aterro sanitário (independentemente da classe de aterro), a sua instalação pode ser efetuada se inicialmente não corresponder qualquer risco para a saúde humana e, posteriormente, respeitar um conjunto de requisitos mais específicos como: a distância necessária entre o local do aterro e áreas residenciais, recreativas, cursos e massas de água e ainda de zonas agrícolas; é proibida a instalação do aterro em áreas protegidas, zonas costeiras, locais com presença de águas subterrâneas, zonas de cheias ou desabamento de terras, que ponham em risco o património natural e cultural da zona e por fim zonas que não respeitem as condições geológicas e hidrogeológicas do local e sua envolvente.

Relativamente ao ponto 2, que define os requisitos de controlo de emissões e proteção do solo e das águas, menciona que se deve sempre priorizar a preservação de ar, solo e águas subterrâneas ou superficiais, por outro lado, de acordo com a classe de aterro é necessário obedecer a alguns requisitos (Quadro 5).

O sistema de proteção ambiental passivo requer que na camada subjacente ao aterro deva ser instalado uma barreira de segurança passiva, com o propósito de prevenção contra contaminação dos solos, águas subterrâneas e superficiais através dos resíduos ou lixiviados. Estas barreiras requerem características específicas de acordo com as condições geológicas, hidrogeológicas e de permeabilidade do local.

O sistema de proteção ambiental ativo é instalado sobrejacente ao anterior, com os objetivos de impedir infiltrações, captação de águas contaminadas e lixiviados, bem como o tratamento e valorização do biogás produzido.

Quadro 5. Requisitos mínimos a que os aterros devem obedecer (adaptado de Decreto-Lei nº 73/2011 de 11 de Junho)

	Classe do aterro	Aterro para resíduos inertes	Aterro para resíduos não perigosos	Aterro para resíduos perigosos
Sistema de proteção ambiental passivo	Barreira de segurança passiva	Sim	Sim	Sim
Sistema de proteção ambiental ativo	Barreira da impermeabilização artificial		Sim	Sim
	Sistema de drenagem de águas pluviais		Sim	Sim
	Sistema de drenagem e recolha de lixiviados		Sim	Sim
	Sistema de drenagem e tratamento de biogás		*	*
Sistema de selagem final	Camada de drenagem de gases		*	*
	Barreira de impermeabilização artificial			Sim
	Camada mineral impermeável		Sim	Sim
	Camada de drenagem > 0,5m		Sim	Sim
	Cobertura final com material terroso > 1m	Sim	Sim	Sim
Instalações e infra-estruturas de apoio	Vedação	Sim	Sim	Sim
	Portão	Sim	Sim	Sim
	Vias de circulação	Sim	Sim	Sim
	Queimador de biogás		*	*

Nota: (*) indica a necessidade de definir de acordo com o tipo de resíduo admito no aterro.

O ponto 3 é relativo aos requisitos de estabilidade, indicando que a deposição do material no aterro deve ser realizada sempre de modo a garantir a estabilidade da massa e das estruturas associadas, com o objetivo principal de evitar deslizamentos. Indica ainda a necessidade de garantir, aquando da instalação de uma barreira artificial, que o substrato geológico é suficientemente estável para evitar assentamentos que potenciem eventuais danos nessa barreira. Neste aspeto a legislação é bastante genérica não definindo com objetividade que parâmetros a cumprir.

Segundo Cepolina (2009) operação de encerramento de um aterro contempla as ações necessárias para o correto encerramento das atividades operacionais de disposição final de resíduos no empreendimento em relação aos diferentes requisitos envolvidos.

Esta atividade só é possível em casos específicos: quando as condições necessárias previstas no alvará de licença para a operação de deposição de resíduos em aterro estiverem reunidas e após informar as entidades licenciadoras; caso o operador requeira o pedido e na posse da autorização da entidade licenciadora.

Um aterro só pode ser oficialmente encerrado quando a entidade licenciadora emitir a respetiva autorização, mediante a apresentação dos relatórios elaborados pelo operador, bem como após realização de uma inspeção final ao local do aterro.

No pós-encerramento, é necessário o cumprimento de algumas obrigações por parte do operador, nomeadamente, a implementação de medidas de prevenção da poluição, medidas de controlo do aterro (caso sejam detetados efeitos significativamente negativos, deverá notificar-se a entidade licenciadora e a IGAOT, no prazo de 48 horas) e o cumprimento das medidas corretivas definidas, bem como do programa de execução impostos pela entidade licenciadora.

(página propositadamente em branco)

Capítulo II

Estabilidade de aterros sanitários

(página propositadamente em branco)

2. Estabilidade de taludes

A análise de estabilidade de taludes corresponde a uma das análises numéricas mais antigas em engenharia geotécnica.

A necessidade de saber se um projeto se mantém estável ou colapsa é um assunto imperativo na estabilidade de taludes (Silva, 2014) e muito comum nas obras geotécnicas. Estes movimentos podem ser avaliados em duas óticas distintas: geologia ou engenharia geotécnica.

Na ótica da geologia, os movimentos que ocorrem no terreno são processos naturais, por esse motivo, estudam-se os pontos de origem, a sua direção e características estruturais do maciço afetado. Na ótica da engenharia geotécnica, investiga-se a segurança dos taludes baseando-se em modelos matemáticos e princípios mecânicos para uma avaliação da estabilidade de taludes. Um bom estudo de estabilidade de taludes necessita de combinar as duas óticas, a avaliação quantitativa da estabilidade através dos métodos mecânicos, que devem basear-se no conhecimento da estrutura geológica, orientação das camadas, composição e história geomorfológica da superfície topográfica (Silva, 2014).

Um talude é considerado como uma qualquer superfície de terreno inclinado, de origem natural ou antrópica. Existe sempre uma componente gravitacional inerente à estrutura que fará com que o terreno tenda a movimentar-se. Para que esses movimentos ocorram é necessário que as forças gravitacionais ultrapassem a resistência ao corte do terreno. A experiência geológica e geotécnica é muito valorizada na problemática dos taludes em geral, e na análise da sua estabilidade em particular, pois os modelos aos quais se recorre para efetuar as análises de estabilidade, independentemente do grau de complexidade, não explicam a totalidade da realidade geológico-geotécnica da análise de estabilidade (Silva, 2014).

Um problema de análise de estabilidade de taludes é o facto de ser estaticamente indeterminado. Por esse motivo existem diferentes métodos de análise, nomeadamente, por **métodos de equilíbrio limite, métodos de elementos e diferenças finitas**. Estes métodos apresentam uma grande diferença. Enquanto os métodos de equilíbrio limite se baseiam no equilíbrio estático de forças e/ou momentos, os dois últimos são baseados nas relações de tensão-deformação dos materiais.

De seguida, além de explicados os métodos mencionados anteriormente, irão ser apresentados alguns métodos de estabilidade (Silva, 2014).

2.1. Teoria do equilíbrio limite

Os estudos de equilíbrio limite têm como principal objetivo analisar a estabilidade de uma qualquer massa de solo ou rocha, assumindo uma rotura ao longo de uma superfície de rotura potencial (Silva, 2011).

É assumida uma superfície de rotura simplificada e o material acima desta é considerado como um corpo livre. As forças atuantes e as resistentes acima da superfície de rotura são calculadas de modo a permitirem o equilíbrio de forças e momentos da massa potencialmente instável. A solução destas equações permite retirar o fator de segurança global (Chowdhury, 1978). A determinação do fator de segurança pode ser realizada seguindo três abordagens:

1. Equilíbrio de forças

$$FS_f = \frac{\sum F_{estabilizadoras}}{\sum F_{instabilizadoras}} \quad (3)$$

2. Equilíbrio de momentos

$$FS_m = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum F_{instabilizadoras}} \quad (4)$$

3. Equilíbrio limite ao corte

$$FS = \frac{\int \tau_{mobilizável}}{\int \tau_{mobilizada}} \quad (5)$$

Os componentes das forças e os momentos resistentes são considerados positivos se constituem uma obstrução ao movimento da massa de solos (Silva, 2014). A possibilidade de usar diferentes tipos de análise pode resultar em fatores de segurança distintos, problema este que é ultrapassado quando é utilizada a equação de equilíbrio limite ao corte. A avaliação da resistência mobilizável (τ_f) é efetuada com recurso aos critérios de rotura como, por exemplo, o de Mohr-Coulomb.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (6)$$

Em que:

c' é a coesão efetiva (KPa);

σ' é a tensão efetiva (KPa);

φ' é o ângulo de atrito (°).

A resistência mobilizada (τ_{mob}) é dada pela equação:

$$\tau_{mob} = \frac{c' + \sigma' \tan \varphi'}{FS} \quad (7)$$

2.2. Métodos das fatias

O método das fatias corresponde a uma abordagem de resolução das equações da teoria de equilíbrio limite baseada no princípio de dividir o talude em fatias e analisar a estabilidade da massa instável ou potencialmente instável (Fredlund & Krahn, 1977). Este método tem em conta o equilíbrio estático de cada fatia e equilíbrio global de toda a massa individualizada pela superfície de rotura assumida.

Este princípio é usado em muitos dos programas informáticos de análise geotécnica da estabilidade de taludes por permitir uma análise simples e expedita, mas tecnicamente adequada, para geometrias complexas, pois considera a influência externa de carga e condições de solo variáveis.

Desde que foi apresentado, tem sofrido várias alterações por parte de alguns autores que deram o seu toque pessoal no tratamento da informação de cada fatia (Krahn, 2003). O Quadro 6 mostra diferentes autores ao longo dos anos.

Quadro 6. Evolução métodos de fatias.

Época	Métodos
Anos 30	Fellenius (1936)
Anos 50	Janbu (1954) e Bishop (1955)
Anos 60	Morgenstern e Price (1965); Spencer (1966) e Sarma (1973)

Apesar das especificidades de cada um dos métodos, todos têm 4 características em comum (Abramson, et al., 1996):

1. Um fator de segurança baseado nos parâmetros de resistência de corte;
2. As forças incluídas nos métodos de equilíbrio são estaticamente indefinidas;
3. Os parâmetros de resistência são independentes do comportamento tensão-deformação;
4. Todas as equações de equilíbrio são usadas para determinar o fator de segurança;
5. A massa potencialmente instável é considerada como um corpo rígido;

Os métodos de fatias determinam um fator de segurança global que, por definição, é assumido como constante em todos os pontos da potencial superfície de rotura (Krahn, 2003).

O Quadro 7 contempla os métodos mais comuns de análise e as condições de equilíbrio estático que são satisfeitas na determinação do fator de segurança.

Quadro 7. Equações da estática aplicadas (adaptado de Geostudio, 2021).

Método	Momento de equilíbrio	Equilíbrio de forças	
		X	Y
Fellenius	Sim	Não	Não
Bishop simplificado	Sim	Sim	Não
Janbu simplificado	Não	Sim	Sim
Spencer	Sim	Sim	Sim
Morgenstem-Price	Sim	Sim	Sim
Corps of engineers -1	Não	Sim	Sim
Corps of engineers -2	Não	Sim	Sim
Lowe-Karafiath	Não	Sim	Sim
Jambu generalizado	Não	Sim	Sim
Sarma – fatias verticais	Sim	Sim	Sim

Os métodos desenvolvidos ao longo dos anos são muito semelhantes entre si, as diferenças residem essencialmente nas equações de forças e momentos que são consideradas e satisfeitas, quais são as forças inter-fatias que são inseridas e qual a relação entre as forças normal e de corte inter-fatias. O Quadro 8 resume as forças inter-fatias dos métodos, bem como a relação entre si associadas a cada um dos métodos.

Quadro 8. Características e relações das forças entre camadas (adaptado de Geostudio, 2021).

Método	Força normal inter-fatias (E)	Forças de corte inter-fatias (X)	Inclinação da resultante de X/E e a Relação X-E
Fellenius	Não	Não	Não considera forças inter-fatias
Bishop simplificado	Sim	Não	Horizontal
Janbu simplificado	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Sim	Sim	Constante
Morgenstem-Price	Sim	Sim	Variável; função selecionada pelo utilizador
Corps of engineers -1	Sim	Sim	Inclinação de uma linha da crista para o pé do talude
Corps of engineers 2	Sim	Sim	Inclinação da superfície do solo no topo da fatia
Lowe-Karafiath	Sim	Sim	Média da inclinação entre a superfície do solo e a base da fatia
Janbu generalized	Sim	Sim	Linha de impulso e equilíbrio de momento da fatia
Sarma – fatias verticais	Sim	Sim	$X = C + E \tan \emptyset$

O método de Fellenius foi o primeiro a ser desenvolvido. Este método não inclui forças intrínsecas e aplica apenas o momento de equilíbrio. Ao adotar estas suposições simplificadas foi possível calcular um fator de segurança usando cálculos manuais. Foi importante visto que ainda não existiam computadores (Geostudio, 2021).

Mais tarde, Bishop (1955) desenvolveu um esquema que incluía as forças normais entre as fatias, mas ignorava as forças de corte entre as mesmas. Novamente, o método de Bishop simplificado inclui apenas o momento de equilíbrio. O método de Janbu simplificado é idêntico ao método de Bishop simplificado na medida em que inclui as forças normais entre as fatias e ignora as forças de corte entre elas. A diferença entre os métodos é que Janbu simplificado apenas inclui o equilíbrio de forças horizontais, ao contrário do momento de equilíbrio. Mais tarde, os computadores tornaram possível lidar mais facilmente com os procedimentos inerentes aos métodos de equilíbrio limite, o que implicou formulações matemáticas mais rigorosas que incluíam todas as forças intrínsecas e necessidade de satisfazer todas as equações da estática. A partir da aplicação de computadores, surgiram os métodos de Morgenstern-Price e o método de Spencer.

2.3. Método dos elementos finitos

De acordo com vários autores, a publicação mais antiga em que é utilizada a designação “elemento finito” corresponde a um artigo datado de 1960 e tem como autor Ray Clough.

Anteriormente eram já conhecidas algumas técnicas que vieram a ser incorporadas no método dos elementos finitos (MEF), sem este aparecer ainda com as principais características que hoje em dia possui. Os grandes passos do desenvolvimento do MEF, que o conduziram ao formato que atualmente apresenta maior aceitação, foram dados na década de 60 e início da de 70 (Clough, 1960).

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i).

Esta técnica é ilustrada com o seguinte exemplo, que corresponde ao integral de volume de uma função $f(x)$ traduzida pela expressão seguinte:

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (8)$$

Em (9) pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (9)$$

Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (9) para se obter o integral estendido a todo o domínio. Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (por exemplo, segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O somatório indicado em (9) vai dar origem à operação designada assemblagem.

Inicialmente os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros.

Ao contrário de outros métodos que eram utilizados no passado, o MEF só tem utilidade prática se se dispuser de um computador digital. Este requisito é devido à grande quantidade de cálculos que é necessário realizar, nomeadamente na resolução de grandes sistemas de equações lineares. Assim se compreende que o rápido desenvolvimento do MEF tenha praticamente coincidido com a generalização da utilização de computadores nos centros de investigação. Com a proliferação de micro-computadores ocorrida no final da década de 80 e na década de 90, o MEF generaliza-se com aplicação nos diferentes domínios da engenharia (Clough, 1960).

2.4. Método das diferenças finitas (MDF)

O método das diferenças finitas (MDF) corresponde à metodologia dominante para resolução numérica de equações diferenciais e que se baseia numa aproximação por diferenças finitas a partir da série de Taylor da função derivada.

As soluções numéricas das equações diferenciais parciais permitem a resolução de inúmeros problemas complexos de engenharia e geotecnia em particular os associados a análises de tensão-deformação de diferentes materiais.

Pela complexidade do procedimento numérico a aplicação destes métodos seguiu o mesmo caminho dos métodos de elementos finitos, ainda que com algum desfasamento temporal.

2.5. Programa de cálculo SLOPE/W

O programa de cálculo automático SLOPE/W (<https://www.geoslope.com/products/slope-w>) corresponde a um código baseado no método das fatias de resolução das equações da teoria de equilíbrio limite que está no mercado desde 1977. Foi o primeiro produto de *software* geotécnico a estar disponível comercialmente para análise da estabilidade de taludes. Este software disponibiliza ao utilizador um grande número de opções, nomeadamente:

- Geometria – descrição da estratigrafia e formas das superfícies de deslizamento potencial;
- Resistência do solo – parâmetros usados para descrever o a resistência do solo (material);
- Pressão da água dos poros – meio de definir as condições de pressão da água dos poros;
- Reforços ou interação solo-estrutura – geotêxteis, pregagens, ancoragens, estacas, paredes, etc.;
- Cargas impostas – sobrecargas ou cargas dinâmicas e sísmicas.

O SLOPE/W foi desenvolvido para ser uma ferramenta de *software* geral para a análise de estabilidade de uma grande gama de estruturas terrestres. O uso generalizado do programa ao longo de mais de 4 décadas permitiu validar e calibrar todo o procedimento bem como ir acrescentando novas valências aos códigos, como seja o caso de adaptações normativas ou:

- métodos de análise (dispõe de 13 diferentes);
- modelos de rotura (possibilidade de 15 opções);
- técnicas de pesquisa de potenciais superfícies de rotura;
- integração com outros programas de cálculo;
- análise probabilística e determinística.

Pela simplicidade e fiabilidade das metodologias a que recorre o programa de cálculo automático SLOPE/W foi a ferramenta selecionada para desenvolver as análises numéricas incluídas no âmbito desta dissertação.

(página propositadamente em branco)

Capítulo III

Reforço de solos

(página propositadamente em branco)

3. Reforço de solos

3.1. Introdução

A utilização de elementos de reforço melhora o comportamento do solo, pois resulta na transferência de esforços do solo para o reforço. Como principal objetivo para a sua utilização passa por limitar o desenvolvimento de deformações e tensões de tração no solo (Vieira S. A., 2014) e, simultaneamente, aumentam a resistência do maciço. Uma vez que a introdução dos reforços altera a estrutura global do maciço, o seu efeito é essencialmente estrutural.

A Figura 13 mostra o comportamento de um solo sujeito deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão (tração), com e sem reforço.

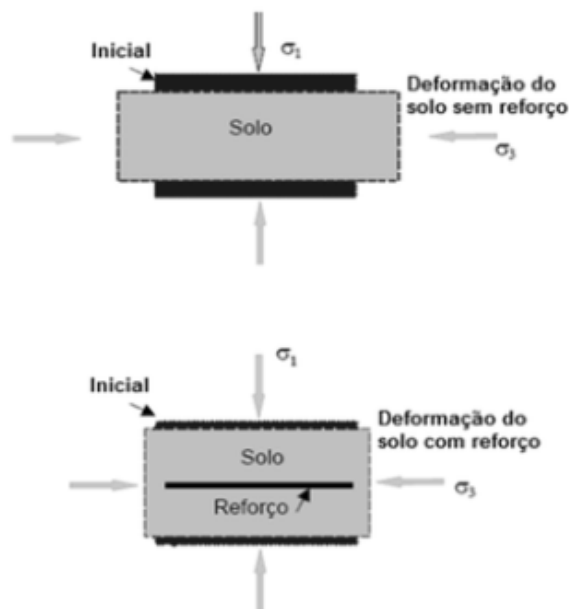


Figura 13. Comparação entre comportamento de solo reforçado e não reforçado (adaptado de Ferreira, 2010).

O conceito de solo reforçado será então um solo onde são colocados elementos (reforços) convenientemente orientados, que pelas suas características melhoram as propriedades mecânicas do novo material quando comparadas com as do solo não reforçado. (Ferreira, 2010).

A aplicação de reforço em taludes de aterro permite maiores inclinações do que seria possível atingir no caso dos reforços não serem implementados (Vieira, 2008).

Comparativamente com outras alternativas o procedimento de reforço dos solos de aterro constitui uma opção com boa relação qualidade-preço (Shukla & Yin, 2006).

3.2. Soluções de reforço

As generalidades das tecnologias de reforço de solos baseiam-se na introdução de inclusões que possibilitam a obtenção de um novo material, compósito, resultante da associação do solo com as mesmas, capaz de resistir a esforços de tração, corte e flexão. Neste processo a deformabilidade das inclusões controla o comportamento das estruturas reforçadas e, por conseguinte, constitui o um parâmetro determinante na conceção de estruturas de solo reforçadas. Segundo esse parâmetro o estado da arte atual considera dois grupos de reforços:

- **Reforços inextensíveis (metálicos):** a mobilização do atrito entre o solo granular e o reforço linear inextensível (Terra Armada e pregagens metálicas, por exemplo) é um fenómeno tridimensional que depende de vários fatores, de entre os quais se destacam as características de dilatância do solo e o estado da superfície dos reforços.
- **Reforços extensíveis (geossintéticos):** quando os reforços são bidimensionais, como no caso dos geotêxteis, a interação solo-reforço já não é um fenómeno tridimensional e, portanto, a dilatância do solo não pode ser impedida como no caso das armaduras lineares. Por outro lado, a deformabilidade dos geotêxteis afeta o mecanismo de transferência de tensões entre o solo e os reforços. Faz-se notar que no caso das geogrelhas, a interação solo-reforço é tridimensional, dado que tem, também, lugar a mobilização do impulso passivo nos elementos transversais das geogrelhas.

Pelo facto dos reforços extensíveis apresentarem uma maior adaptabilidade à variabilidade geométrica característica dos aterros sanitários, considera-se nos estudos do âmbito desta dissertação reforços em geossintéticos.

3.3. Características dos geossintéticos

Geossintético é um termo composto por “Geo + Sintético”, que representa “Terra + Material produzido pelo Homem”. Pode-se classificar este produto como um elemento bidimensional fabricado a partir de polímeros e usado em maciços naturais, solos, rochas ou outros materiais geotécnicos em obras de engenharia (Duarte, 2009).

Apesar de serem matérias relativamente recentes, os geossintéticos têm tido um desenvolvimento muito acentuado (Duarte, 2009). A primeira aplicação de um geotêxtil tecido, como reforço de estradas, foi realizada nos Estados Unidos em 1930 (Beckam & Mills, 1935). Nos anos 40 surgiu o polímero sintético e em 1950 foi datada a primeira aplicação com geotêxtil de fibras sintéticas, na Florida (Barret, 1966). Na Europa a primeira aplicação de geotêxtil tecido foi em 1960 na Holanda (Gicot & Perfetti, 1982) seguiu-se uma segunda aplicação de geotêxtil não tecido em França a 1969 (Vantrain & Puig, 1969). Dado o bom desempenho comprovado em distintas funções o seu uso generalizou-se a nível global e o crescimento das aplicações e produtos tem sido constante até à atualidade.

3.4. Tipos de geossintéticos

Os geossintéticos podem ser divididos em categorias de acordo com o processo de fabrico. Agrupam-se em nove tipos específicos: geotêxteis, georredes, geogrelhas, geomembranas, geocompósitos, geotubos, geocélulas, geoespumas e barreiras geossintéticas argilosas (Vieira, 2014).

Como esta temática trata do reforço de solos, apenas serão abordados os tipos de geossintéticos que desempenham essa função (Quadro 9).

Quadro 9. Geossintéticos que podem desempenhar a função de reforço (adaptado de: (Paula, 2012)).

Função a desempenhar		Geossintético
Reforço	1	Geotêxteis, geogrelha e geocompósitos
	2	Geotêxteis e geocompósitos

Em que 1 apenas desempenha a função de reforço e em 2 além de reforço, pode desempenhar mais funções.

1) Geotêxtil tecido e não tecido

Os geotêxteis não tecidos são fabricados distribuindo os componentes aleatoriamente numa malha, conseguindo uma estrutura plana com uma disposição aleatória dos poros. Os geotêxteis tecidos consistem em fibras sintéticas que formam uma estrutura plana, espessura reduzida e uma disposição regular dos poros (Vieira, 2014). Diferentes tipos de geotêxteis tecido e não tecido podem ser visualizados na Figura 14.

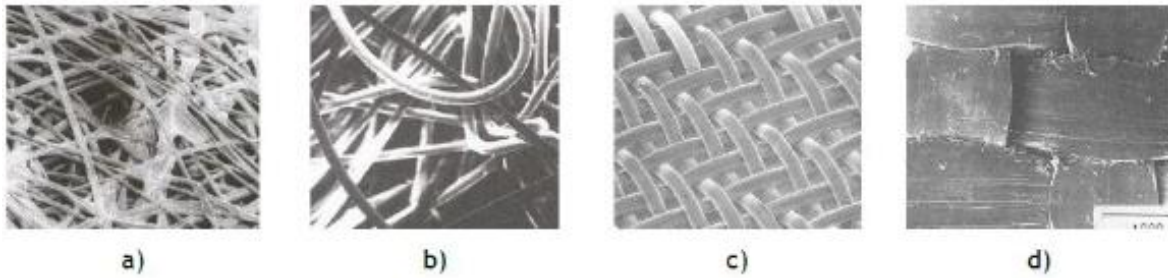


Figura 14. Diferentes tipos de geotêxteis, em que a) e b) geotêxteis não tecido; c) e d) geotêxteis tecido (adaptado de Paula, 2012).

2) Geogrelhas

As geogrelhas são estruturas poliméricas planas que contêm uma malha de elementos ligados entre si (Vieira, 2014). As geogrelhas são fabricadas num processo que consiste na união de centenas de fibras para obtenção de barras longitudinais e transversais, separadas por grandes aberturas (Paula, 2012). A Figura 15 mostra alguns tipos de geogrelhas existentes no mercado.

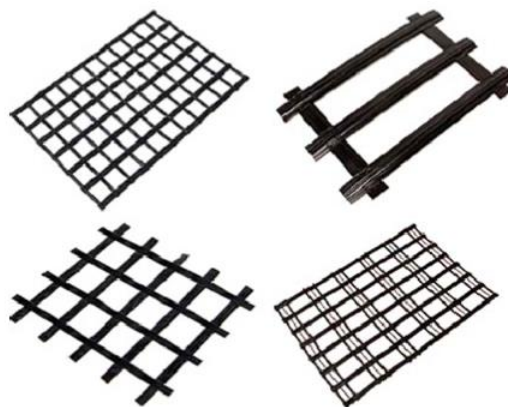


Figura 15. Exemplos de geogrelhas (adaptado de Medeiros, 2008).

3) Geocompósitos

Os geocompósitos são geossintéticos obtidos através da combinação de dois ou mais materiais, em que, pelo menos, um deles é um geossintético. Estes materiais são classificados de acordo com as funções que vão desempenhar (Vieira, 2014).

Os geocompósitos de reforço podem ser de diferentes tipos, por exemplo, fibras de elevada resistência tecidas sobre um geotêxtil não tecido (Paula, 2012).

De todos os geossintéticos apresentados anteriormente aquele que, geralmente, corresponde a um menor custo será sempre o geotêxtil. Essencialmente por esta razão foi o tipo de geossintético selecionado para análise do seu impacto no caso de estudo.

3.5. Conceitos de dimensionamento de taludes com reforço com geossintéticos

O dimensionamento de taludes de solo reforçados com geossintéticos implica a verificação dos estados limites últimos e de utilização, quer para o equilíbrio interno como externo (Vieira S. A., 2014). Neste processo é imperativo verificar todos os mecanismos de rotura possíveis, nomeadamente, através de deslizamentos que intercetem a zona reforçada ou não e roturas através do deslizamento ao longo das camadas de geossintético.

No que diz respeito aos estados de utilização as deformações têm que ser limitadas para que os deslocamentos que ocorram sejam suportados pela estrutura reforçada (Paula, 2012).

A Figura 16 mostra os diferentes mecanismos de rotura, bem como algumas potenciais deformações possíveis de instalação numa estrutura reforçada.

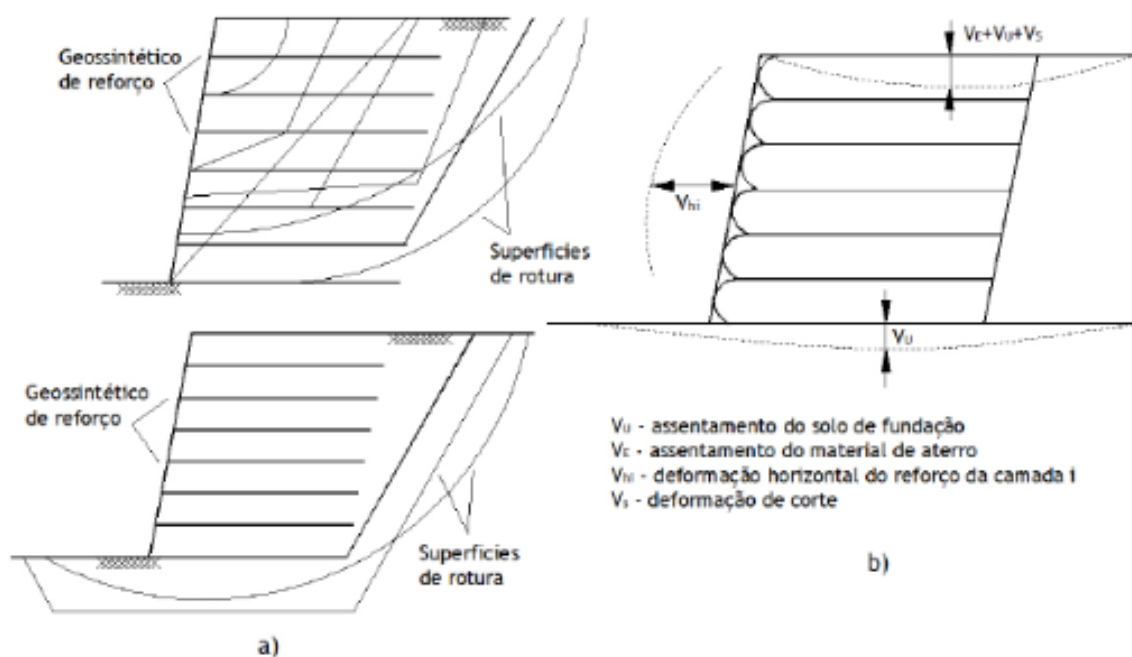


Figura 16. Dimensionamento de taludes reforçados com geossintéticos, em que: a) possíveis mecanismos de rotura e b) deformações possíveis (adaptado de Paula, 2012).

Conforme já referido, nos estudos desenvolvidos no âmbito desta dissertação recorreu-se ao programa comercial SLOPE/W para verificação dos taludes reforçados com geossintéticos no caso de estudo, que será detalhada nos capítulos seguintes.

(página propositadamente em branco)

Capítulo IV

Caso de estudo

(página propositadamente em branco)

4. Caso de estudo

4.1. Enquadramento geral

A Braval é a empresa responsável pela gestão dos RSU provenientes de 6 municípios, concretamente: Braga, Póvoa de Lanhoso, Vieira do Minho, Vila Verde, Amares e Terras de Bouro. (ver Anexo III).

O sistema promove a gestão dos resíduos produzidos por aproximadamente 287 367 habitantes, distribuídos por uma área total de 1 121 km^2 (ver Anexo IV).

As instalações do Ecoparque da Braval, são constituídas por um aterro sanitário, uma estação de triagem de resíduos, um ecocentro, uma unidade de valorização de biogás, uma unidade de tratamento mecânico, uma central de valorização orgânica e outras instalações e equipamentos necessários ao funcionamento de todo o sistema. Algumas dessas instalações ilustram-se na Figura 17.



Figura 17. Instalações ecoparque Braval, em que: a) Aterro sanitário; b) Estação de triagem; c) Unidade de tratamento mecânico e central de valorização orgânica; d) Ecocentro; e) Unidade de valorização de biogás; f) Estação de tratamento de lixiviados.

As instalações do ecoparque Braval estão implementadas numa área de aproximadamente 27 hectares. A distribuição espacial das mesmas pode ser visualizada na Figura 18.

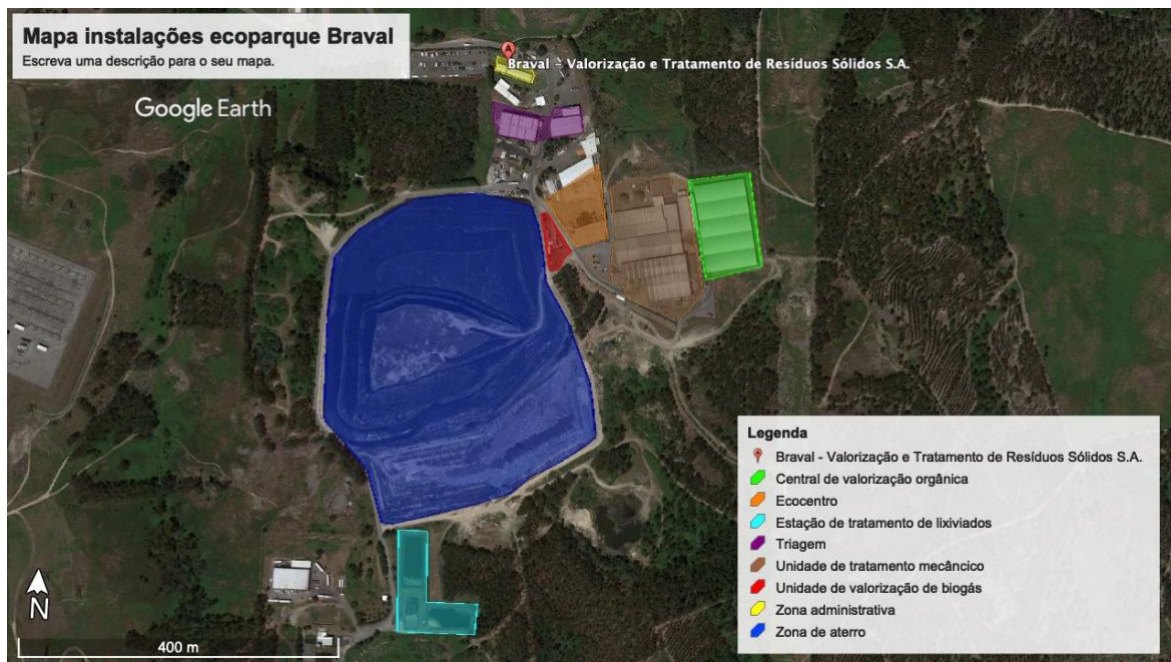


Figura 18. Mapa instalações ecoparque Braval 2021 (Google Earth, 2021).

O aterro é constituído por três células (Figura 19). Duas dessas células encontram-se já encerradas com a impermeabilização final, é o caso das células 1 e 3. A célula 2 é a única que ainda não está fechada mantendo-se operacional.



Figura 19. Células aterro Braval (Google Earth, 2021).

O esgotamento da capacidade da única célula do aterro em exploração, induziu a necessidade de dar início ao processo de ampliação do aterro. O projeto dessa intervenção correspondente à construção de uma nova célula, desenvolvendo-se em paralelo à célula 2 e de forma independente. Prevê ainda a exploração de todas as restantes unidades operacionais que integram o ecoparque.

A nova célula de aterro foi dimensionada para uma capacidade adicional de cerca de 820 000 m^3 , o que corresponde a um tempo de exploração de aproximadamente 8,2 anos, como evidencia o Quadro 10.

Quadro 10. Resumo da capacidade de deposição adicional e programação previsual temporal da exploração da célula de ampliação.

Área total terreno destinada ao alargamento	<i>ha</i>	~ 4,5
Área da célula de ampliação do aterro	m^2	32 625
Volumes de encaixe	m^3	~ 820 000
Densidade dos resíduos	ton/m^3	0,90
Capacidade adicional de deposição	<i>ton</i>	~ 740 000
Resíduos anuais depositados	m^3	~100 000
Tempo de vida adicional de exploração	<i>anos</i>	8,2

O terreno disponibilizado para o projeto de alargamento do aterro perfaz uma área total de cerca de 4,5 hectares (Figura 20), onde será construída a nova célula que será dividida em dois alvéolos.

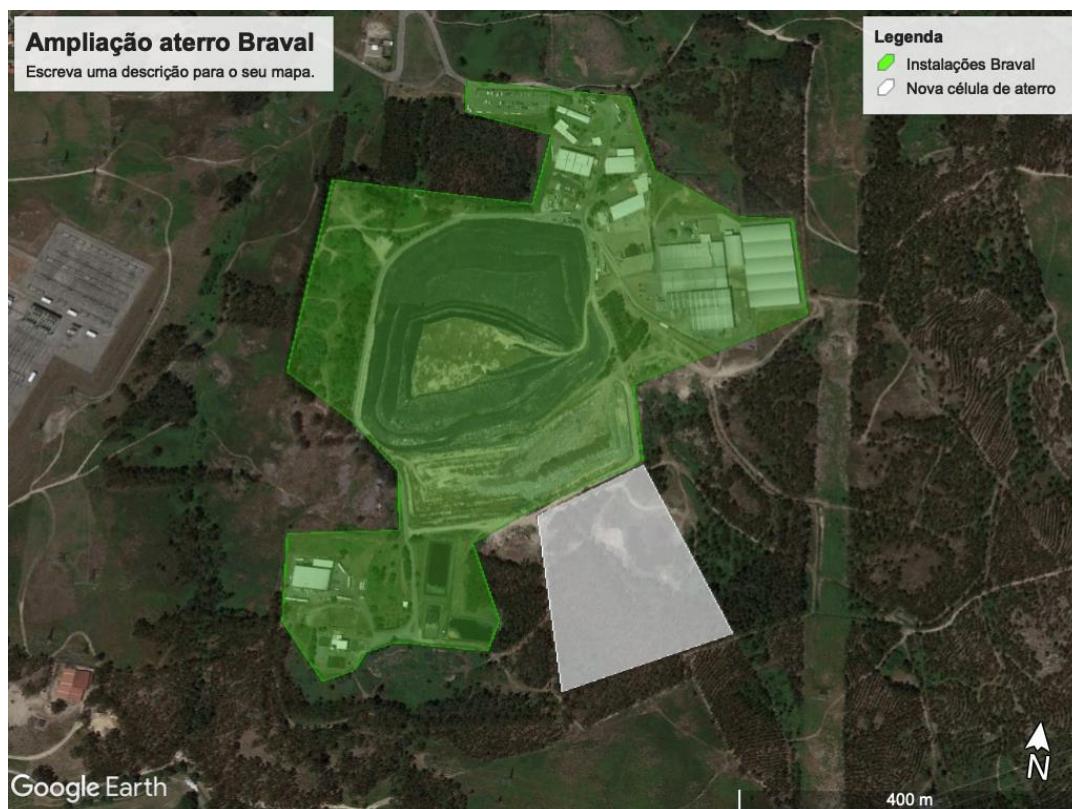


Figura 20. Localização nova célula de ampliação aterro Braval (Google Earth, 2021).

A superfície do terreno para a nova célula varia sensivelmente entre as cotas 405m e 415m sendo estimado um volume de aproximadamente $309\ 000\text{m}^3$ para a escavação e de cerca de $128\ 500\text{m}^3$ para aterro técnico.

A área destinada para a célula de ampliação do aterro é recoberta por vegetação rasteira e árvores de grande porte, maioritariamente eucaliptos. Conta ainda com uma pequena lagoa de baixas profundidades resultante da acumulação de águas devido à topografia do local (Figura 21).



Figura 21. Ponto de observação para área de nova célula ampliação de aterro (foto tirada por autor, 06/07/2021)

Contudo, o projeto de ampliação está a ser objeto de entraves por parte das entidades licenciadoras pelo facto do local previsto para implantação da nova célula se encontrar numa zona parcialmente protegida. Por esse motivo o problema de falta de espaço para deposição de material permanece e, com o passar do tempo, agrava-se.

Com o intuito de minimizar o impacto da situação, foi efetuada uma escavação (Figura 22) numa zona lateral do aterro.



Figura 22. Escavação realizada para remediação do problema de deposição de resíduos (foto tirada por autor, 06/07/2021).

Esta obra irá permitir um aumento de vida útil da célula em exploração de apenas alguns meses, sendo assim uma medida de recurso. A escavação corresponde a uma extensão da célula 2. Por esse motivo foi designada de célula 2.1. Todas as células do aterro podem ser visualizadas na Figura 23.



Figura 23. Células aterro Braval com incremento da célula 2.1 (Google Earth, 2021).

Para uma melhor visualização do aterro, o Anexo V contém o registo fotográfica de vários pontos ao longo da estrutura.

4.2. Caracterização geológica

A área do aterro sanitário é caracterizada pela presença de corpos graníticos de diferentes fácies, os predominantes são o “Granito de Briteiros” e o “Granito de Braga” (Figura 24).

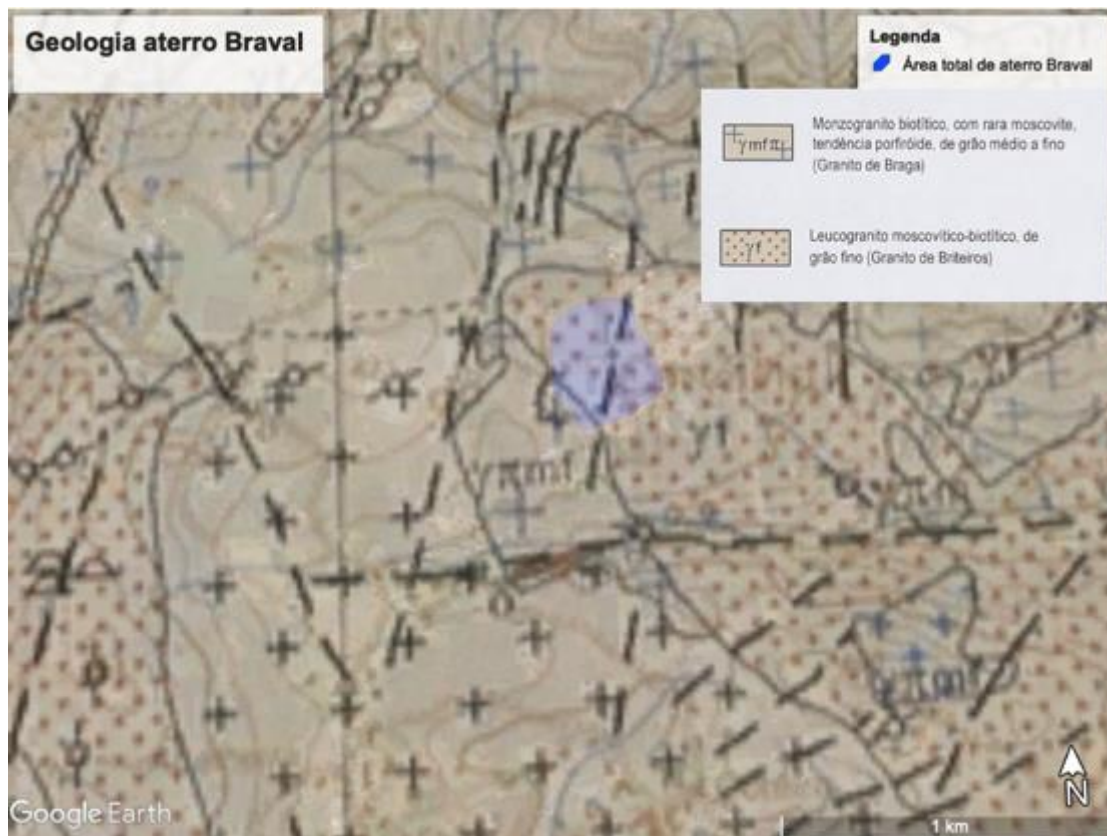


Figura 24. Geologia aterro sanitário Braval (Google Earth, 2021).

Relativamente ao granito de Briteiros (Figura 25), embora possa apresentar alguma variabilidade da sua granularidade, corresponde a um leucogranito, de duas micas e grão fino. Neste litótipo, podem observar-se alguns encraves metassedimentares não se evidenciando qualquer tipo de deformação.



Figura 25. Granito de Briteiros (foto tirada por autor, 06/07/2021)

O Granito de Braga, por sua vez, corresponde a um monzogranito biotítico, com rara moscovite, de tendência porfiróide, com fenocristais de feldspato e com grão médio a fino.

4.2.1. Estado de fraturação

Verificou-se que o estado de fraturação que afeta as fácies graníticas, embora com algumas diferenças pontuais, é condicionado pela presença de três famílias principais de diáclases: ENE-WSW, NNW-SSE a NW-SE e NNE-SSW.

A densidade de fraturação, embora variável de local para local, mostra que, em termos superficiais, se está em presença de uma densidade da ordem de F3-F4. Ou seja, as fraturas encontram-se relativamente próximas entre si, com uma distância da ordem de 1 metro.

Verifica-se ainda que ocorrem, com frequência, corredores onde a fraturação é mais intensa, pelo que, nestes corredores, o espaçamento entre fraturas é bastante mais reduzido entre si. Estes corredores orientam-se entre os azimutes NNW-SSE a NW-SE.

Salienta-se também que esta densidade de fraturação tem tendência para diminuir em profundidade. Ou seja, tendo um maciço granítico menos fraturado, será mais difícil de desmontar, sensivelmente a partir dos 3 a 4 metros abaixo da superfície atual.

4.2.2. Estado de alteração

A avaliação efetuada ao estado de alteração da área em análise caracteriza-se pela presença de solos residuais graníticos que, como se depreende do enquadramento do local, resultam da alteração supergénica das litologias que constituem o substrato (Figura 26).



Figura 26. Litologia do substrato (foto tirada por autor, 06/07/2021).

A expressão destas alterações, também variável de local para local, sendo controlada pela interação de distintos fatores, entre os quais assumem maior relevância a fraturação, a circulação de águas pluviais ao longo das superfícies de descontinuidades e a relação entre a meteorização e a erosão.

É possível identificar quatro camadas de alteração:

- Camada superficial – camada rica em material orgânico que, nas zonas mais favoráveis pode atingir cerca de 1,5 metros de espessura e nas zonas menos favoráveis, pode nem existir;
- Camada de saibro granítico – constituído por material granular friável que pode atingir cerca de 5 metros de espessura e nas zonas favoráveis, conservando ainda a estrutura e textura da rocha-mãe;
- Camada de transição – definida entre a camada rica em saibro e a rocha mãe, caracterizada pela existência de blocos graníticos (rocha sã) de dimensões variáveis envoltos em material saibrento em estado friável. Esta camada pode atingir uma espessura superior a 5 metros;
- Rocha-mãe – substrato granítico em que as litologias se encontram num estado de alteração e fraturação pouco acentuado.

4.3. Caracterização geotécnica

Para a caracterização geotécnica da área do aterro será necessário ter em conta as características definidas anteriormente.

A nível de escavabilidade das camadas de alteração definidas:

- as camadas mais superficiais (camada superficial, camada de saibro granítico, camada de transição) podem ser removidos com recurso a meios mecânicos ligeiros do tipo retroescavadora ou pá giratória;
- a camada mais profunda (rocha-mãe) terá que ser removida com recurso a meios mecânicos mais pesados (martelo demolidor) ou por meio de explosivos.

Os ensaios laboratoriais, de caracterização e de identificação, realizados sobre amostras dos diferentes horizontes de solo colhidas na área permitiram verificar que, de uma forma geral, estes se enquadram no domínio das areias. Por esse motivo não poderão ser utilizados para a constituição de barreiras de proteção passiva relativamente à proteção de solos e águas subterrâneas.

4.4. Caracterização hidrogeológica

A nível hidrogeológico a área caracteriza-se por apresentar um nível freático com uma variação sazonal acentuada entre a época húmida e a época seca.

A monitorização realizada, a partir de piezómetros distribuídos pela área do aterro, permitiu registar variações sazonais com uma amplitude superior a 13 metros. Registou-se um nível freático na época húmida de cerca de 4,70 metros, relativamente à época seca foi registado um valor na ordem dos 17,80 metros.

O escoamento subterrâneo das águas, que acompanha a topografia do local, faz-se preferencialmente de Norte para Sul de acordo com o declive apresentado pela vertente da Serra do Carvalho e transversalmente à cumeada desta serra onde se encontra o aterro.

Conforme já mencionado, os materiais locais não apresentam características hidráulicas que permitam a sua implementação como sistema de proteção ambiental passiva uma vez que o coeficiente de permeabilidade, neste tipo de formações, é superior a $1 \times 10^{-9} m/s$.

4.5. Caracterização gerais do aterro

A Braval recebe diariamente cerca de 300 toneladas de resíduos, que têm que ser depositados no aterro. O Quadro 11 mostra os áreas e volumes de ocupação das células.

Quadro 11. Áreas e volumes de cada célula do aterro Braval.

Resíduos recebido (ton/dia)		300	
		Área (m ²)	Volume (m ³)
Células	1	13 785	223 370,4
	2	13 680	171 525,4
	2.1	1 292	---
	3	75 117	1 442 103
		Total	1 836 998,8

Não é possível indicar o valor do volume relativo à célula 2.1 porque ainda se encontra em processo de construção, não contendo qualquer tipo de material depositado.

A deposição de resíduos em aterro é feita através de caminhões, que inicialmente são pesados à entrada das instalações, e posteriormente se deslocam para o local de descarga e espalhamento (Figura 27).



Figura 27. Percurso de descarga dos resíduos (Google Earth, 2021).

A descarga e espalhamento é efetuado com o auxílio de uma retroescavadora e bulldozer (Figura 28). Posteriormente com um cilindro tipo “pé-de-carneiro” os resíduos são compactados.



Figura 28. Zona de descarga de resíduos (foto tirada por autor, 06/07/2021).

A falta de espaço útil leva à acumulação anormal de resíduos em determinadas áreas, o levantamento topográfico realizado a junho de 2021 ajuda a perceber a grande quantidade de material acumulado na zona de transição entre as células 1 e 2 (Figura 29).

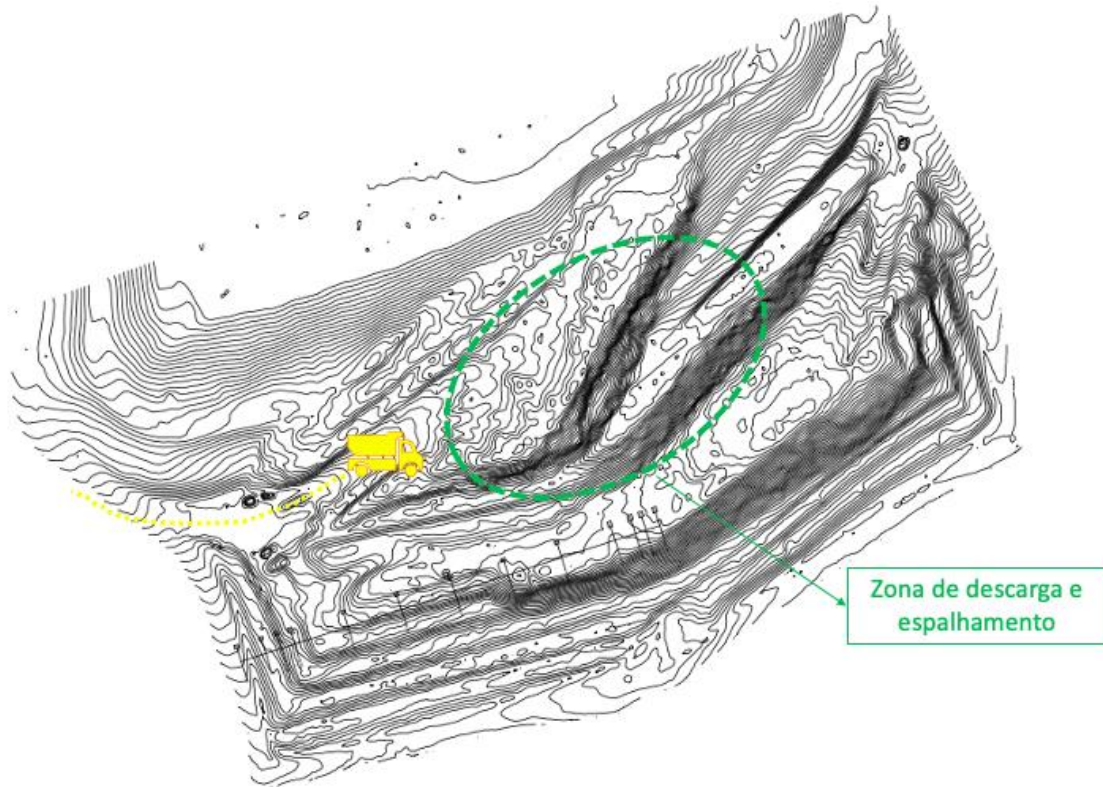


Figura 29. Representação da zona de descarga e espalhamento dos resíduos no levantamento topográfico 2021.

Estas zonas de grandes acumulações de material, sem muito controlo estrutural, comportam grandes riscos de estabilidade de taludes. Nomeadamente, associadas a quedas de material para bancadas subjacentes e, em casos mais extremos, a própria rutura total do talude.

Outras zonas de acumulação excessiva de material são também nítidas no levantamento topográfico. Por exemplo, na célula 2 (Figura 30), as camadas subjacentes já não têm qualquer tipo de geometria regular, o que indicia a queda de resíduos para bancadas inferiores.

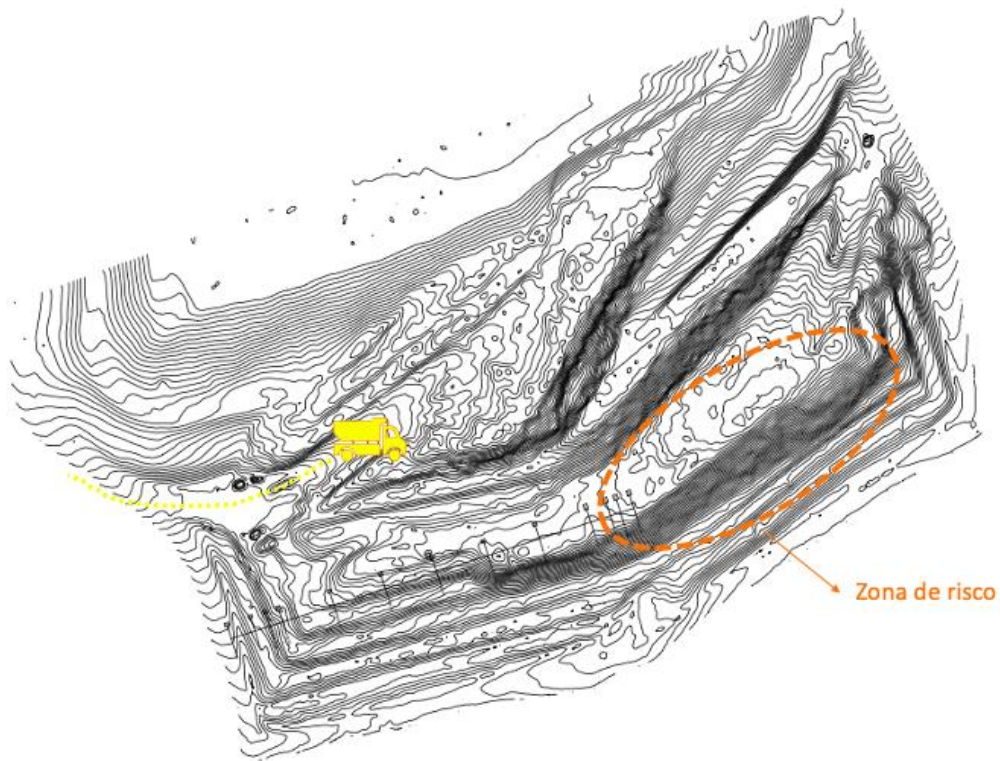


Figura 30. Representação da queda de resíduos entre bancadas na célula 2 segundo levantamento topográfico 2021.

Essa queda de resíduos entre bancadas é facilmente identificada através da Figura 31.



Figura 31. Queda de resíduos entre bancadas na célula 2 (foto tirada por autor, 06/07/2021).

4.6. Conclusões

As descrições da infraestrutura atrás desenvolvidas permitem concluir que a mesma está significativamente limitada em termos de capacidade e de vida útil. Por outro lado, e essencialmente por essas razões, a exploração tem conduzido à geração de locais cuja estabilidade possa estar comprometida. É neste enquadramento que se considera pertinente o desenvolvimento das análises de estabilidade que se apresentam no capítulo seguinte.

(página propositadamente em branco)

Capítulo V

Análises de estabilidade

(página propositadamente em branco)

5. Análise de estabilidade

5.1. Estabilidade dos taludes do caso de estudo

5.1.1. Perfil analisado

Devido às condições apresentadas, foi selecionado um perfil da célula 2 para realização das análises de estabilidade de taludes do aterro sanitário. Esta célula é caracterizada pela reduzida estabilidade estrutural com registos da queda de resíduos para bancadas com cotas inferiores.

O mais recente levantamento topográfico da célula em estudo (ver Anexo VI) permitiu a esquematização do perfil de cálculo constante na Figura 32.

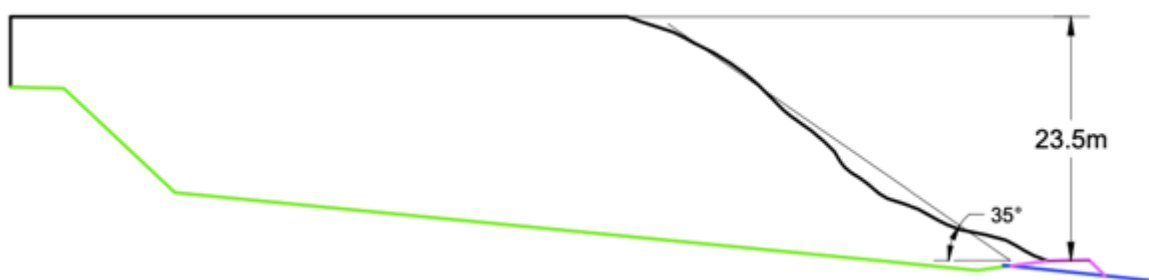


Figura 32. Esquematização do perfil de cálculo.

A seleção do local para realização do perfil corresponde à zona mais central da célula 2 e onde a quantidade de queda de resíduos para zonas subjacentes é mais representativa. A definição do perfil teve em conta a perpendicularidade relativamente à face frontal da célula.

Esta célula conta assim com uma altura de aproximadamente 23,5 metros, inclinação média com a horizontal de 35° e com cerca de 140 metros de comprimento.

5.1.2. Geologia subjacente ao perfil

Através das sondagens realizadas na zona envolvente à célula 2 (ver Anexo VII) foi possível identificar as camadas geológicas subjacentes à mesma.

Foram realizadas 17 sondagens, mas apenas foram analisados os resultados das sondagens nº 1 e nº 5 por serem as mais próximas da zona de estudo. Os resultados das sondagens mencionadas encontram-se no Anexo VIII.

Através análise dos resultados das sondagens mais próximas da célula, foi possível esquematizar as camadas geológicas (Figura 33).

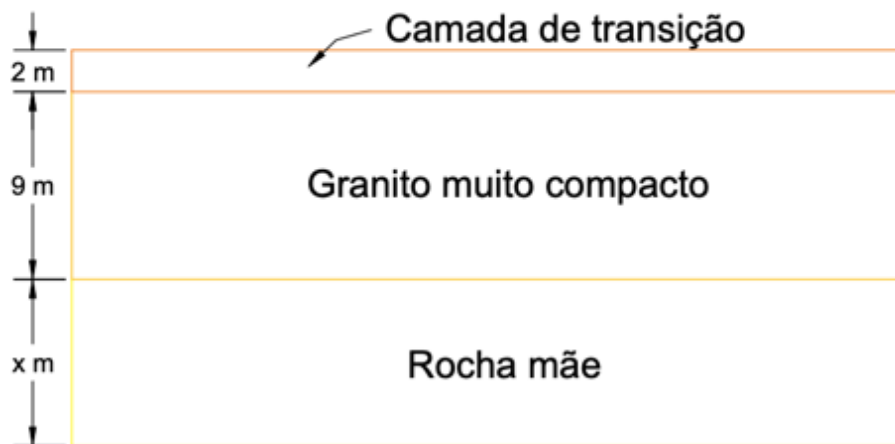


Figura 33. Geologia subjacente à célula 2 do aterro

A maioria dos acidentes que ocorrem em estruturas de aterro estão associadas à rutura de fundação devido à presença de materiais com reduzida resistência. Por esse motivo considerou-se nas análises que as camadas de terra vegetal e saibro granítico foram removidas do esquema, assentando assim o aterro na primeira camada com capacidade de suporte (Figura 34).

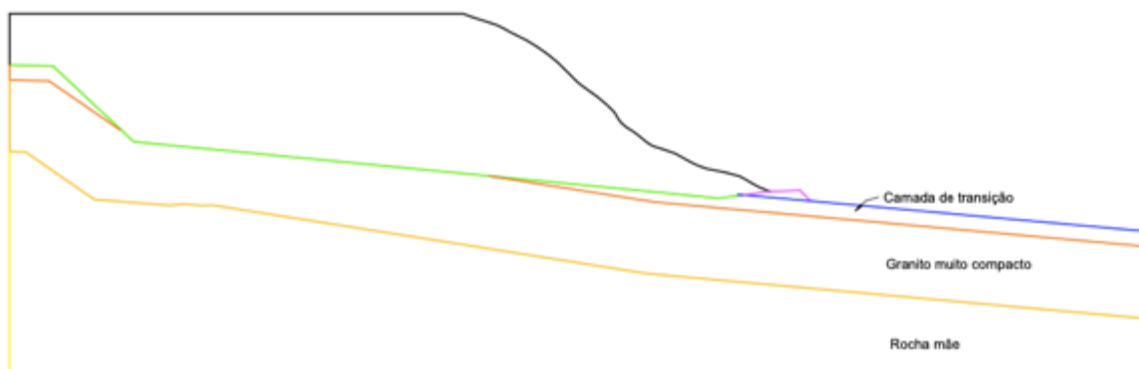


Figura 34. Talude do aterro atual com respetiva geologia.

A geometria do terreno natural (azul) e a linha de escavação (verde) foram obtidas através do projeto de ampliação de 2011. O perfil vertical 10 (V10) atravessa exatamente a zona onde se realizou o perfil de cálculo da situação atual (ver Anexo IX).

O perfil da Figura 34 resulta do ajuste entre a sobreposição do perfil de aterro e o perfil de terreno natural e de escavação. (ver Anexo X).

O programa de exploração do aterro sanitário prevê o espalhamento de camadas de solo entre resíduos que funcionam, essencialmente, como estabilizadores estruturais e inibidores de odores. A Figura 35 representa o perfil do talude atual com a representação das camadas de solo entre as camadas de resíduos.

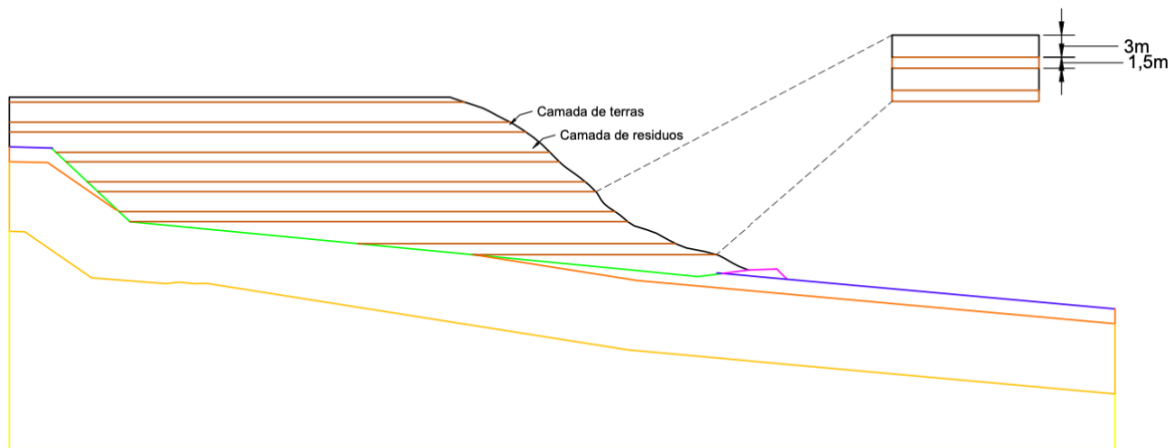


Figura 35. Talude existente com representação de camadas de terras entre resíduos.

No caso do aterro da Braval, a relação entre resíduos-solos é de 2 para 1, ou seja, para uma altura igual a 3 metros de resíduos, é aplicado 1,5 metros de solos.

5.1.3. Análise de estabilidade através do programa de cálculo slope/w

1) Parâmetros de cálculo

Para a análise da estabilidade do talude por recurso ao programa slope/w foi necessário definir, para cada material, os valores dos parâmetros: peso específico (γ_d), coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).

Através de consulta bibliográfica, as camadas geológicas foram as primeiras a serem parametrizadas. O Anexo XI mostra as referências bibliográficas consultadas para definir os valores dos parâmetros mecânicos para o solo da bancada de disfarce (aterro periférico da base e envolvente da célula) e geologia subjacente ao aterro.

O Quadro 12 mostra os valores adotados para cada material indicado anteriormente.

Quadro 12. Valores dos parâmetros mecânicos definidos para geologia e bancada de disfarce.

Materiais	Parâmetros		
	Peso específico (KN/m^3)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (ϕ)
Solos bancada de disfarce	16	10	25
Camada de transição	20	30	40
Granito muito compacto	26	250	31
Rocha mãe	27	300	35

Sendo os resíduos um material muito heterogêneo e não havendo resultados de ensaios específicos caracterizadores dos mesmos, foi realizada uma retroanálise para a definição de valores dos parâmetros mecânicos correspondentes (Quadro 13). Tal metodologia parte do pressuposto de base que o talude está em instabilidade eminente (coeficiente de segurança global próximo de 1 ($FS \approx 1$)) para, mediante um processo iterativo, determinar os parâmetros mecânicos que conduzem a essa situação de estabilidade. Recorda-se que a rotura iminente não se afasta muito da situação do talude atual uma vez que das inspeções locais efetuadas tonou-se evidente as inúmeras zonas de queda de materiais que a próprio perfil da Figura 35 traduz através das irregularidades da superfície do talude (sobretudo ao nível da base). Foi definido previamente um valor como representativo do estado do talude de $FS = 1,05$. Partindo desta ordem de valor no Quadro 13 apresenta-se a gama de variação dos diferentes parâmetros adotados no processo iterativo da retroanálise.

Quadro 13. Resumo do processo iterativo para parâmetros mecânicos dos resíduos.

Peso específico (KN/m^3)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito ($^\circ$)	FS
[11 – 15]	[5 – 9]	[25 – 30]	[1,01 – 1,08]

Os intervalos apresentados correspondem à variação [Mínima – Máxima] dos valores avaliados na retroanálise para os parâmetros mecânicos e os resultados para os correspondentes fatores de segurança. A escolha da combinação teve em conta o valor do FS, mas também a relação de coerência do mesmo. A tabela com a análise mais completa pode ser visualizada no Anexo XII. Por outro lado, o Quadro 14 menciona os valores resultantes e adotados para os parâmetros mecânicos dos resíduos a usar nos cálculos subsequentes.

Quadro 14. Valor dos parâmetros utilizados para os diferentes materiais.

Material	Parâmetros		
	Peso específico (KN/m^3)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito ($^\circ$)
Resíduos	13	6	27

A Figura 36 apresenta a modelação do talude existente na atualidade e os resultados finais da retroanálise.

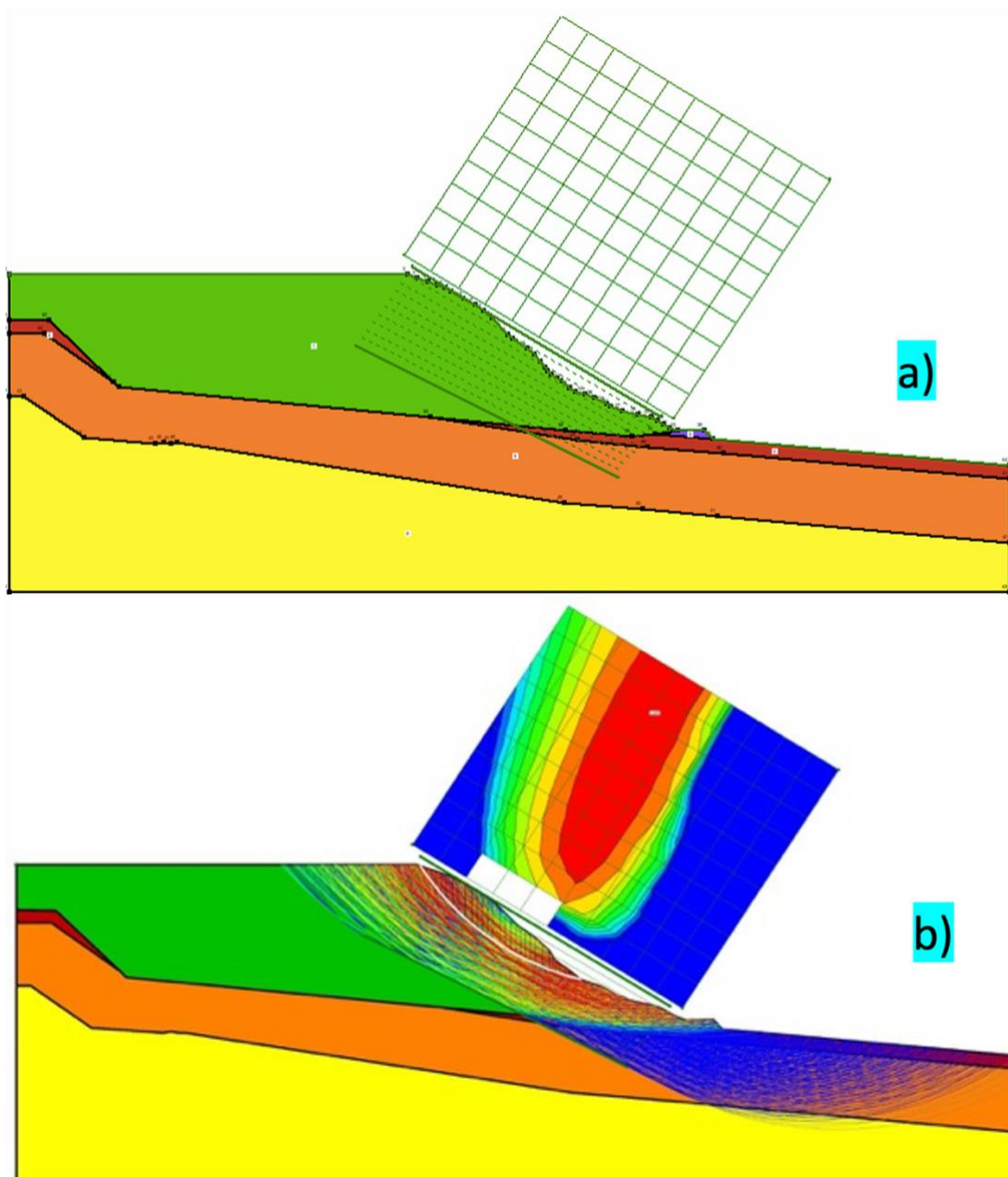


Figura 36. Talude situação atual no slope/w, em que: a) modelo e b) resultados da retroanálise.

Para todos os modelos inseridos no slope/w foram definidos 10x10 centros (quadrículas) e 10 raios (linhas paralelas), resultando assim numa análise com 1000 potenciais superfícies de rotura. Através da análise da Figura 36 é possível observar a superfície de corte (linha branca na secção dos resíduos), bem como as superfícies mais e menos críticas (vermelha e azul, respetivamente). Foi obtido um fator de segurança de 1,047 que procura refletir as condições de estabilidade da situação atual.

De forma a simplificar a geometria do perfil de cálculo, nas análises seguintes considerou-se o aterro com a sua inclinação média de 35° (Figura 37), para o qual foi obtido um valor para o fator de segurança de 1,086.

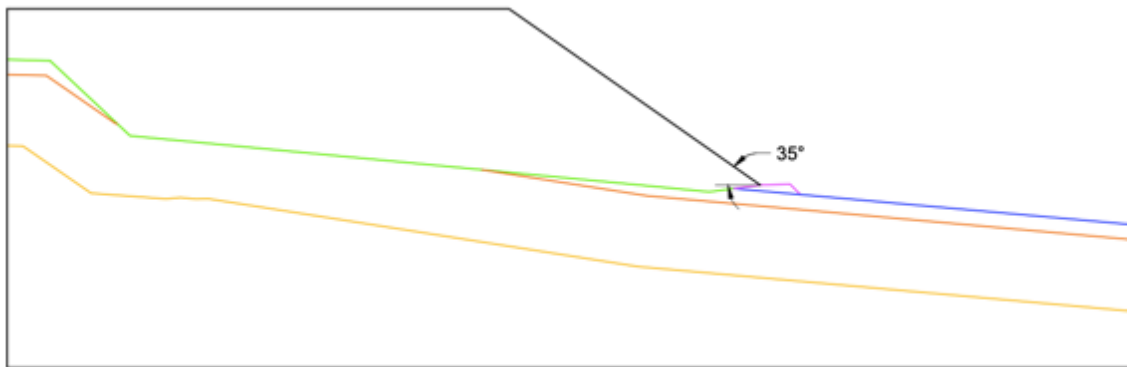


Figura 37. Modelo atual para simplificação de cálculo.

Como o fator de segurança obtido para a inclinação existente é reduzido, procurou-se saber para que inclinação a estrutura estaria em segurança ($FS \geq 1,5$), utilizando os parâmetros definidos anteriormente. Conclui-se que a inclinação máxima para a talude será da ordem dos 24° de inclinação, para um fator de segurança de aproximadamente 1,55. Esta ordem de grandeza da inclinação dos taludes corresponde ao valor correntemente adotado no estado da arte para a inclinação dos taludes de aterros sanitários de $V/H=1/2$ (aproximadamente $26,5^\circ$) o que permite concluir que todo o processo de retroanálise é válido. Ou seja, pode-se concluir que o talude inicial de projeto teria a inclinação média de cerca de 25° e o processo de exploração, devido às necessidades de aumento de capacidade, foram aumentando gradualmente a inclinação do talude atual.

A Figura 38 compara o fator de segurança da situação atual (35° simplificado) com o talude de 24° .

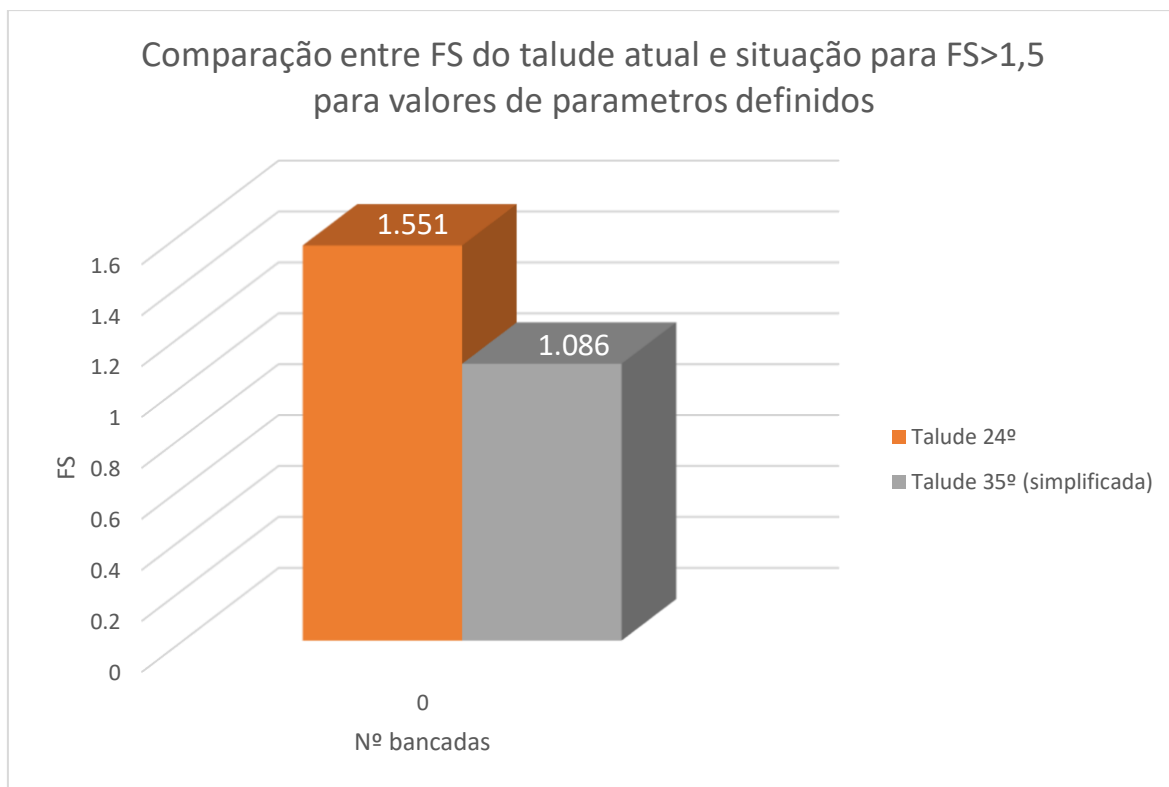


Figura 38. Relação entre FS do talude atual e situação para FS $\geq 1,5$ para valores de parâmetros definidos.

Conforme premissas do presente estudo o objetivo será avaliar soluções que proporcionem o incremento de volume da célula e que, simultaneamente, garantam a sua estabilidade em serviço dentro dos parâmetros recomendados.

5.2. Possíveis soluções de incremento de volume

Foram seguidas duas vias de abordagem ao problema de incremento de capacidade de encaixe e consequente aumento de vida útil do aterro:

- Criação de um aterro de raiz;
- Reperfilamento de taludes existentes.

5.2.1. Estabilidade de taludes de um aterro realizado de raiz

Foi avaliado o fator de segurança para as inclinações de 35°, 45°, 55° e 65° com os parâmetros estabelecidos anteriormente. Cada inclinação foi ainda subdividida em modelos com 0, 1 e 2 bancadas.

De forma esquemática, e com o objetivo de uma visualização das geometrias dos diferentes modelos analisados, a Figura 39 exemplifica o exemplo do talude com inclinação de 55°.

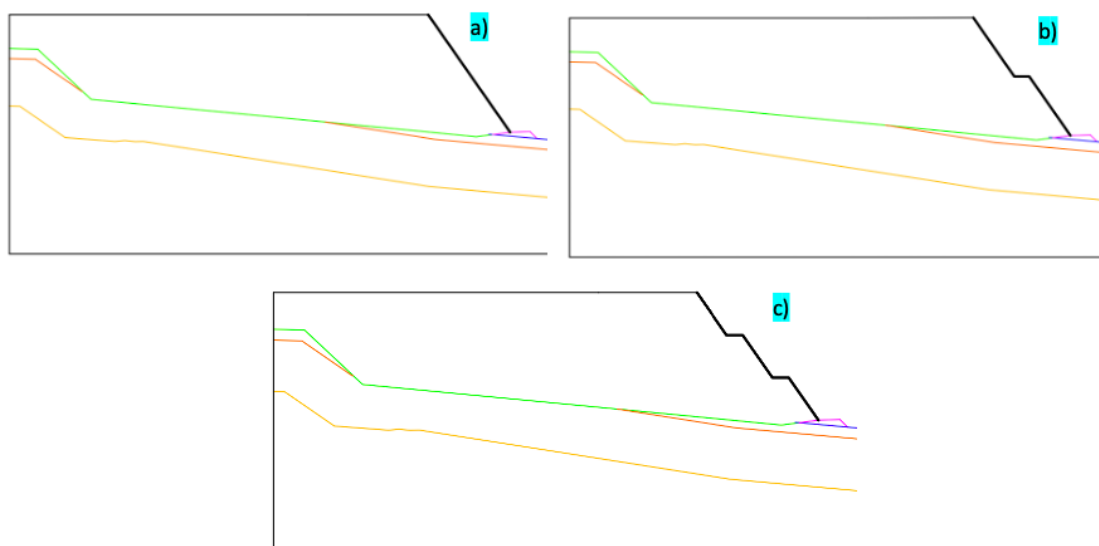


Figura 39. Geometria dos modelos de cálculo com 55° de inclinação, em que: a) talude com 0 bancadas; b) talude com 1 bancadas e c) talude com 2 bancadas.

Os fatores de segurança variam de acordo com a geometria do talude, por isso o Quadro 15 mostra os valores obtidos para todos os cenários de referência analisados. Como seria de esperar, ao partir de uma geometria base de rotura iminente todos modelos apresentam coeficientes de segurança inferiores à unidade. Contudo, estas análises destinam-se a servirem de base de comparação do impacto das soluções de reforço de taludes com geossintéticos (geotêxtil) que se analisam nos pontos seguintes.

Quadro 15. FS obtido para as diferentes inclinações de talude e respetivo número de bancadas.

	nº bancadas		
	0	1	2
Talude 35º (simplificada)	1,086	1,185	1,279
Talude 45º	0,832	0,936	1,03
Talude 55º	0,678	0,77	0,839
Talude 65º	0,536	0,633	0,725

Faz-se ainda notar que estas análises correspondem a cálculos estáticos, ou seja, não tiveram em conta ações sísmicas para a zona de localização do aterro. O cálculo dos valores dos coeficientes sísmicos utilizados nos cálculos deste tipo nos modelos seguintes encontram-se no Anexo XIII.

5.2.2. Reforço escolhido

O reforço escolhido foi o geotêxtil Mirafi PET da TenCate (Figura 40). Este material é indicado especialmente para reforço de aterros em solos moles ou o reforço de taludes de solo, casos que se assemelham ao problema em estudo. A escolha deste material específico, de entre os vários possíveis, tentou ainda seguir critérios de seleção de produtos comerciais, de simples aplicação e com um custo reduzido a moderado.



Figura 40. Aspecto do geotêxtil Mirafi PET (adaptado de Materials, 2021).

No anexo XIV podemos ver a ficha técnica do geotêxtil escolhido. Para a introdução do geotêxtil no programa slope/w foi necessário calcular a sua resistência ao arranque. Como o material utilizado se trata de um geotêxtil, este parâmetro é controlado através da tensão de confinamento devido à dominância da resistência de atrito no mecanismo de transferência de tensão. O seu cálculo é obtido através da expressão,

$$PR = (S_{IA} + \sigma'_v \tan \delta) SAF \quad (10)$$

Em que:

PR é a resistência ao arranque;

S_{IA} é a adesão aparente;

σ'_v é a tensão de sobrecarga eficaz;

δ é o ângulo de atrito da interface;

SAF é o fator de área da superfície.

5.2.3. Aplicação do reforço

1) Reforço homogéneo

Inicialmente a aplicação de reforço foi feita de forma homogénea, ou seja, o comprimento do reforço é idêntico desde a base até ao ponto mais alto do aterro. Como exemplo prático, neste tópico, irá sempre ser utilizado o talude com 55° de inclinação com 1 bancadas (Figura 41).

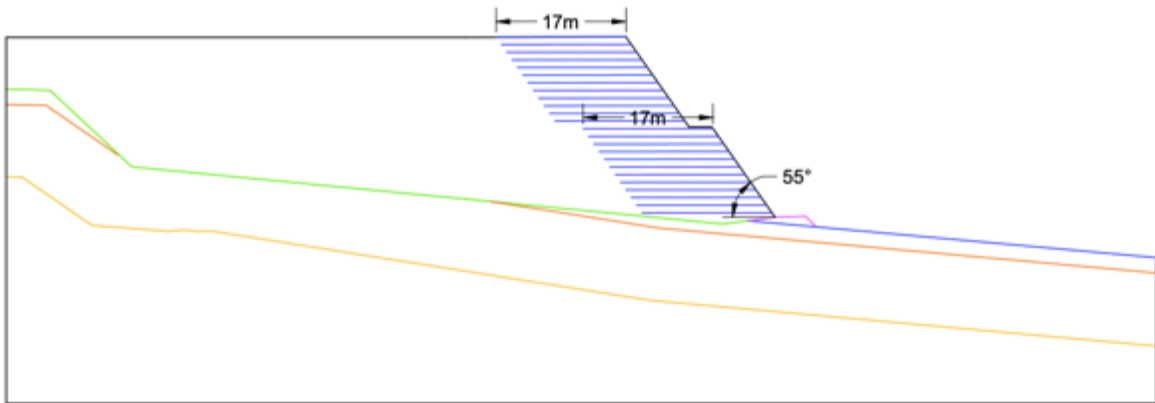


Figura 41. Aplicação de reforço homogéneo em talude de 55° com 1 bancadas.

O comprimento de reforço foi definido para garantir um valor de $FS \geq 1,5$. Nas diferentes modelações considerou-se um espaçamento entre reforços de 1m (Figura 42) e definiu-se o respetivo comprimento a partir dos casos condicionantes correspondendo ao talude sem bancadas (menos favorável). Consequentemente os taludes com 1 e 2 bancadas (mais favoráveis) estariam em segurança.

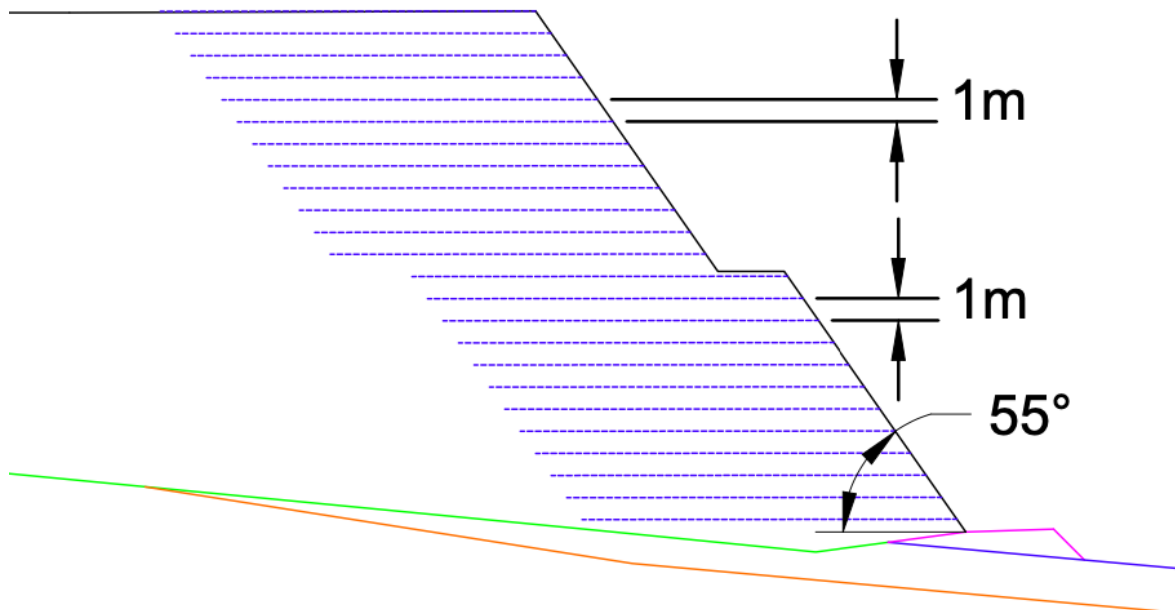


Figura 42. Espaçamento entre reforços.

Quando os modelos com reforço homogéneo foram colocados no slope/w notou-se um dado comum, que poderia ter influência na quantidade de reforço para garantir a segurança do talude, e que corresponde ao facto do comprimento de reforço necessário para abranger toda a superfície de corte ser mais reduzido no topo e superior na base do talude, como podemos observar na Figura 43.

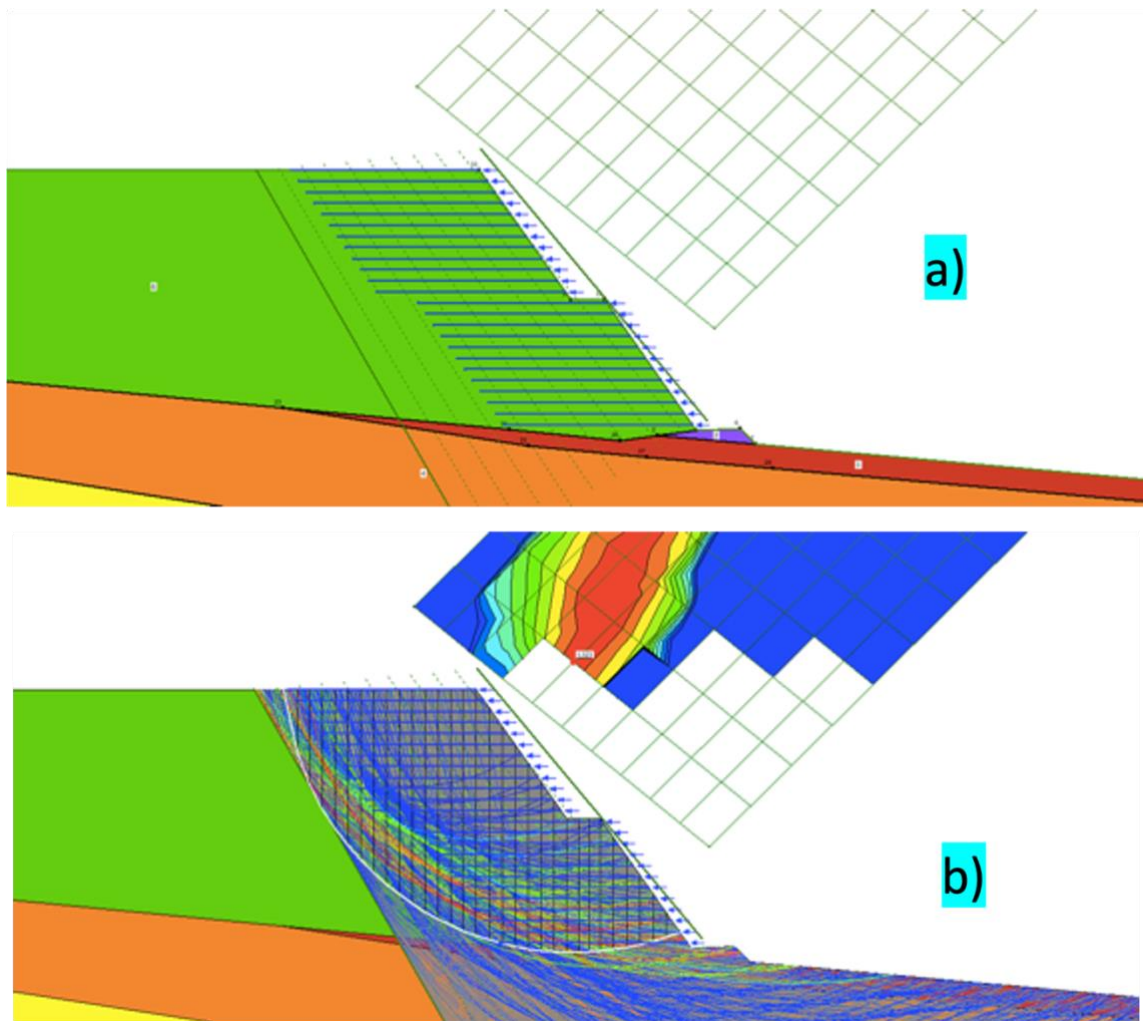


Figura 43. Resultado slope/w para modelação talude 55° com 1 bancada, em que: a) modelo e b) resultados.

Esta constatação permite inferir que poderá haver excesso de comprimento na zona superior e défice na zona inferior. Esta conclusão permitiu desenvolver análises complementares em que se procuram otimizar os cálculos e o correspondente comprimento dos reforços e que se apresentam seguidamente.

2) Reforço heterogéneo

Pela razão que foi anteriormente exposta, a otimização da solução teve por base a heterogeneidade dos comprimentos dos reforços, ou seja, a aplicação de menores comprimentos na zona superior e maiores na zona base do talude.

Utilizando o exemplo apresentado anteriormente, a Figura 44 mostra os novos comprimentos utilizados no modelo de reforço heterogéneo.

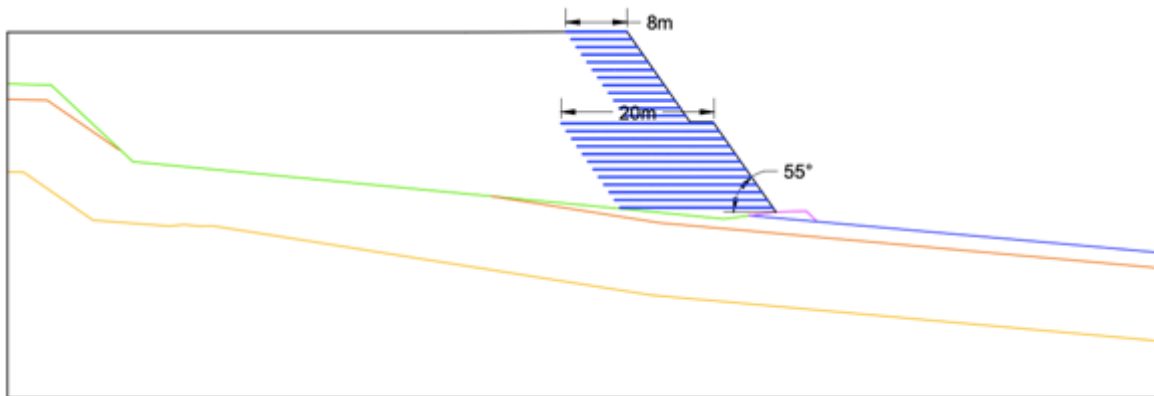


Figura 44. Aplicação de reforço heterogéneo em talude de 55° com 1 bancadas.

A aplicação do comprimento de 20 metros na base do talude é inerente a todos os modelos, a variável será a zona superior. Através de um processo iterativo, foi averiguado para que comprimento de geotêxtil na zona superior era garantido o valor para $FS \geq 1,5$.

A quantidade de reforço com 20 metros aplicado é influenciada pelo número de bancadas do modelo. No Anexo XV podem ser visualizados os modelos com diferentes números de bancadas e a respetiva distribuição de comprimentos de reforço com 20 metros.

A Figura 45 representa um exemplo de aplicação de reforço heterogéneo no slope/w.

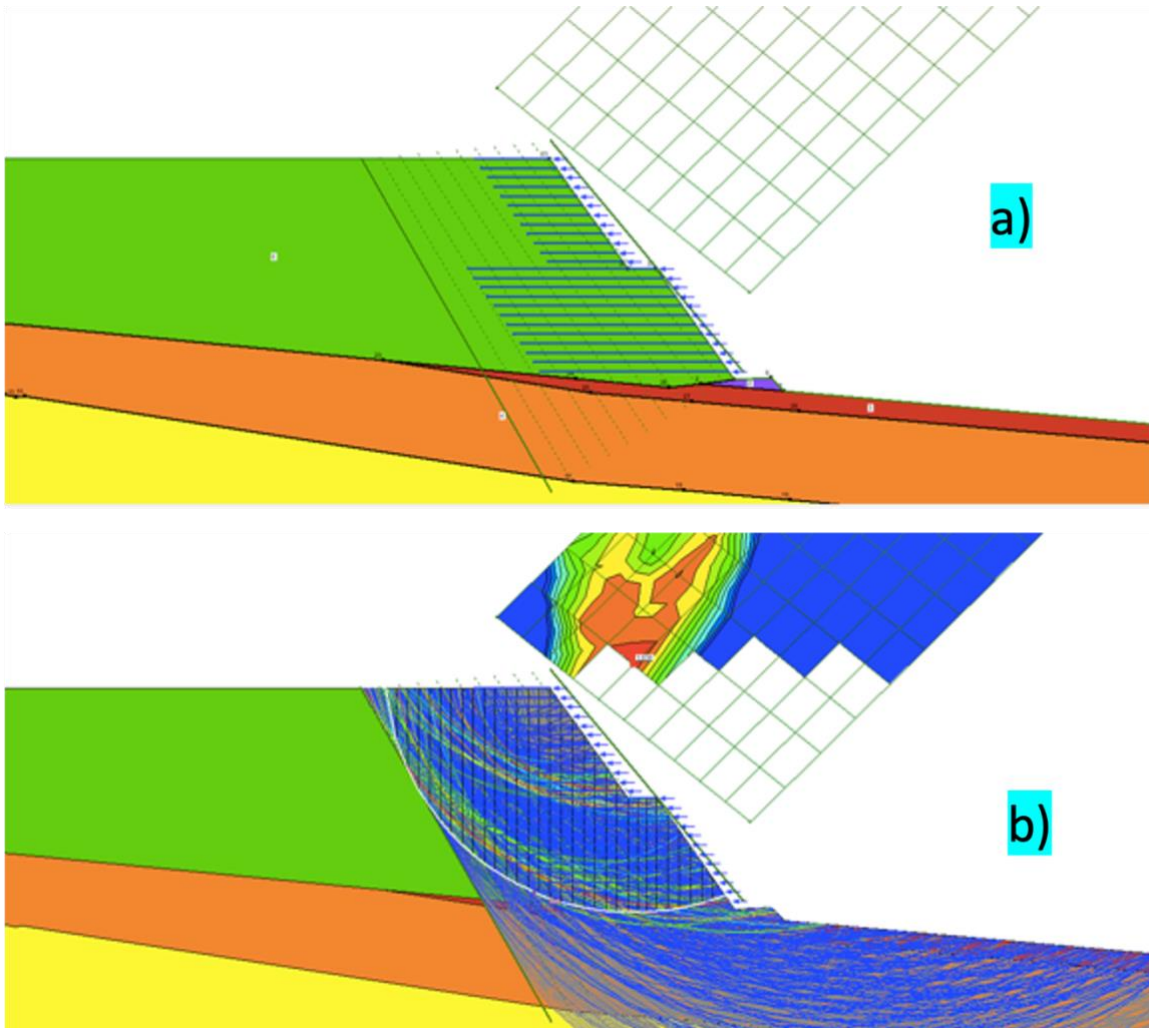


Figura 45. Resultado modelação reforço heterogéneo talude 55° com 1 bancadas em que: a) modelo e b) resultados.

Relativamente ao reforço homogéneo, os resultados obtidos para este caso (Figura 45) de reforço heterogéneo demonstram claramente um preenchimento mais definido das zonas críticas. O indicador será a menor quantidade de linhas vermelhas que representam a maior deficiência estrutural.

5.2.4. Comparação dos resultados

De forma a estabelecer uma relação entre os casos apresentados anteriormente é importante comparar os valores dos parâmetros avaliados. Os valores do fator de segurança podem ser visualizados na Figura 46. Existe ainda uma comparação com o FS do talude no estado atual correspondendo à situação de referência.

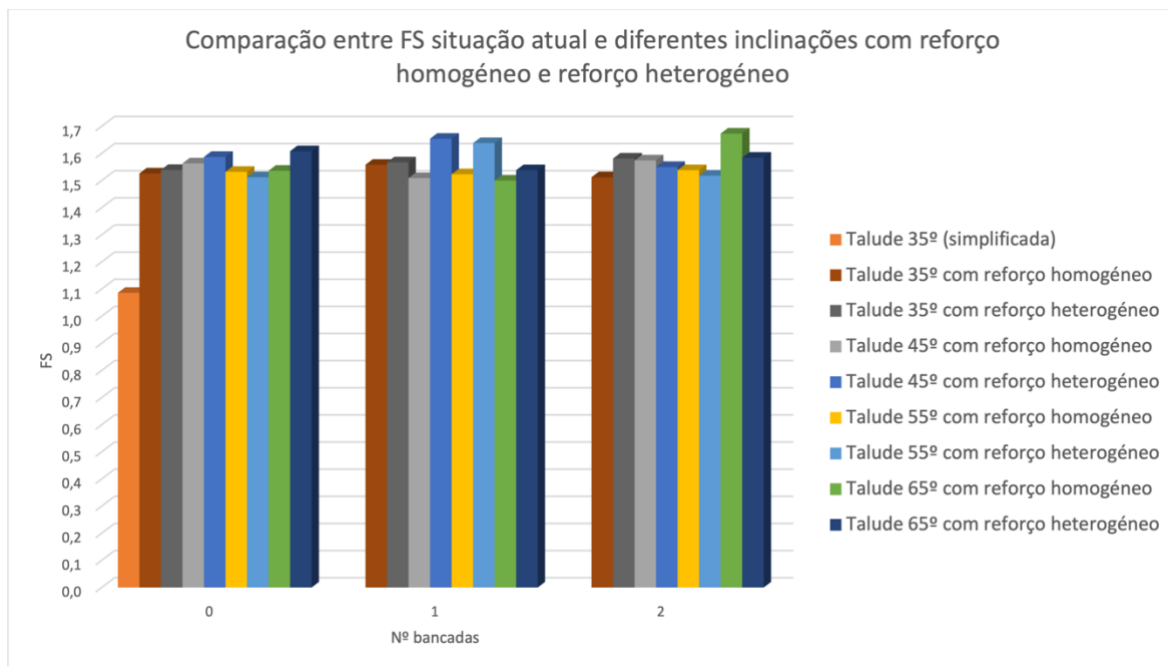


Figura 46. Relação entre FS para reforço homogéneo e reforço heterogéneo.

O FS para todos os casos foi igual ou superior a 1,5, exceto no caso do talude atual, que apenas aparece como termo de comparação evolutiva do valor de segurança.

Este cenário era espectável, visto que o comprimento de reforço foi definido para garantir a estabilidade do aterro. Em alguns casos o FS ultrapassou os 1,5, o que pode indicar o excesso de comprimento de reforço na solução. Por esse motivo, na Figura 47 comparado os metros lineares de reforço para cada um dos casos.

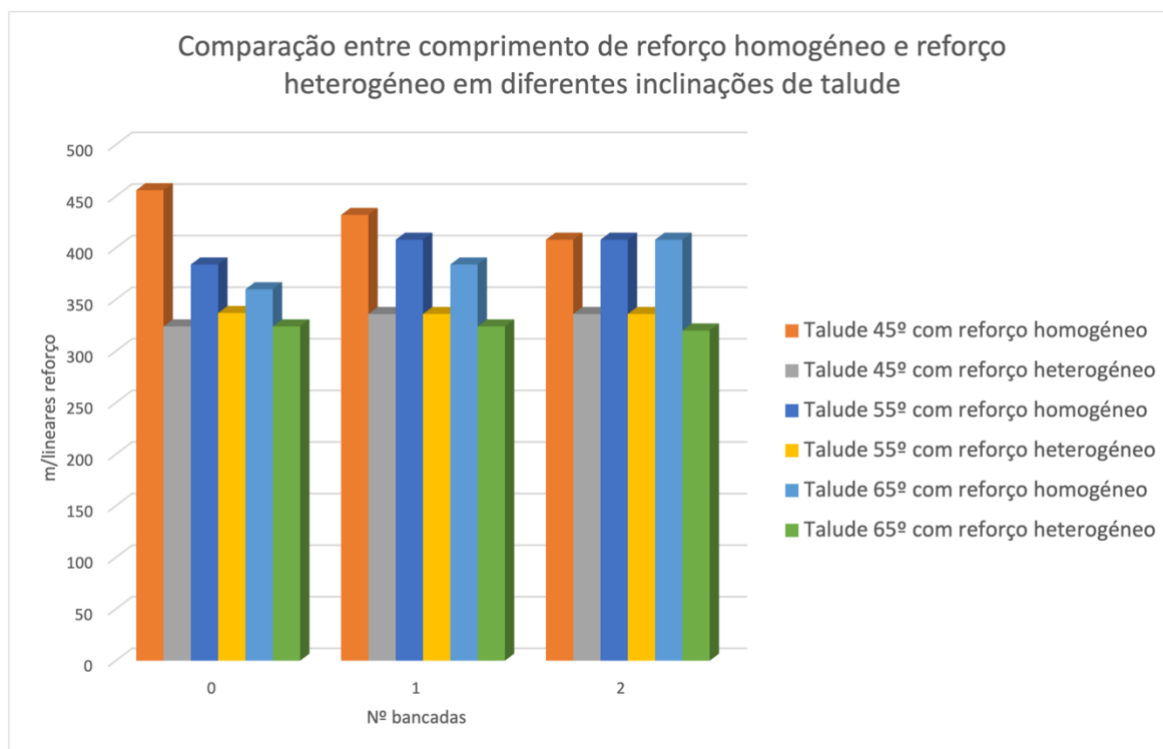


Figura 47. Relação entre m/lineares de reforço para as diferentes soluções.

Pela análise do gráfico é visível que os metros lineares de reforço homogéneo são superiores ao de reforço heterogéneo. Partindo do princípio que todas os modelos com acréscimo de volume de encaixe satisfazem $FS \geq 1,5$, existe excesso de reforço para garantir a estabilidade de talude quando este é aplicado homogeneamente, situação que torna o caso de reforço heterogéneo mais viável. Das análises verificou-se ainda que, a aparente contradição, de quanto maior for a inclinação do talude menor será a necessidade de reforço é explicada pelo melhor ajuste da geometria dos reforços às potenciais superfícies de rotura críticas.

5.2.5. Principais conclusões das modelações

Todos os modelos com e sem reforço, bem como o FS correspondente, podem ser visualizados no Anexo XVI. Da análise dos mesmos conclui-se que:

- um maior número de bancadas promove a estabilidade, aumentando o FS;
- quanto menor número de bancadas, maior o volume de encaixe;
- quanto maior os metros lineares de reforço, maior a estabilidade;
- é necessário um maior comprimento de reforço na base relativamente à zona superior do talude;

- não existe relevância na relação comprimento de reforço – FS entre reforço homogéneo e heterogéneo, por isso deve-se optar por aquela que permite um maior encaixe e menor necessidade de reforço.

O talude com 65° sem bancadas e reforço heterogéneo, seria o escolhido, pois como foi concluído, devemos optar por aquele que permite um maior volume de encaixe e menor comprimento de reforço. Contudo, esta solução é impossível de implementar no aterro atual, pois obrigaria a grandes alterações estruturais, sobretudo na base do aterro, onde o comprimento do reforço chega aos 20 metros. Os custos das alterações seriam muito elevados, além de que os problemas de espaço para deposição de material seriam agravados pela intervenção.

Com todos estes problemas associados aos casos apresentados, foi necessária uma nova abordagem ao problema, pensando desde início, no enquadramento do talude atual numa intervenção de reforço.

5.2.6. Solução de reforço do talude atual

De forma a ligar os resíduos do aterro existente com os novos resíduos a depositar na intervenção de acréscimo, foi realizado um endentamento no talude atual (Figura 48). Este tipo de reperfilamento é recorrente em ajustes de obras de terras procurando-se adaptar ao caso em apreço.

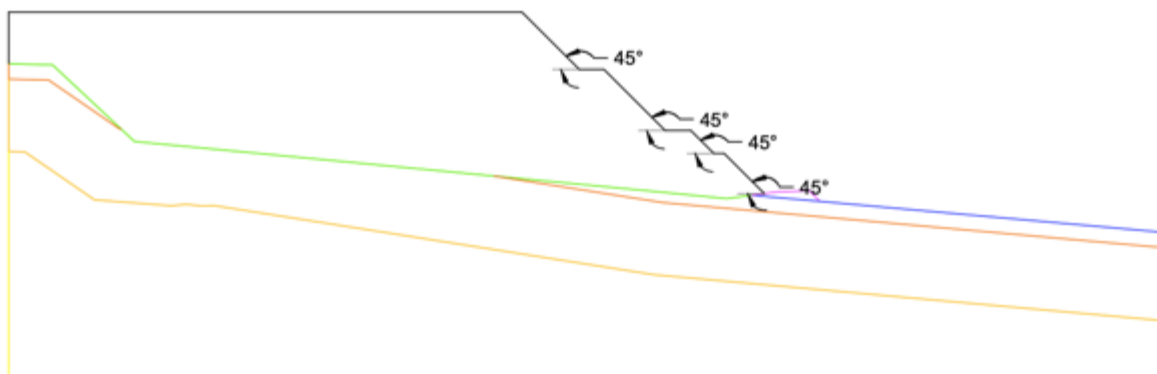


Figura 48. Endentamento do talude existente.

Apesar da morfologia do perfil de endentamento, com mais bancadas, o FS para esta morfologia foi de 1,079, ligeiramente inferior ao FS do talude simplificado com 35°. Este facto continua a validar a metodologia de trabalho que ainda tem a atenuante adicional de o endentamento ser implementado à medida que o aterro é executado em altura e não global conforme modelado.

A esquematização do talude de endentamento, talude existente e reforço pode ver-se na Figura 49.

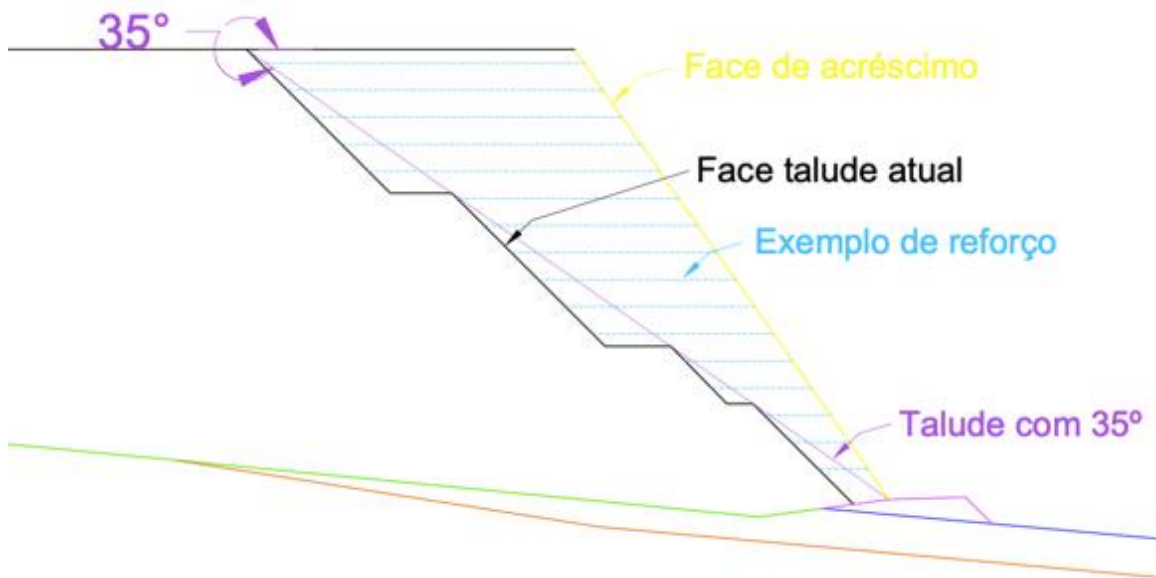


Figura 49. Representação do talude de endentamento comparativamente à inclinação atual e face de acréscimo com reforço.

Na tentativa de chegar a uma solução ótima, foram desenvolvidos diversos modelos com o objetivo de continuar a obter um $FS \geq 1.5$, garantindo assim segurança da nova estrutura. A Figura 50 representa a solução encontrada. A sequência de modelos até ao resultado final pode ser visualizada no Anexo XVII.

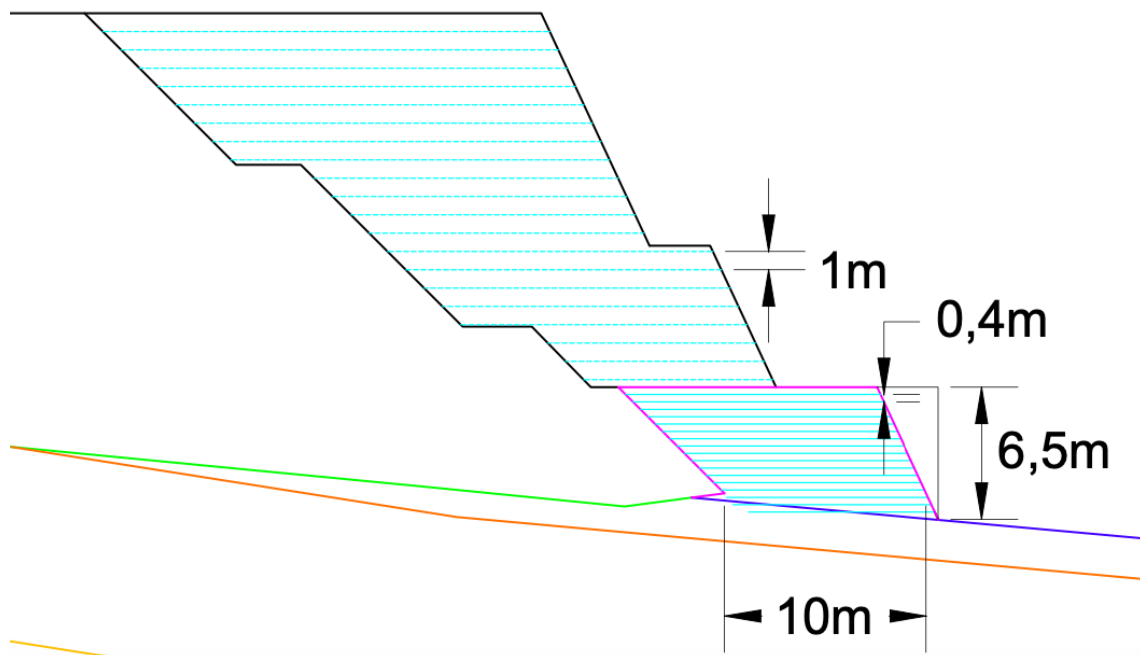


Figura 50. Resultado ótimo para talude de aterro atual.

Relativamente ao modelo final importa destacar que a estabilidade da solução somente é alcançada atuando na bancada de disfarce inferior que, por um lado, é aumentada em dimensão e altura e, por outro lado, é aumentada a sua resistência e diminuída a correspondente deformabilidade por implementação de uma solução de solo reforçado com geotêxteis semelhantes aos empregues na massa de resíduos. Assim, a zona inferior é constituída por solo reforçado com geotêxtil espaçado 40 cm entre si. A zona superior conta com reforço espaçado 1m. A solução teve que avançar 10 metros em relação à frente existente para garantir o FS pretendido (Figura 51).

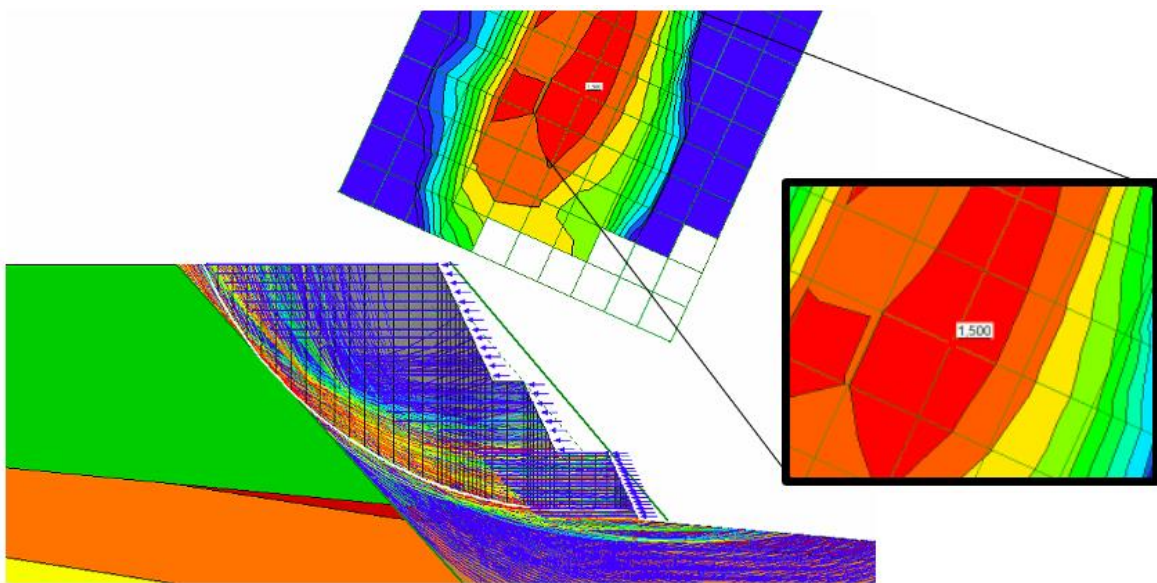


Figura 51. Resultado slope/w para resultado ótimo para talude de aterro atual.

Alcançado um resultado admissível, adaptou-se o modelo teórico apresentado anteriormente para as condições atuais do aterro (Figura 52) onde se incorpora o efeito da exploração da infraestrutura mediante o espalhamento sequencial de camadas de resíduos e solos.

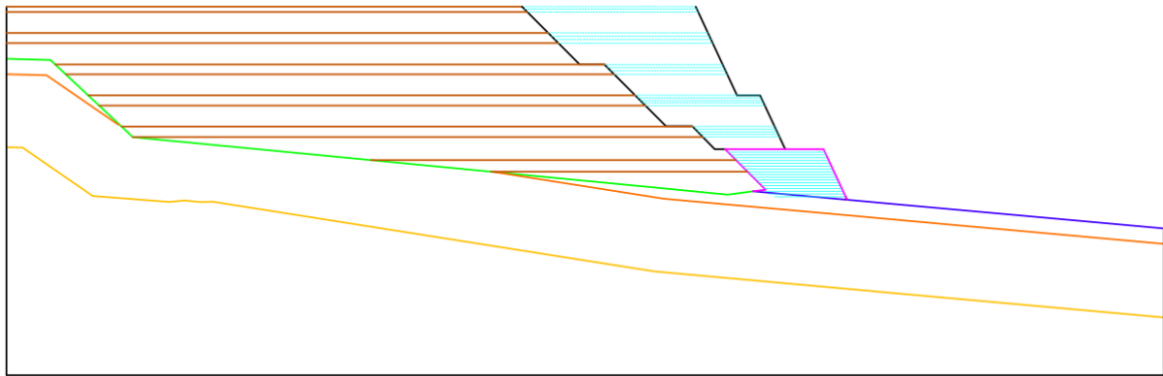


Figura 52. Adaptação do modelo teórico para condições atuais.

Partindo desta solução otimizada no capítulo seguinte avalia-se o custo benefício da proposta de incremento do volume de encaixe, e correspondente vida útil, da célula em apreço do aterro sanitário em exploração.

(página propositadamente em branco)

Capítulo VI

Proposta de otimização

(página propositadamente em branco)

6. Proposta de otimização

6.1. Custos

6.1.1. Discriminação dos custos

Os custos envolvidos nas intervenções propostas variam de acordo com o comprimento de geotêxtil empregue, volumes de terras e necessidades de incremento das áreas de proteção passiva. O Quadro 16 enuncia quais os elementos que impactam no custo das situações em estudo.

Quadro 16. Elementos de custo associados a cada abordagem.

Solução de raiz	<ul style="list-style-type: none">• Reforço com geotêxtil.
Situação atual	<ul style="list-style-type: none">• Reforço com geotêxtil;• Solos com parâmetros mecânicos controlados;• Proteção passiva;• Expropriação (se aplicável).

Para a realização dos cálculos, foram atribuídos valores referência para cada elemento de custo conforme discriminado no Quadro 17. Salienta-se que nos cálculos considerou-se um elemento transversal linear e numa segunda fase extrapolou-se esse valor para a extensão total da célula.

Quadro 17. Discriminação de custos.

Elementos	Valor (€)
Reforço	3,5 € - m/lin
Terras controladas	7,5 €/m ³
Proteção passiva	25 € - m/lin

6.1.2. Relação entre acréscimo de volumes, m/lineares de reforço e custos

O Quadro 18 resume e relaciona a solução e raiz e o caso atual através de percentagens de volumes de acréscimo no encaixe da célula, metros lineares de reforço e custos estimados para a intervenção.

Para a solução de raiz a percentagem de volume de encaixe nos diferentes cenários é calculada comparativamente com o volume de encaixe do talude com inclinação média de 24° sem bancadas que, conforme referido, corresponderá a uma situação de um projeto base (cenário em que, para os parâmetros mecânicos definidos no capítulo V, o talude se encontra em segurança com $FS \geq 1,5$).

Para a solução da situação atual, essa percentagem é calculada através da comparação como o volume do talude atual (inclinação = 35° sem bancadas).

O Anexo XVIII contém o Quadro 18 com as especificações de reforço, bem como os valores exatos do volume de encaixe, metros lineares de reforço utilizados e custos estimados.

Para a solução de raiz existente consegue-se um aumento nos volumes de encaixe que varia entre cerca dos 12% e os 38%, para o caso do talude com inclinação de 35° com 2 bancadas e para o talude com inclinação de 65° sem bancadas, respetivamente.

Relativamente ao reforço, obtém-se uma redução que varia entre os aproximadamente 6% e os 27% para o caso do reforço homogéneo e entre cerca dos 7% e os 26% para a situação reforço heterogéneo.

Para a solução comparativa com o talude atual é possível um aumento do volume na ordem dos 17% e uma redução de 15% no reforço empregue.

6.1.3. Rácio custo por m³ de resíduos

Como o principal objetivo será perceber se o custo-benefício das situações estudadas é uma boa alternativa aos métodos convencionais, em cada cenário adotou-se um rácio entre os custos de cada solução relativamente aos benefícios da mesma em termos de acréscimo de volume de resíduos que a mesma permite alcançar.

Quadro 18. Quadro resumo para volumes de encaixe, metros lineares de reforço e custos para solução de raiz e caso atual.

		Solução de raiz								Caso atual				
		Reforço homogéneo Reforço heterogéneo								Reforço heterogéneo				
		Nº bancadas		0				1		2		3		
Volume	V encaixe (m ³)	24°*	183 000						-3%		-6%		252 381 (em que 24% solos)	+17%
		35°	215 000		+18%		+15%		+12%					
		45°	+26%						+24%		+21%			
		55°	+33%						+30%		+27%			
		65°	+38%						+35%		+32%			
Reforço	m/lineares de reforço €	35°	64 000 m/lin	224 000€	61 000 m/lin	213 500€	-11%	-7%	-27%	-26%	52 000 m/lin	182 000€	-15%	
		45°	(=)		-26%		-6%		-23%					
		55°	-16%		-23%		-11%		-23%					
		65°	-22%		-26%		-16%		-26%					
Custos	V solos reforçados €									9 619 m3		72 143€		
	Custos adicionais	Proteção passiva								54 250€				
Custo total										308 393€				

* o valor 24° corresponde à inclinação que para os parâmetros definidos o FS=1,5 sem reforço;

** reforço aplicado apenas em resíduos ou solo;

*** reforço apenas aplicado em solo controlado.

O Anexo XIX inclui o Quadro 19 com a discriminação dos preços e volumes de acréscimo de resíduos.

Os principais indicadores obtidos sintetizam-se a seguir:

- Os resultados apontam para um valor de $4\text{€}/\text{m}^3$ para o novo projeto de ampliação;
- Para a solução de raiz aplicando o reforço homogéneo a média de rácio é de $5\text{€}/\text{m}^3$, oscilando entre os valores de 3 a $7\text{€}/\text{m}^3$;
- Aplicando reforço heterogéneo, o valor acima diminui para os $4\text{€}/\text{m}^3$ podendo oscilar entre os 2 a $7\text{€}/\text{m}^3$.

6.2. Critérios de decisão

Com base nos rácios anteriores, e tomando por comparação o custo do projeto de ampliação previsto e não licenciado, pode-se avaliar se uma determinada proposta de reforço dos taludes constitui uma alternativa economicamente viável. Esta relação encontra-se representada no Quadro 19. Da sua análise verifica-se que:

- as soluções de reforço são atrativas em inclinações elevadas, nomeadamente 65° e 55° (esta apenas para reforço heterogéneo);
- o caso da geometria atual é bastante desfavorável visto que o valor obtido foi de $8\text{€}/\text{m}^3$, o que corresponde sensivelmente ao dobro do rácio previsto para o caso ampliação das instalações com a construção de uma nova célula.

Quadro 19. Rácio custo por m^3 de resíduos.

		Solução de raiz		Caso atual	Projeto de ampliação	
		Reforço homogéneo	Reforço heterogéneo			
Inclinação	Bancadas	€/ m^3				
35°	0	7	7	8	4	
	1	7	7			
	2	8	7			
45°	0	5	3			
	1	5	4			
	2	5	4			
55°	0	3	3			
	1	4	3			
	2	4	3			
65°	0	3	2			
	1	3	2			
	2	3	3			

(página propositadamente em branco)

Capítulo VII

Conclusões e desenvolvimentos futuros

(página propositadamente em branco)

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1. Conclusões

As análises desenvolvidas permitiram fundamentar o potencial da aplicação de reforço de taludes de aterros de resíduos urbanos para incremento de volumes de encaixe para diferentes inclinações e número de bancadas de taludes.

Inicialmente foi avaliado para um cenário de aplicação de raiz, que para o caso mais favorável foi obtido um incremento de volume da ordem dos 38%. Conclui-se que, assegurada a segurança, a quantidade de reforço necessária é inferior no cenário de aplicação de reforço de uma forma heterogénea. Contudo, com o aumento de inclinação, é possível obter reduções nos comprimentos de reforço e de custos de cerca de 26% e 22% para reforço heterogéneo e reforço homogéneo, respetivamente. Para esta abordagem, é possível obter uma relação custo-benefício de $2\text{€}/\text{m}^3$ com aplicação de reforço heterogénea e $3\text{€}/\text{m}^3$ com aplicação de reforço homogéneo. Números muito competitivos face ao valor de $4\text{€}/\text{m}^3$ obtidos para o projeto de ampliação através da construção de uma nova célula.

Para a abordagem de solução do caso atual, foi obtido um incremento de volume de aproximadamente 17%, e face às condicionantes apresentadas pelo cenário de estudo. O valor de custo-benefício obtido foi de $8\text{€}/\text{m}^3$. Menos competitivo que o anterior, mas constituirá uma solução de recurso que poderá ser vantajoso em determinadas situações que necessitarão de ser avaliadas caso a caso.

Pode-se assim concluir que a aplicação de reforço é viável e uma boa alternativa em relação a métodos convencionais como seja o caso da criação de novas células de aterro. Contudo, avançando-se para a ampliação por via de criação de um novo aterro, a solução apresentada nesta dissertação funcionaria perfeitamente como aumento da capacidade de encaixe e consequentemente aumento da vida útil da infraestrutura construída de raiz o que corresponderá à situação ideal.

Um aspeto que não foi explorado neste documento, mas mencionado na bibliografia consultada Koda et al. (2020), é o facto de após 20 anos os efeitos da biodegradação do reforço não serem relevantes, ou seja, após esse período nenhuma deterioração significativa dos parâmetros mecânicos do geossintético utilizado ter sido observada. O projeto revelou ainda que o FS aumentou até 10% após o período referido anteriormente. Esta conclusão pode ser muito relevante para o caso dos pós encerramento dos aterros sanitários, nomeadamente, na reabilitação dos locais para novos usos futuros.

7.2. Desenvolvimentos futuros

No sentido de tornar este tema mais completo complementando os dados que foram apresentados ao longo do documento, surgem algumas sugestões para possíveis desenvolvimentos futuros:

- Estudo de novas geometrias de taludes (relação nº bancadas-inclinação do talude);
- Estudo de novos comprimentos e disposição de reforços (mediante o caso de estudo);
- Avaliação do impacto do recurso a diferentes reforços (geogrelhas por exemplo);
- Desenvolvimento de mais modelações numéricas de análises de taludes na área de exploração;
- Análise custo-benefício comparativa com projetos de expansão passados (nomeadamente células 1 e 2), quer para nova fase de expansão (ainda em processo de estudo);
- Estudo da influência da aplicação do reforço na forma de sanduiche.

8. Referências bibliográficas

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (1996). *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, Inc.
- Agência Portuguesa do Ambiente . (20 de Abril de 2021). Obtido de Agência Portuguesa do Ambiente : <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=943&sub3ref=945>
- Agência Portuguesa do Ambiente - Departamento de Resíduos (Marçal, A., & Ferreira, C. (2020). *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2019* . Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente.
- Aguilar, M., Ferreira, E., Rodrigues, B., Matos, L., Vedor, A., Rei, E., & Araujo, N. (2020). *Projeto de ampliação do aterro da Braval*. Braga: Consultoria e Projetos de Ambiente, Lda.
- Aguilar, M., Guerner, A., Benedito Calejo, Faria, P., Assunção, H., Rei, E., . . . Freitas, G. (2011). *Projeto do aterro sanitário da Braval*. Consultoria e Projetos de Ambiente, Lda.
- Barret, J. (1966). *Use of Plastic Filters in Coastal Structures*. Proc. of 10th Int. Conf. on Coastal Engineering, 1048-1067.
- Beckam, W., & Mills, W. (1935). *Cotton - Fabric-Reinforced roads*. Engineering New Record.
- Cepollina. (2009). *Plano de Encerramento do Aterro Sanitário de Curitiba*. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba - Secretaria Municipal do Meio Ambiente.
- Chandruppa, R., & Das, D. B. (2012). *Solid waste management: principles and practice*. Springer.
- Chowdhury, R. (1978). *Slope Analysis-Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Clough, R. W. (1960). *The Finite Element In-Plane Stress Analysis*. Pittsburgh: Conf. on Electronic Computation.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, inc.
- Duarte, A. F. (2009). *Aplicação de geossintéticos na impermeabilização e selagem de aterros*. Aveiro: Departamento de ambiente e ordenamento - Universidade de Aveiro.
- EBGEO. (2011). *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements*. Berlin, Germany: Ernst & Sohn Verlag.
- Feng, S., Gao, K., Chen., Y., Li, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2017). *Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China*. W. Manag., 354-365.
- Ferreira, E. d. (2010). *Programa de cálculo para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos*. Porto: FEUP.
- Ferreira, F. B. (2010). *Comportamento das Interfaces Solo-Geossintético*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, J. (2012). *Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Janbu e Spencer*. Porto: Universidade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fredlund, D., & Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, 429-439.
- Geostudio (2021). *Stability Modeling with GeoStudio*. Calgary, Canada: GEO-SLOPE, international, Ltd.
- Gerscovich, D. (2016). *Estabilidade de taludes*. Brasil: Oficina de textos.
- Gicot, O., Perfetti, J. (1982). *Geotextiles: Conceiving and Designing Engineering Structures*. Rhone - Poulenc, 44.
- Godoy, N. (1972). *Fundações*. Notas de Aula. Escola de Engenharia de São Paulo.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press.
- Hoek, E. (1997). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. International Journal Rock Mechanics Mining Science.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Woerden, F. V. (2018). *What a waste 2.0 - A global snapshot of solid waste management to 2015*. World Bank Group.

-
- Koda, E. (1998). *Em Stability Conditions Improvement of the Old Sanitary Landfills* (pp. 223-228). Warsaw, Poland: Department of Geotechnics, Warsaw Agricultural University.
- Koda, E., Kawalec, J., Kiersnowska, A., Osinski, P. (2020). *Landfill Slope Stability Improvement Incorporating Reinforcements in Reclamation Process Applying Observational Method*. ResearchGate, 14.
- Krahn, J. (2003). *The 2011 R.M Hardy Lecture: The Limits of limit equilibrium analyses*. *Canadian Geotechnical Journal*, 643-660.
- Lofrano, G., & Brown, J. (2010). *Wastewater management through the ages: A history of mankind*. Elsevier, 5254-5264.
- MAOTDR. (s.d.). *PERSU II. Plano Estrategico para os Residuos Sólidos Urbanis 2007-2016*. Ministerio do Ambiente, do Ordenamento do Territorio e do Desenvolvimento Regional.
- Marçal, A., & Ferreira, C. (2019). *Relatório anual residuos urbanos 2019*. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente.
- Materials, P. (6 de Agosto de 2021). *Paramount Materials: Construction - Industrial - Landscape*. Obtido de <https://www.paramountmaterials.com/products/mirafi-pet100-hs600-geotextile-fabric-15-x-300-roll-tencate>
- Medeiros, H. (2008). *Reforço Plástico*. *Revista Técnica*.
- Meyerhof, G. (1956). *Penetration test and Bearing Capacity of Cohesionless soils*. *Journal of the Soil Mechanics Division*, 1-12.
- Mitchell, J., Guzikowski, F., & Villet, W. (1978). *The Measurement of Soil Properties In-Situ*. The University of California.
- Nicholson, D., Tse, C., OHana, S., Penny, C., & Dimmock, R. (1999). *The Observational Method in Ground Engineering: Principles and Applications*. Em *Construction Industry Research and Information Association*: London. UK: CIRIA.
- Pancar, E., & Akpinar, M. (2016). *Comparison of Effects of Using Geosynthetics and Lime Stabilization to Increase Bearing Capacity of Unpaved Road Subgrade*. *Adn. Mat. Sci*.
- Pant, S. (2016). *Stability Analysis of Geosynthetic Reinforced MSW Landfill Slopes Considering Effects of Biodegradation and Extreme Wind Loading*. Boca Raton, Florida: Florida Atlantic University.
- Park, S., Kim, W., Lee, J., & Baek, Y. (2018). *Case study on slope stability changes caused by earthquakes - focusing on Gyeongju 5.8 ML EQ*. *Sustainability*.
- Paula, A. M. (2012). *Estudo dos Coeficientes de Segurança por Danificação Durante a Instalação e por Fluência em Estruturas Reforçadas com Geossintéticos*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira, D. (2015). *Obtido em Maio de 2021, de BRAVAL - Valorização e Tratamento de Residuos Sólidos*: <http://www.braval.pt/index.php/recolha-selectiva-2>
- Reddy, K., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., & Bogner, J. (2011). *Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation*. (*Waste management*), 2275-2286.
- Remedio, F. H. (2014). *Análise de estabilidade de taludes de aterro de residuos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações Nspt*. Rio Claro - Brasil: Universidade estadual paulista - Instituto de geociências e ciência exatas .
- Shukla, S., & Yin, J. (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. Londres: Group, T.F.
- Silva, B. V. (2014). *Estabilidade de Taludes de Aterros não Controlados de Residuos*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, J. A. (2014). *Avaliação de geossintéticos na construção de aterros sanitários - caso de estudo: aterro do giestal*. Porto: ISEP.
- Silva, J. P. (2011). *Os Métodos de Equilibrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidsde de Taludes*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Spross, J., & Johansson, F. (2017). *When is the observational method in geotechnical engineering favourable?* *Str. Saf.*, 17-26.
- Território, M. (17 de Junho). *Decreto-Lei nº 73/2011*. Portugal: Governo de Portugal.
-

-
- Trotta, P. (2011). *A gestão de resíduos sólidos urbanos em Portugal. VII congresso nacional de excelência em gestão.*
- Vantrain, J., & Puig, J. (1969). *Experimentation Bidim. Bull. de Lab. P. et Ch., 15.*
- Vieira, C. (2008). *Muros e Taludes de Solo Reforçados com Geossintéticos: Comportamento sísmico e Metodologias de Dimensionamento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 575.*
- Vieira, S. A. (2014). *Análise de estabilidade de aterros: Reforços com geossintéticos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*
- Yang, R., Zengguang, X., Junrui, C. (2018). *Review of characteristics of landfilled municipal solid waste in several countries: Physical composition, Unit weight and Permeability coefficient. Pol. J. Env. Stud., 2425-2435.*

(página propositadamente em branco)

Anexos

(página propositadamente em branco)

Anexo I – Características dos resíduos que os tornam perigosos

Segundo o decreto lei n.º 73/2011 as características dos resíduos que os tornam perigosos são:

H1 – **Explosivos** – substâncias e misturas que podem explodir sob o efeito de uma chama ou ser mais sensíveis ao choque e à fricção que o dinitrobenzeno.

H2 – **Comburente** – substância e preparações que, em contacto com outras substâncias, nomeadamente com substâncias inflamáveis, apresentam uma reação fortemente exotérmica.

H3-A – **Facilmente inflamável:**

Substância e preparações no estado líquido cujo ponto de inflamação é inferior a 21°C (incluindo os líquidos extremamente inflamáveis); ou

Substância e preparações que podem aquecer até ao ponto de inflamação em contacto com o ar a uma temperatura normal, sem emprego de energia; ou

Substância e preparações no estado sólido que se podem inflamar facilmente por breve contacto com uma fonte de inflamação e que continuam a arder ou a consumir-se após a retirada da fonte de inflamação; ou

Substância e preparações gasosas, inflamáveis em contacto com o ar à pressão normal; ou

Substâncias e preparações que em contacto com a água ou ar húmido libertam gases facilmente inflamáveis em quantidades perigosas.

H3-B – **Inflamáveis** – substâncias e preparações líquidas cujo ponto de inflamação é igual ou superior a 21°C e inferior a 55°C.

H4 – **Irritante** – substâncias e preparações não corrosivas que por contacto imediato, prolongado ou repetido com a pele ou as mucosas podem provocar uma reação inflamatória.

H5 – **Nocivo** – substâncias e preparações cuja inalação, ingestão ou penetração cutânea pode representar um risco, limitado, para a saúde.

H6 – **Tóxico** – substância e preparações (incluindo as substâncias e preparações muito tóxicas) cuja inalação, ingestão ou penetração cutânea pode representar um risco grave, agudo ou crónico para a saúde e inclusivamente causar a morte.

H7 – **Cancerígeno** – substâncias e preparações cuja inalação, ingestão ou penetração cutânea pode provocar cancro ou aumentar a sua ocorrência.

H8 – **Corrosivo** – substâncias e preparações que podem destruir tecidos vivos por contacto.

H9 – **Infecioso** – substâncias e preparações que contêm microrganismos viáveis ou suas toxinas, em relação aos quais se sabe ou há boas razões para crer que causam doenças nos seres humanos ou noutros organismos vivos.

H10 – **Tóxicos para a reprodução** – substâncias e preparações cuja inalação, ingestão ou penetração cutânea pode induzir malformações congénitas não hereditárias ou aumentar a sua ocorrência.

H11 – **Mutagénico** – substâncias e preparações cuja inalação, ingestão ou penetração cutânea pode induzir defeitos genéticos hereditários ou aumentar a sua ocorrência.

H12 – Resíduos que em contacto com a água, o ar ou um ácido libertam gases tóxicos ou muito tóxicos.

H13 – **Sensibilizante** – substâncias e preparações cuja inalação ou penetração cutânea pode causar uma reação de hipersensibilização tal que uma exposição posterior à substância ou à preparação produza efeitos nefastos característicos.

H14 – **Ecotóxicos** – resíduos que representam ou podem representar um risco imediato ou diferido para um ou vários sectores do ambiente.

H15 – Resíduos suscetíveis de, após a sua eliminação, darem origem, por qualquer meio, a outra substância, por exemplo um lixiviado, que possua uma das características acima enumeradas.

Anexo II – Mapa de distribuição dos SGRU em Portugal Continental



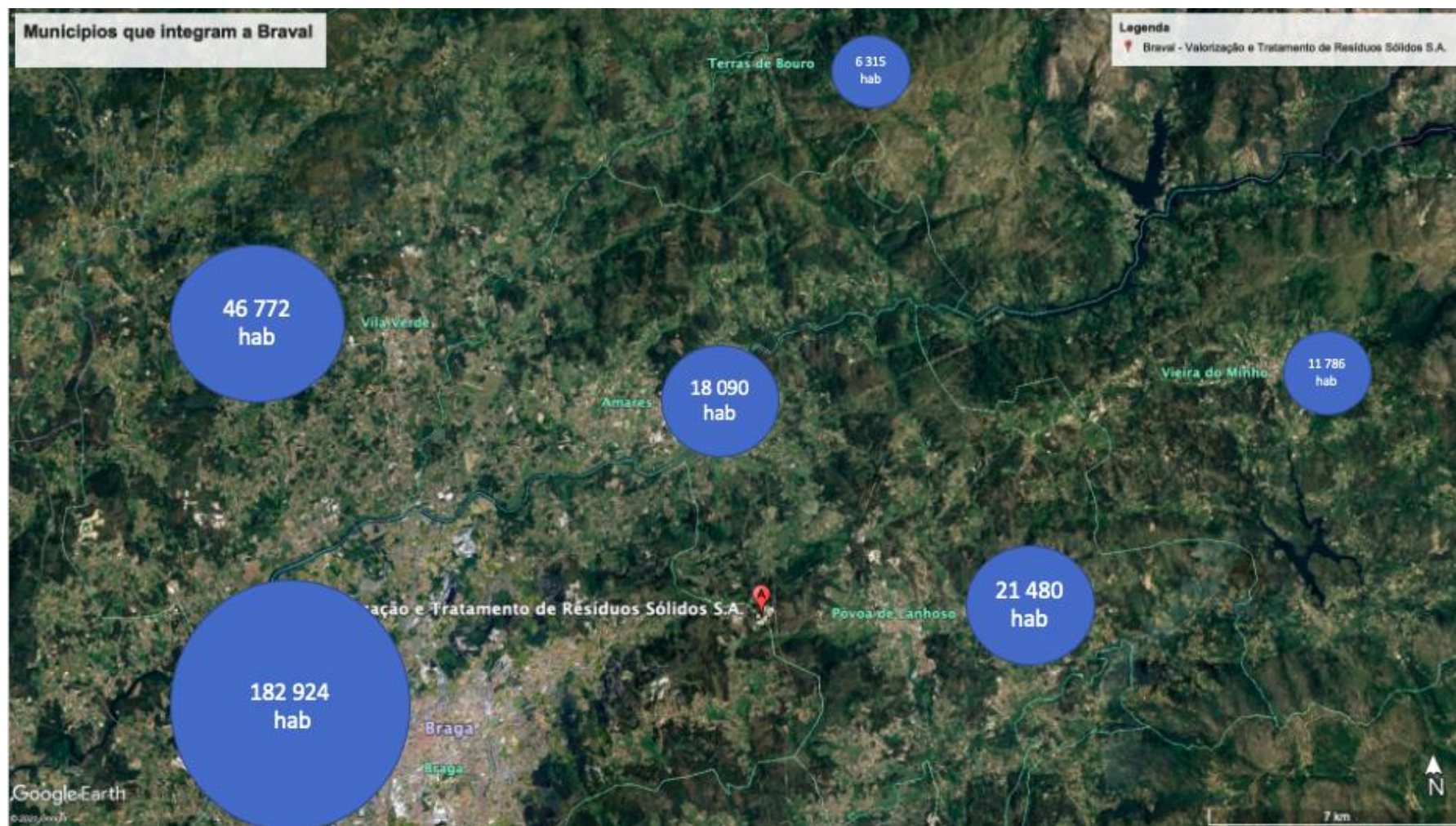
(página propositadamente em branco)

Anexo III – Municípios ao encargo da Braval



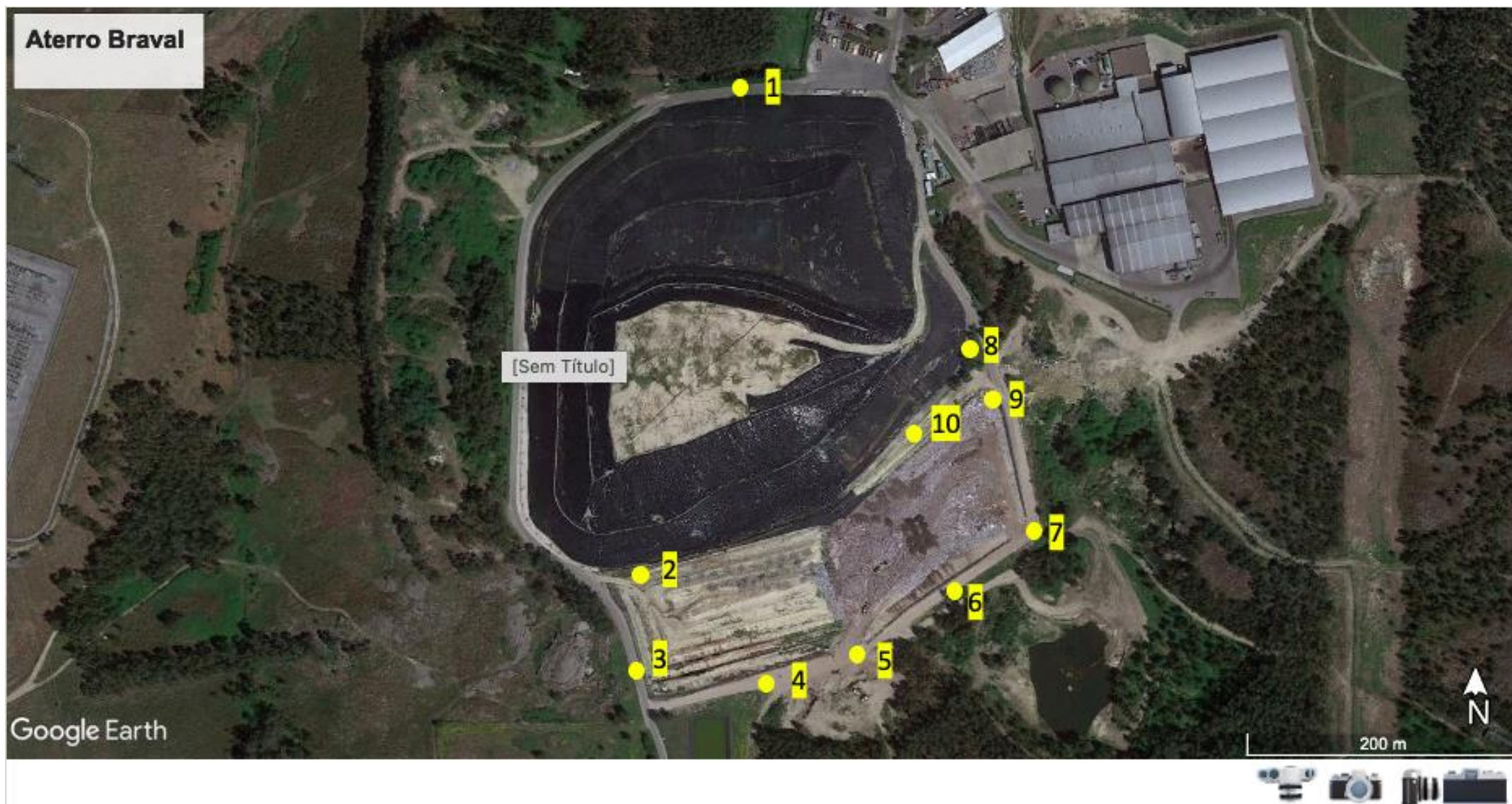
(página propositadamente em branco)

Anexo IV – População abrangida pela Braval

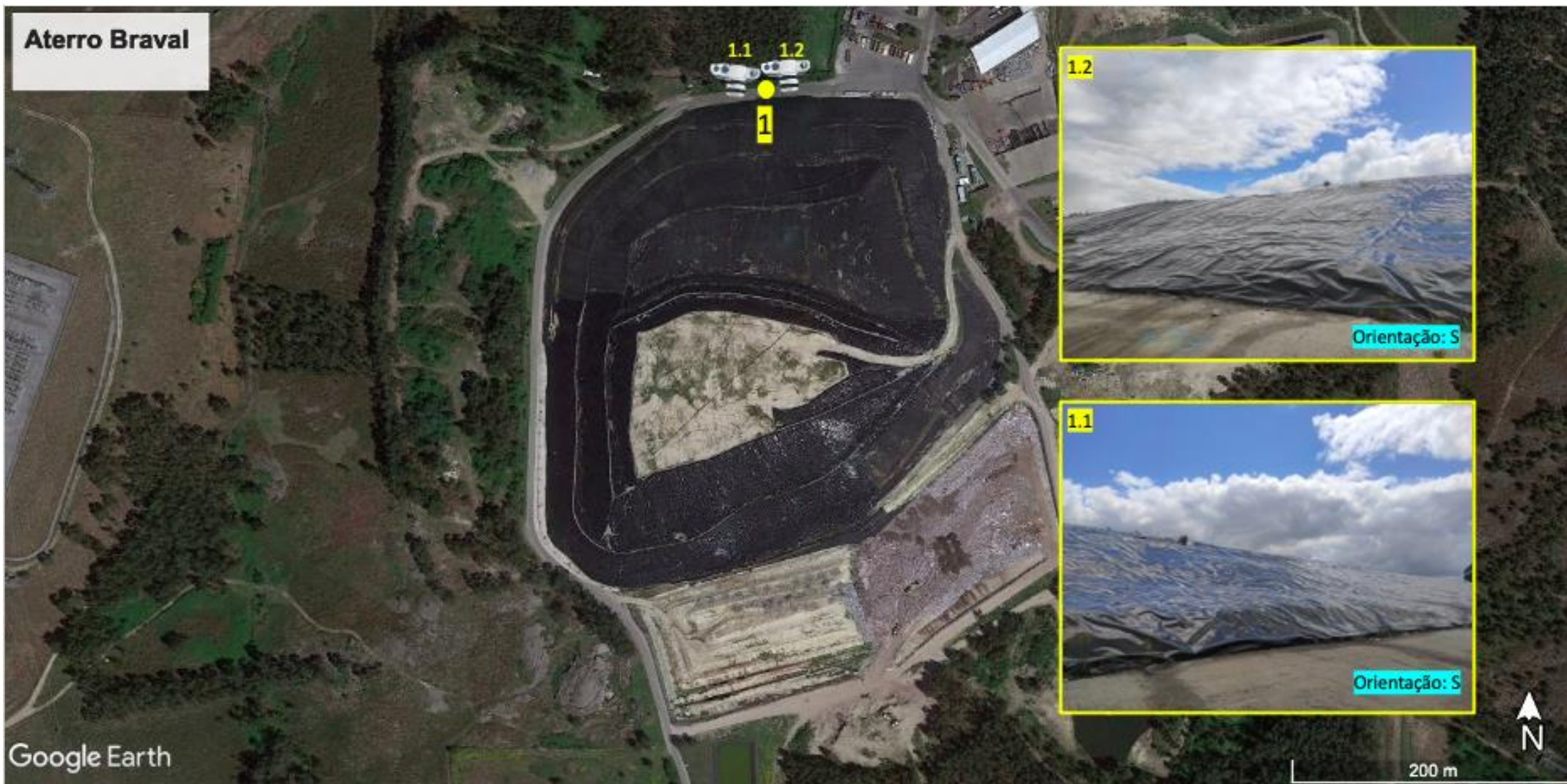


(página propositadamente em branco)

Anexo V – Pontos de Observação do aterro Braval



Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval

6.1



6.2



6.3



Fotos tiradas em 06/07/21

Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21



Fotos tiradas em 06/07/21



Fotos tiradas em 06/07/21

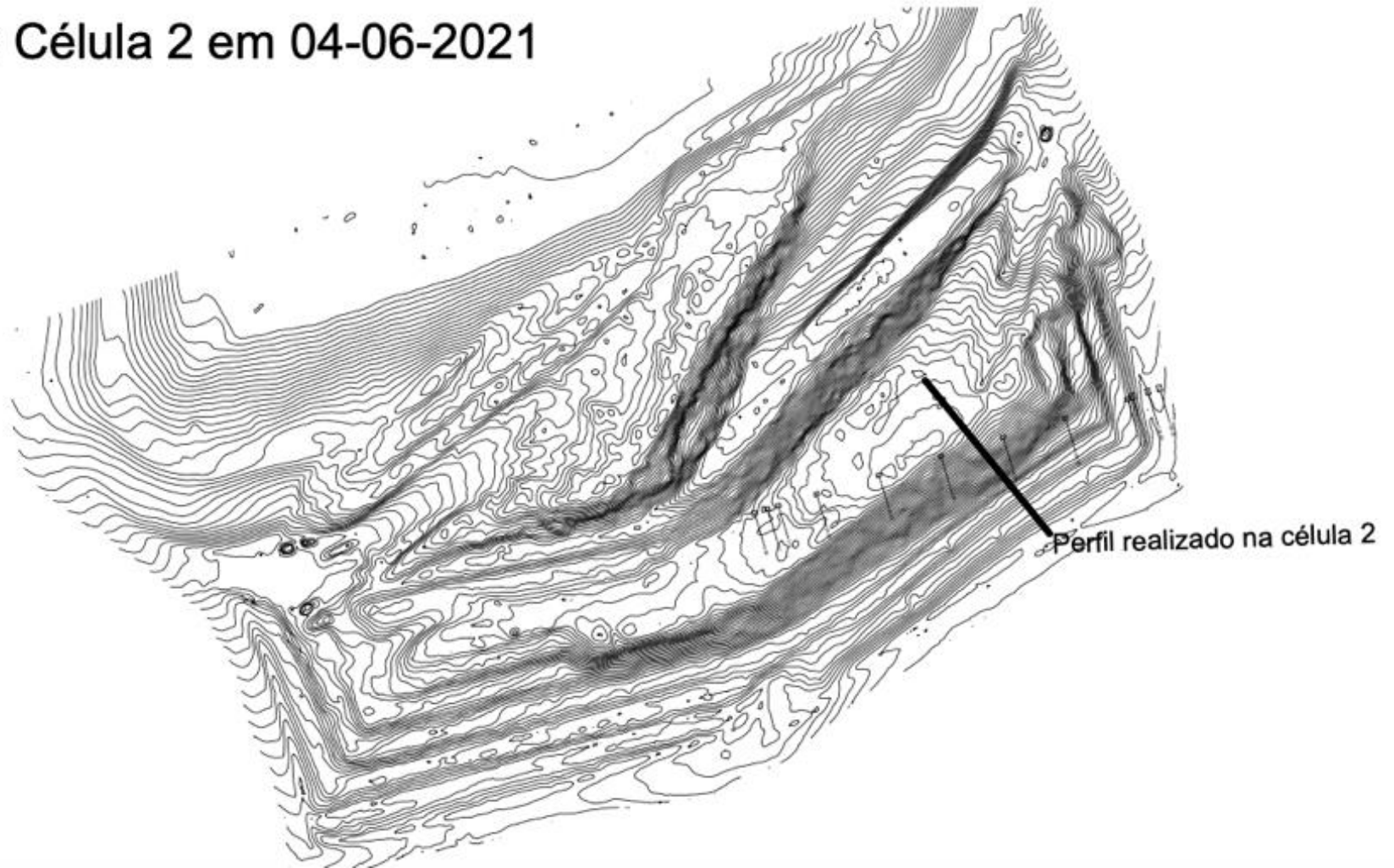
Aterro Braval



Fotos tiradas em 06/07/21

(página propositadamente em branco)

Aterro Célula 2 em 04-06-2021





Anexo VII – Mapa de sondagens realizadas na zona envolvente ao aterro



(página propositadamente em branco)

Anexo VIII – Resultados das sondagens representativas (S1 e S5)



**ENSAIO COM
PENETRÔMETRO
DINÂMICO MÉDIO**

Cliente: BRAVAL - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A.

Sondagem: S01

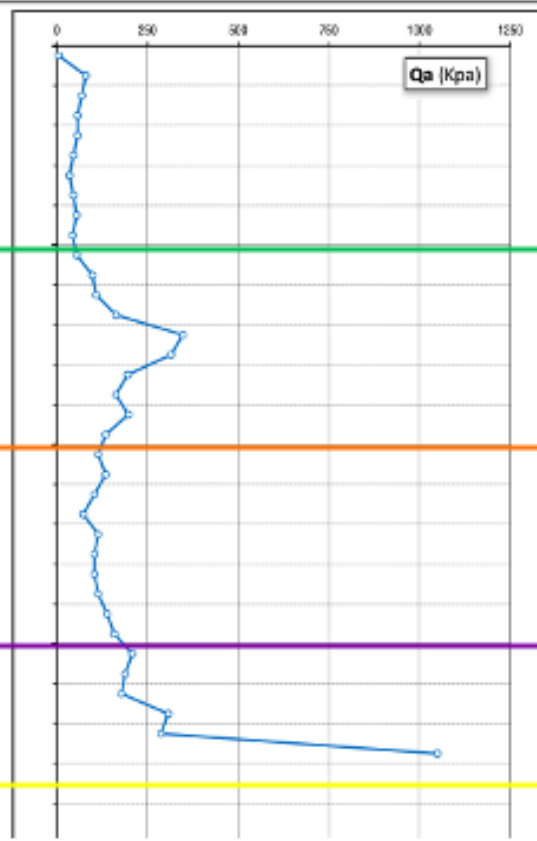
Obra: Estudo geológico/geotécnico

Data: Outubro de 2019

Local: Ferreira - Póvoa de Lanhoso

Equipamento: DPM 30-20

Prof. (m)	Número Golpes	Número varas	Qa (Kpa)
0.10	5	1	5
0.20	7	1	80
0.30	6	1	68
0.40	5	1	57
0.50	5	1	57
0.60	4	1	46
0.70	3	1	34
0.80	4	1	46
0.90	5	2	54
1.00	4	2	43
1.10	5	2	54
1.20	9	2	98
1.30	10	2	108
1.40	15	2	163
1.60	32	2	347
1.60	29	2	314
1.70	18	2	195
1.80	15	2	163
1.90	19	3	197
2.00	13	3	134
2.10	11	3	114
2.20	13	3	134
2.30	10	3	103
2.40	7	3	72
2.50	11	3	114
2.60	10	3	103
2.70	10	3	103
2.80	11	3	114
2.90	14	4	138
3.00	16	4	158
3.10	21	4	208
3.20	19	4	188
3.30	18	4	178
3.40	31	4	307
3.50	29	4	287
3.60	106	4	1048
3.70	Negra		
3.80			
3.90			
4.00			



5 pancadas

10 pancadas

20 pancadas

60 pancadas



**ENSAIO COM
PENETRÓMETRO
DINÂMICO MÉDIO**

Cliente: BRAVAL - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A.

Sondagem: S05

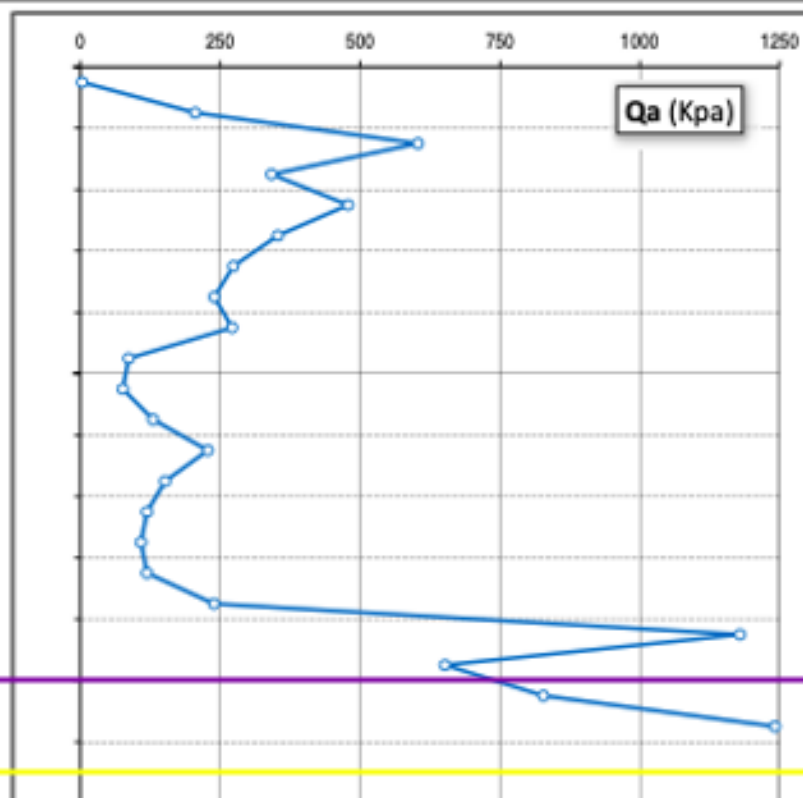
Obra: Estudo geológico/geotécnico

Data: Outubro de 2019

Local: Ferreiros - Póvoa de Lanhoso

Equipamento: DPM 30-20

Prof. (m)	Número Golpes	Número varas	Qa (Kpa)
0.10	3	1	3
0.20	18	1	205
0.30	53	1	604
0.40	30	1	342
0.50	42	1	478
0.60	31	1	353
0.70	24	1	273
0.80	21	1	239
0.90	25	2	271
1.00	8	2	87
1.10	7	2	76
1.20	12	2	130
1.30	21	2	228
1.40	14	2	152
1.50	11	2	119
1.60	10	2	108
1.70	11	2	119
1.80	22	2	239
1.90	114	3	1179
2.00	63	3	652
2.10	80	3	828
2.20	120	3	1241
2.30	Nega		
2.40			



50 pancadas

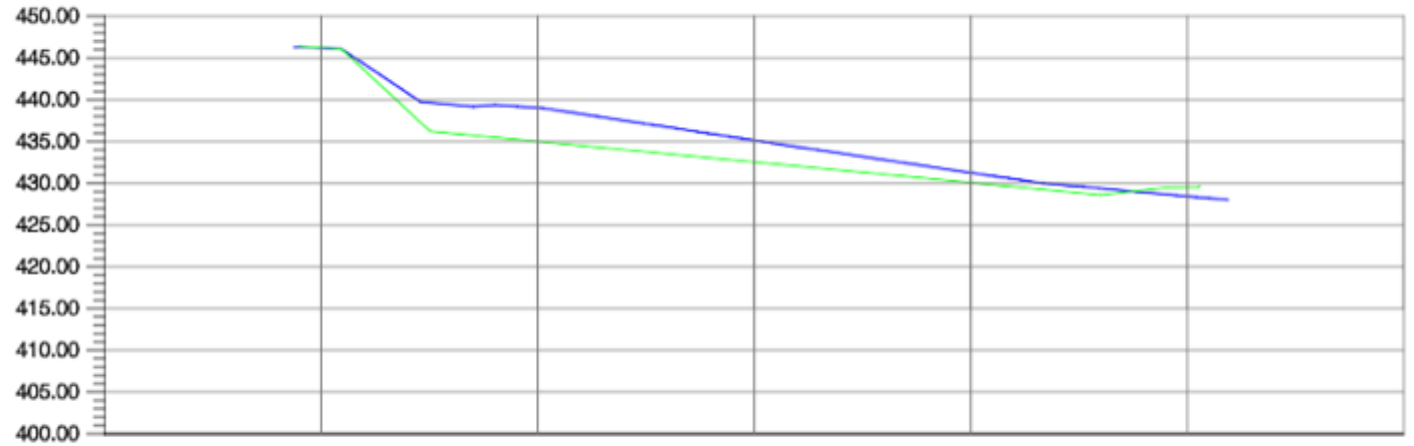
60 pancadas

Anexo IX – Linha de terreno natural e escavação do perfil de cálculo

IMP 103.dwf.png

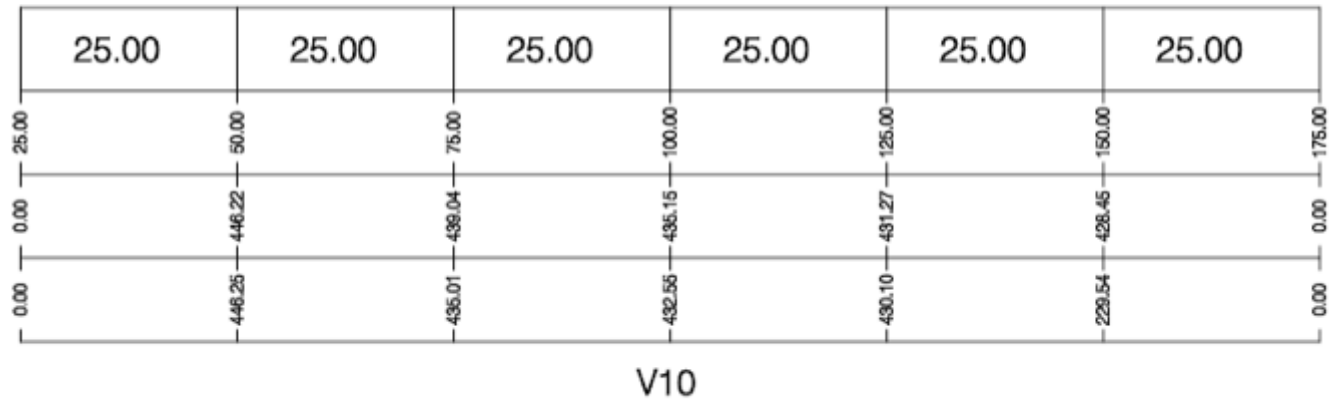


IMP 106.dwf.png

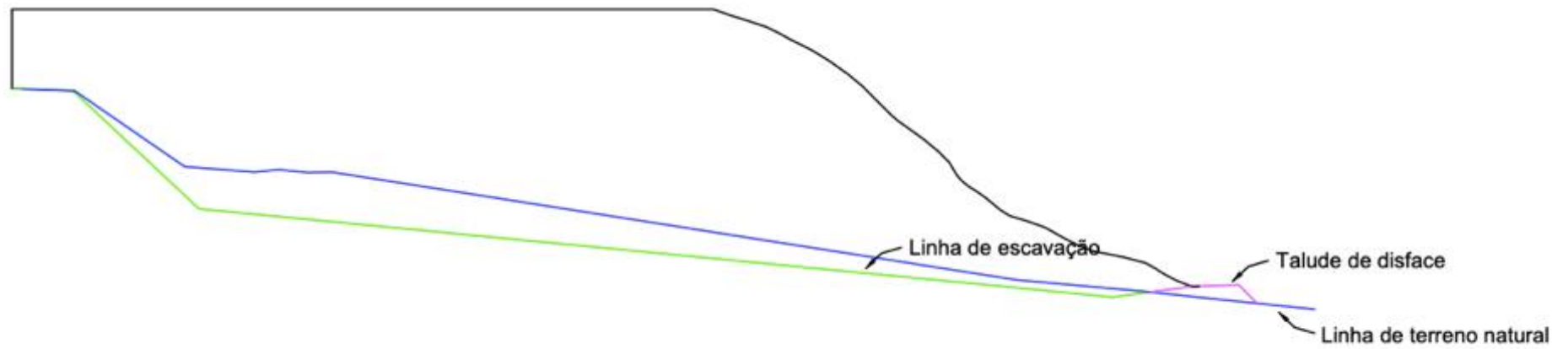


DISTANCIA	ENTRE PERFIS (m)
	ORIGEM
COTAS	TERRENO EXISTENTE <i>(blue dashed line)</i>
	TERRENO MODELADO <i>(green solid line)</i>

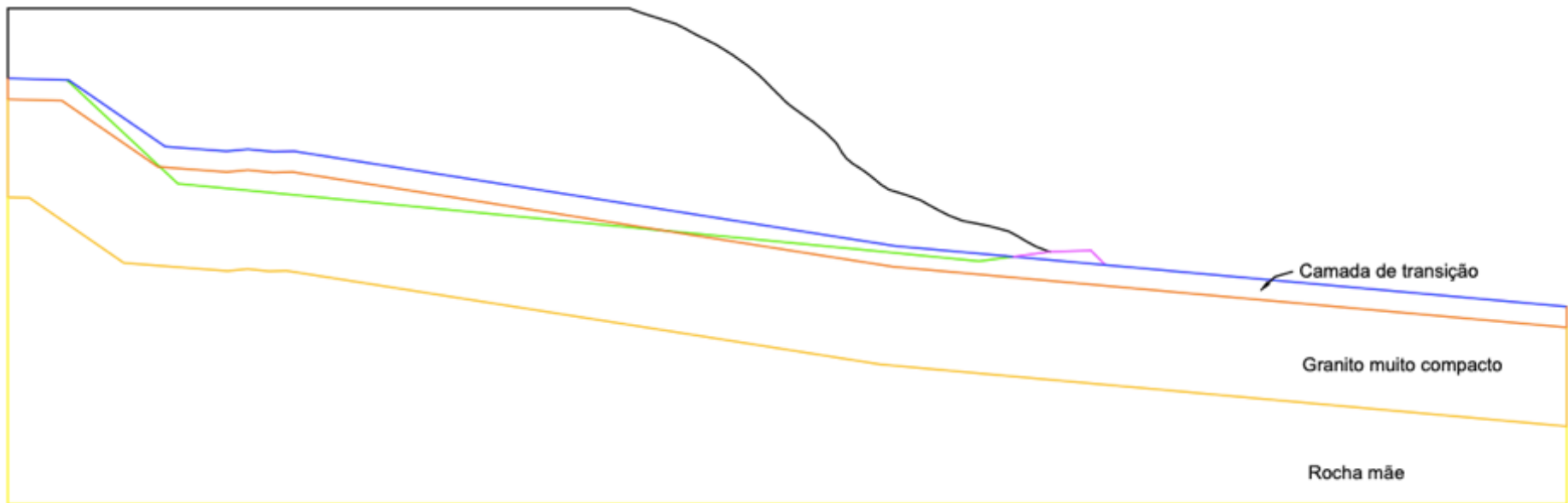
1/1000
↑
1/1000 →



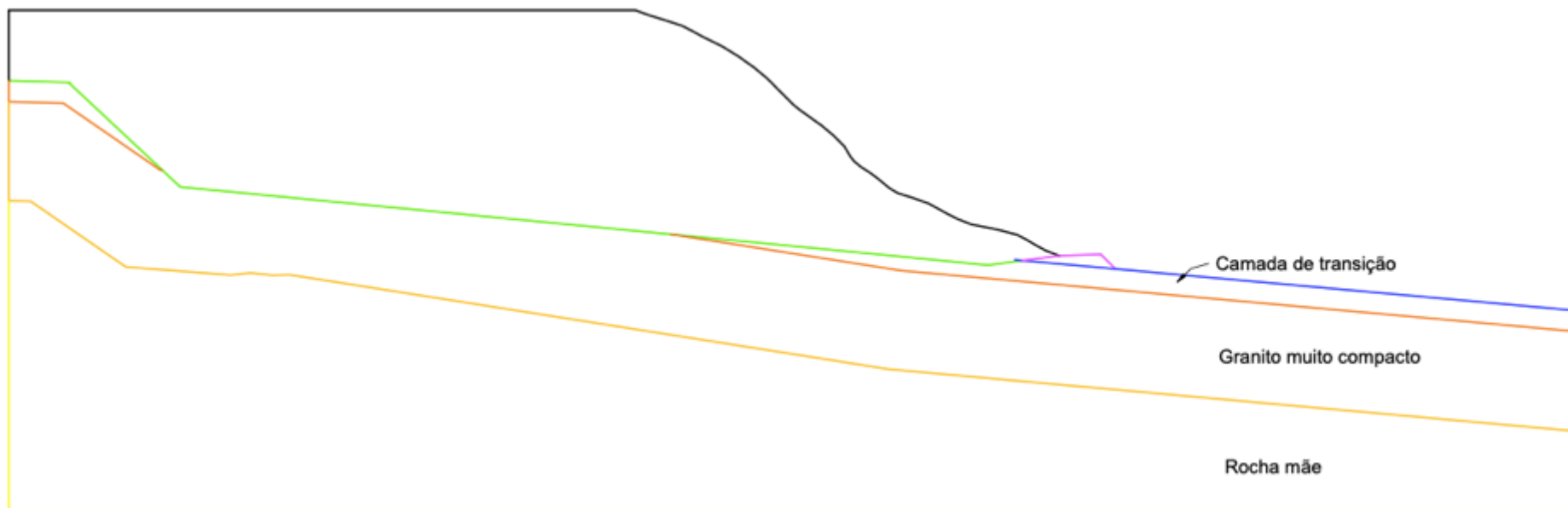
Anexo X – Diferentes modelos até chegar ao talude com geologia final



Perfil com situação atual (talude a 35°) + bancada de disface + linha de escavação + linha de terreno natural.



Sobreposição do perfil anterior com geologia subjacente.



Ajuste ao perfil anterior.

(página propositadamente em branco)

Anexo XI – Bibliografia utilizada para obtenção do valor dos parâmetros mecânicos de solo de bancada de disfarce e geologia subjacente ao aterro

Material	Parâmetros	Fonte bibliográfica
Solo bancada de disfarce	Peso específico	(Godoy, 1972)
	Coesão	(Mitchell, Guzikowski, & Villet , 1978)
	Ângulo de atrito	(Meyerhof, 1956)
Camada de transição	Peso específico	(Godoy, 1972)
	Coesão	(Mitchell, Guzikowski, & Villet , 1978)
	Ângulo de atrito	(Meyerhof, 1956)
Rocha mãe e Granito muito compacto	Peso específico	(Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011)
	Coesão	(Mitchell, Guzikowski, & Villet , 1978)
	Ângulo de atrito	(Hoek, 1997)

(página propositadamente em branco)

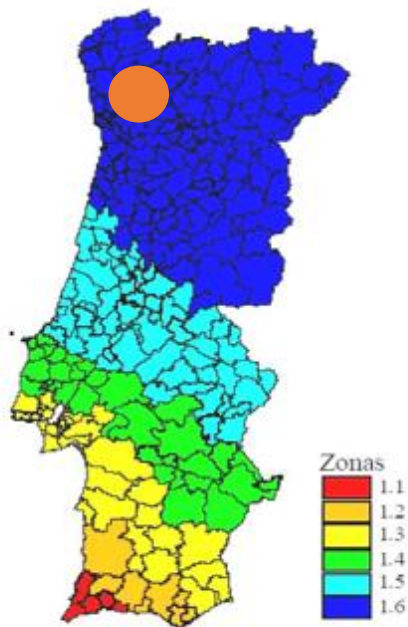
Anexo XII – Retroanálise realizada

Peso Volúmico (KN/m3)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)	FS
15	5	29	1,027
	5	30	1,059
	6	27	1,009
	6	28	1,042
	6	29	1,078
	7	26	1,018
	7	27	1,05
	8	25	1,026
	8	26	1,059
14	9	25	1,06
	5	29	1,046
	6	28	1,06
	7	26	1,038
13	8	25	1,046
	5	28	1,034
	5	29	1,067
	6	27	1,047
	7	26	1,062
12	8	25	1,068
	5	28	1,053
	6	26	1,038
	6	27	1,071
11	7	25	1,052
	5	27	1,043
	6	26	1,066

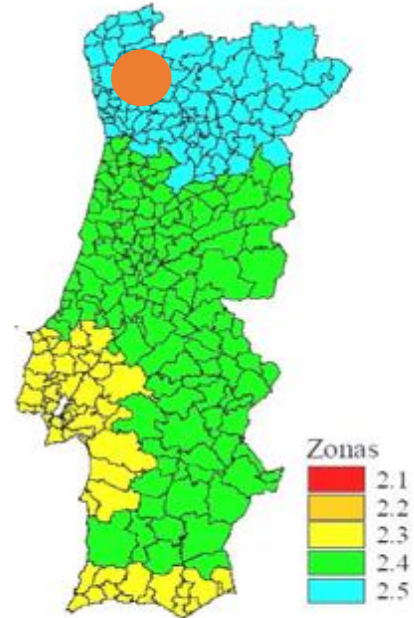
(página propositadamente em branco)

Anexo XIII – Cálculo do coeficiente sísmico

ACÇÃO TIPO 1:												
LOCAL	IMPORTÂNCIA	TERRENO	Zona	agr	S	r	Y1	ag	agr/ag	α	kh	kv
Braga	1	Rocha	1.6	0,35	1,2	2	1	0,35	1	0,035678	0,021407	0,010703
ACÇÃO TIPO 2:												
LOCAL	IMPORTÂNCIA	TERRENO	Zona	agr	S	r	Y1	ag	agr/ag	α	kh	kv
Braga	1	Rocha	2.5	0,8	1,35	2	1	0,8	1	0,081549	0,055046	0,027523



Acção sísmica Tipo 1



Acção sísmica Tipo 2

kh	kv
0,06	0,03

Escolhidos os coeficientes sísmicos mais desfavoráveis.

(página propositadamente em branco)



Mirafi® PET Geotextiles

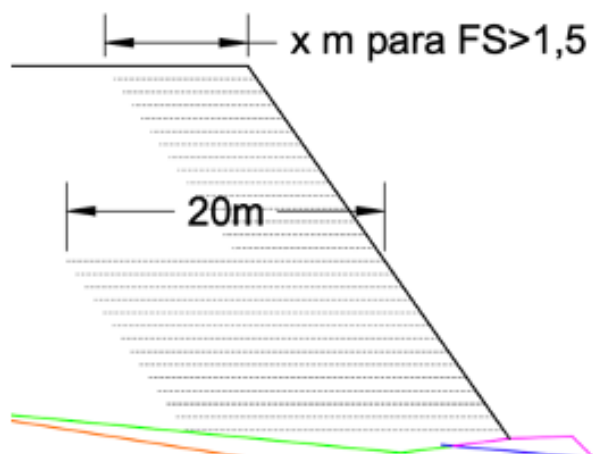
Properties of Mirafi® PET Geotextiles						
Property	Unit	PET 200-50	PET 300-50	PET 400-50	PET 600-50	PET 800-50
Initial Mechanical Properties						
Characteristic initial strength, T_c (ISO 10319)	MD kN/m	200	300	400	600	800
Characteristic initial strength (ISO 10319)	CD kN/m	50	50	50	50	50
Characteristic initial strength at 5% strain (ISO 10319)	MD kN/m	100	150	200	300	400
Strain at initial strength	MD %	8	8	8	8	8
Material reduction factor creep-rupture, f_{cr}						
at 10 years design life		1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
at 50 years design life		1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
at 100 years design life		1.43	1.43	1.43	1.43	1.43



(página propositadamente em branco)

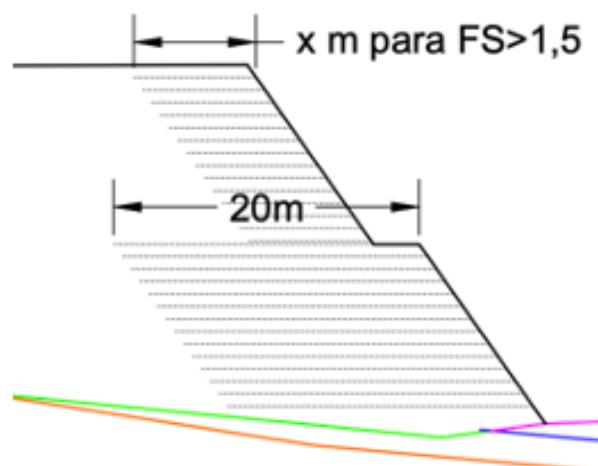
Anexo XV – Esquematização da aplicação de geotêxtil em reforço heterogêneo com 20 metros de comprimento

0 bancadas



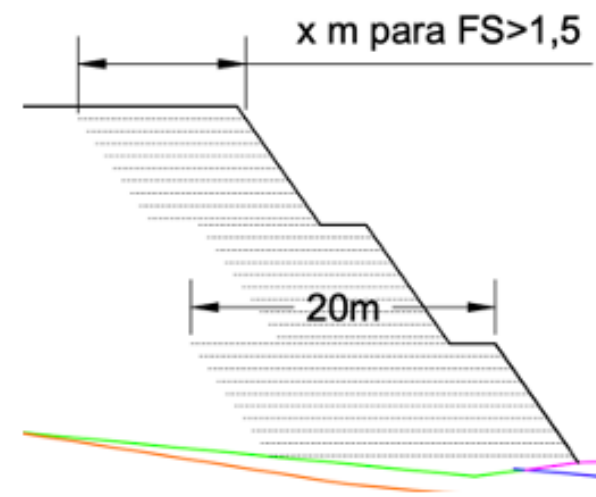
Reforço com $20\text{ m} = \frac{1}{2} H$ da bancada

1 bancadas



Reforço com $20\text{ m} = \frac{1}{2} H$ da bancada

2 bancadas

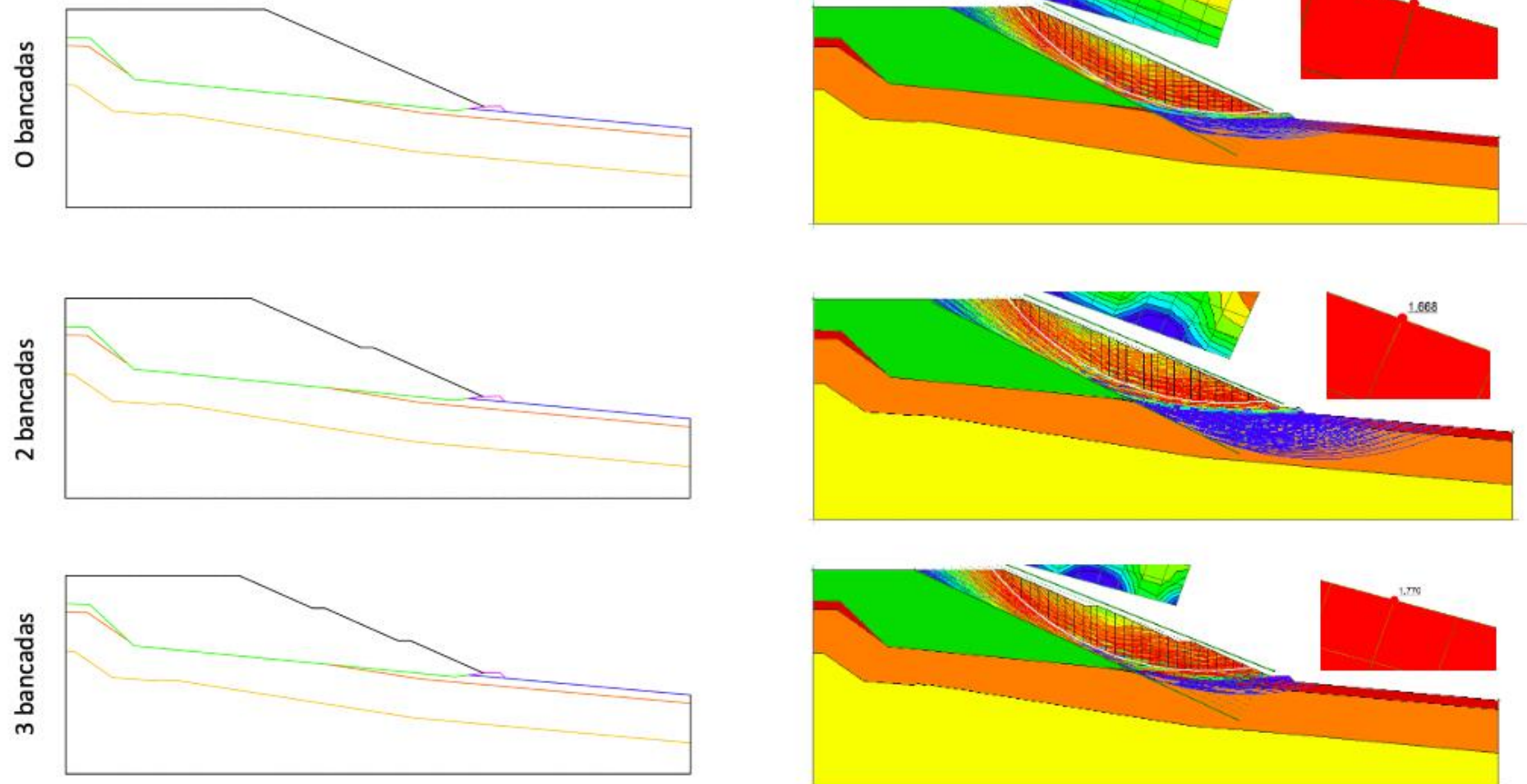


Reforço com $20\text{ m} = \frac{1}{3} H$ da bancada

(página propositadamente em branco)

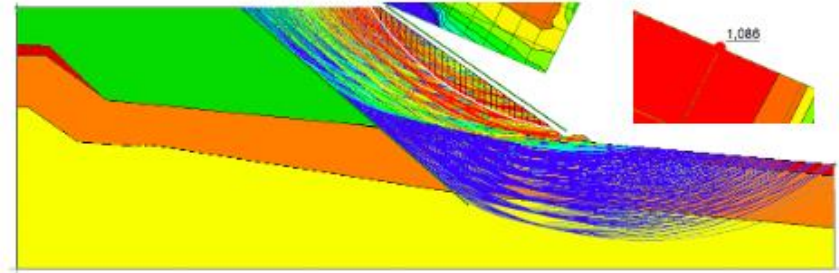
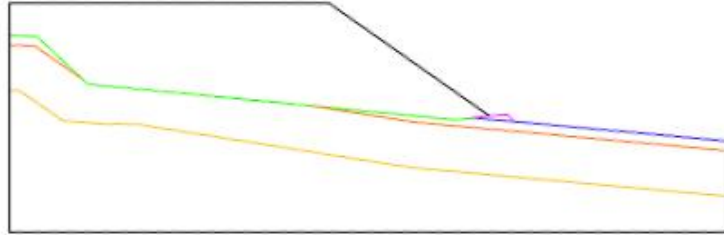
Anexo XVI – Representação dos modelos com e sem reforço e respectivos fatores de segurança

Talude 24° (Sem reforço)

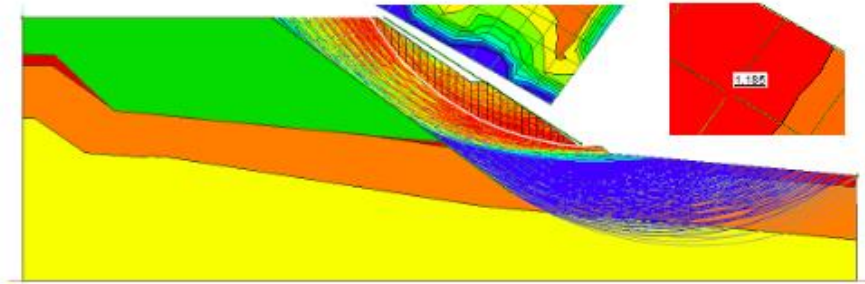
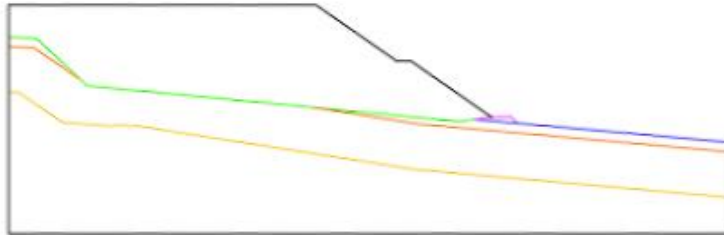


Talude 35°(Sem reforço)

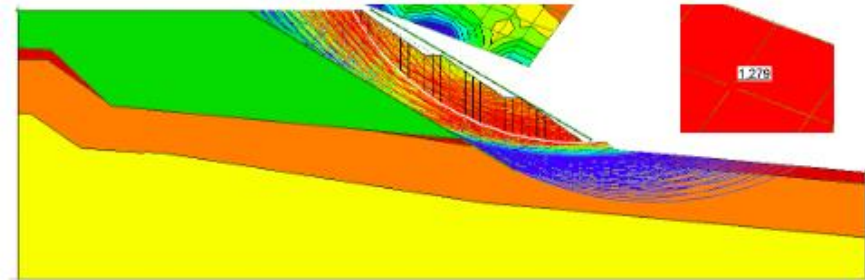
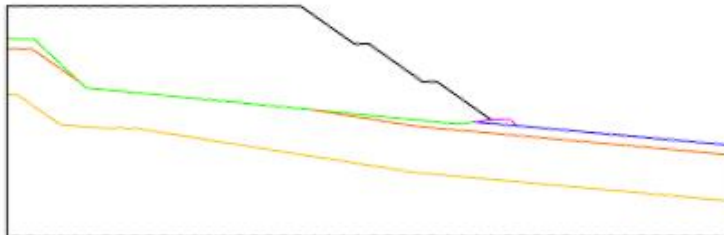
0 bancadas



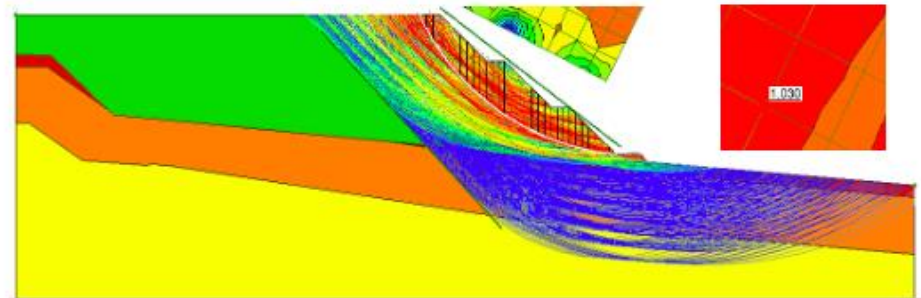
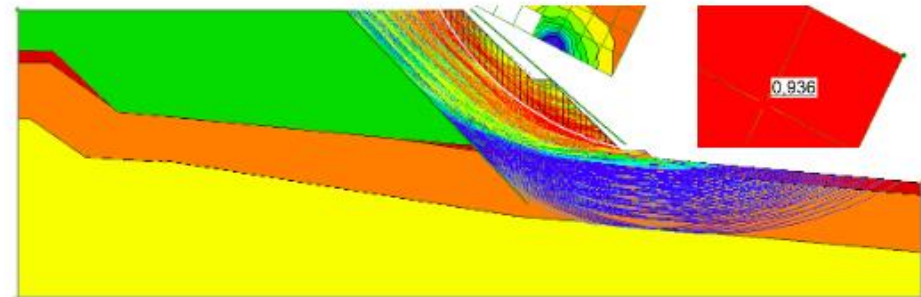
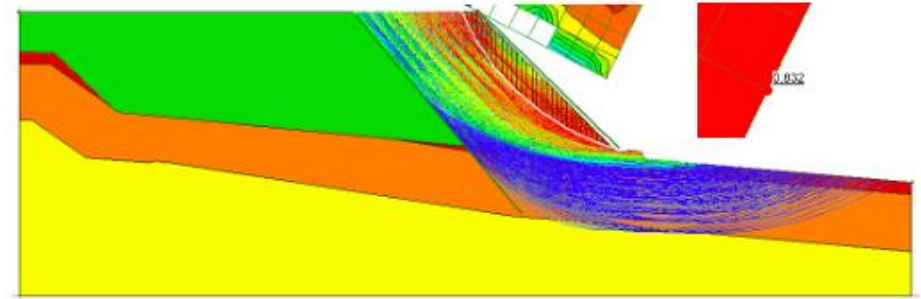
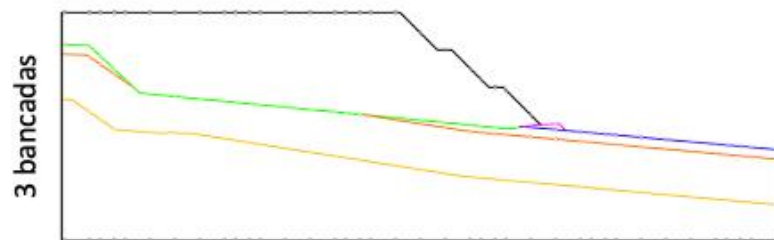
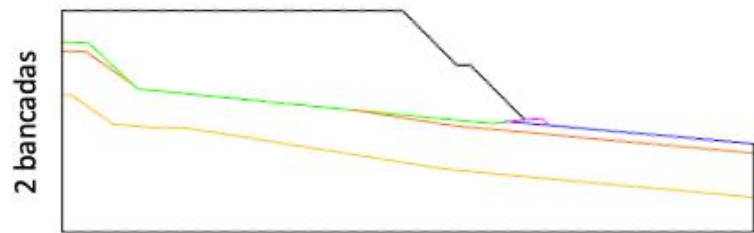
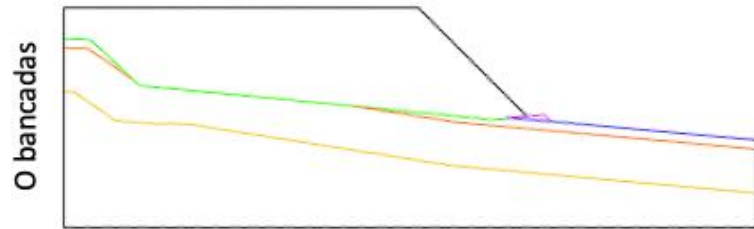
2 bancadas



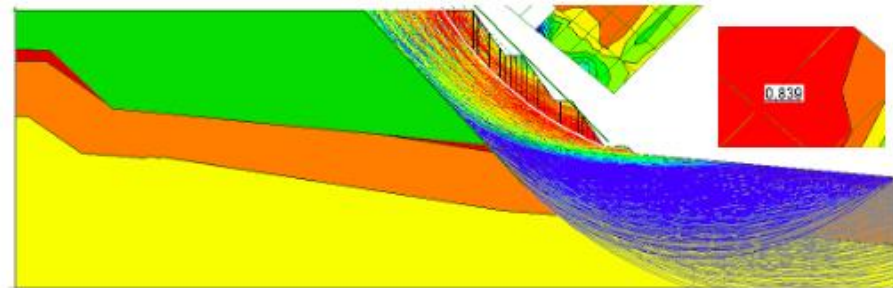
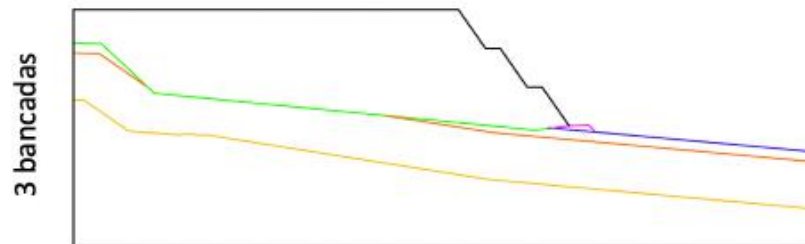
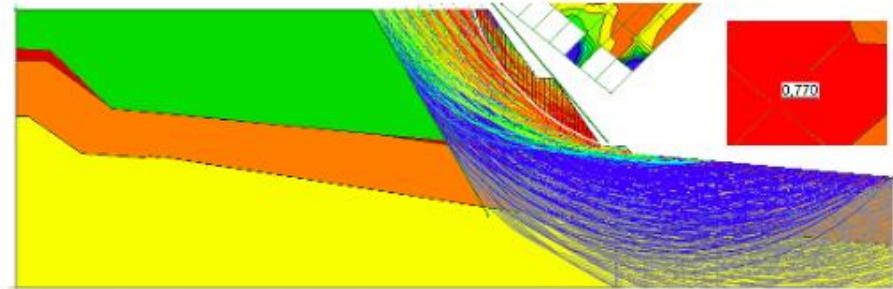
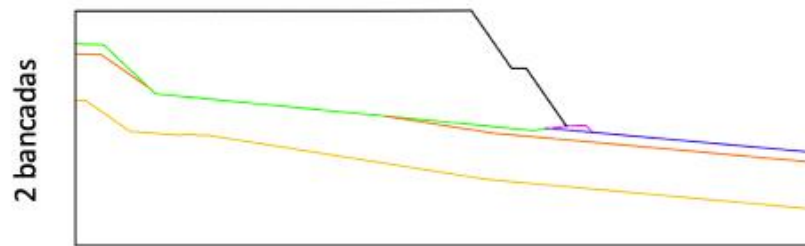
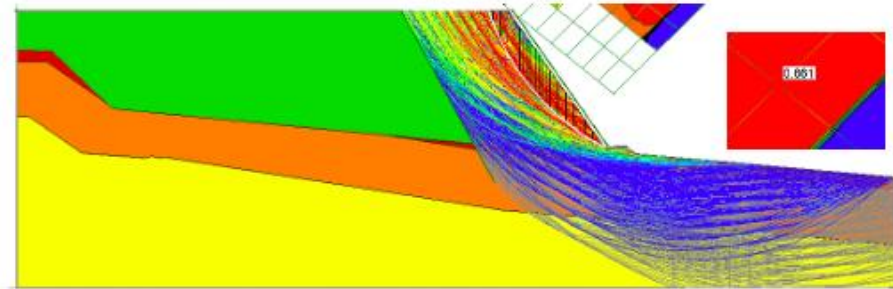
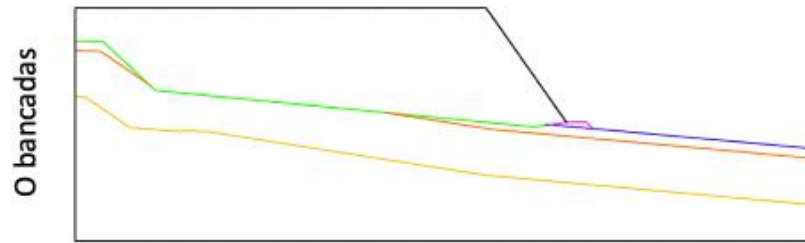
3 bancadas



Talude 45°(Sem reforço)

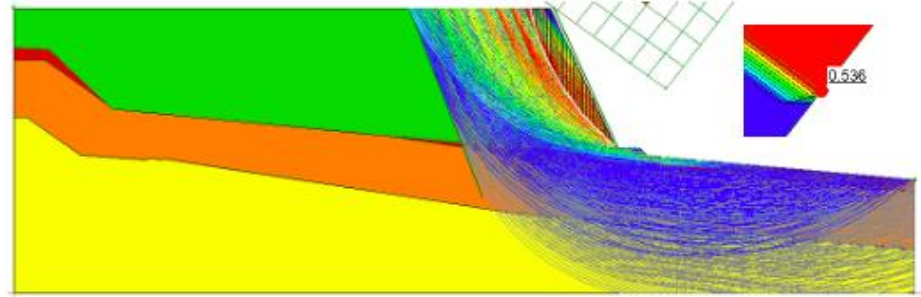
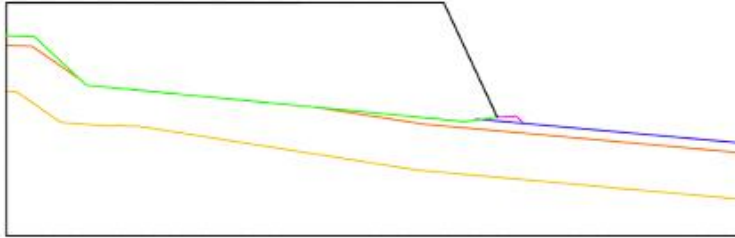


Talude 55°(Sem reforço)

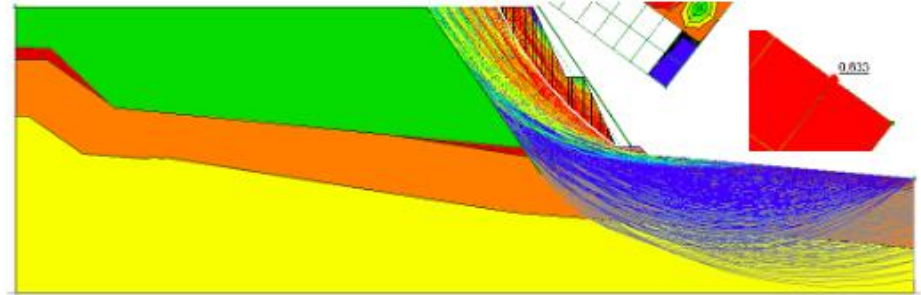
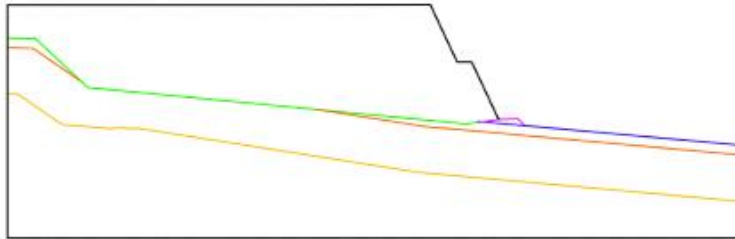


Talude 65°(Sem reforço)

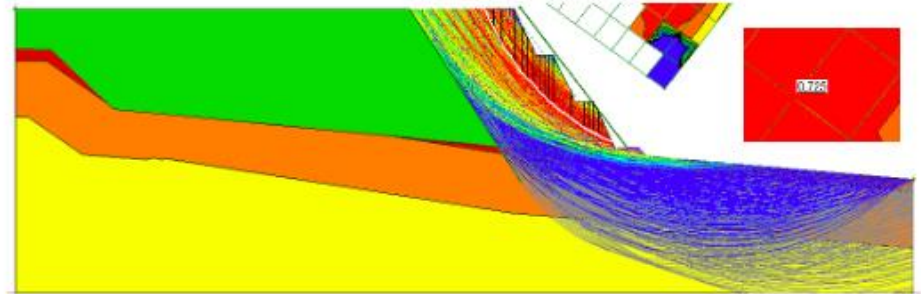
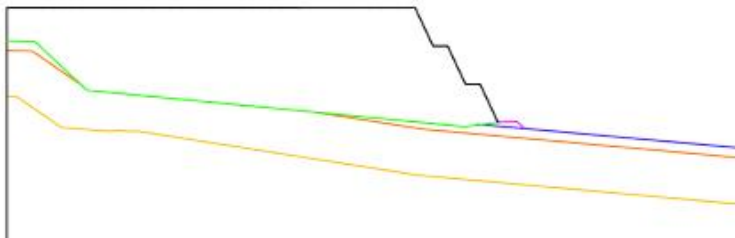
0 bancadas



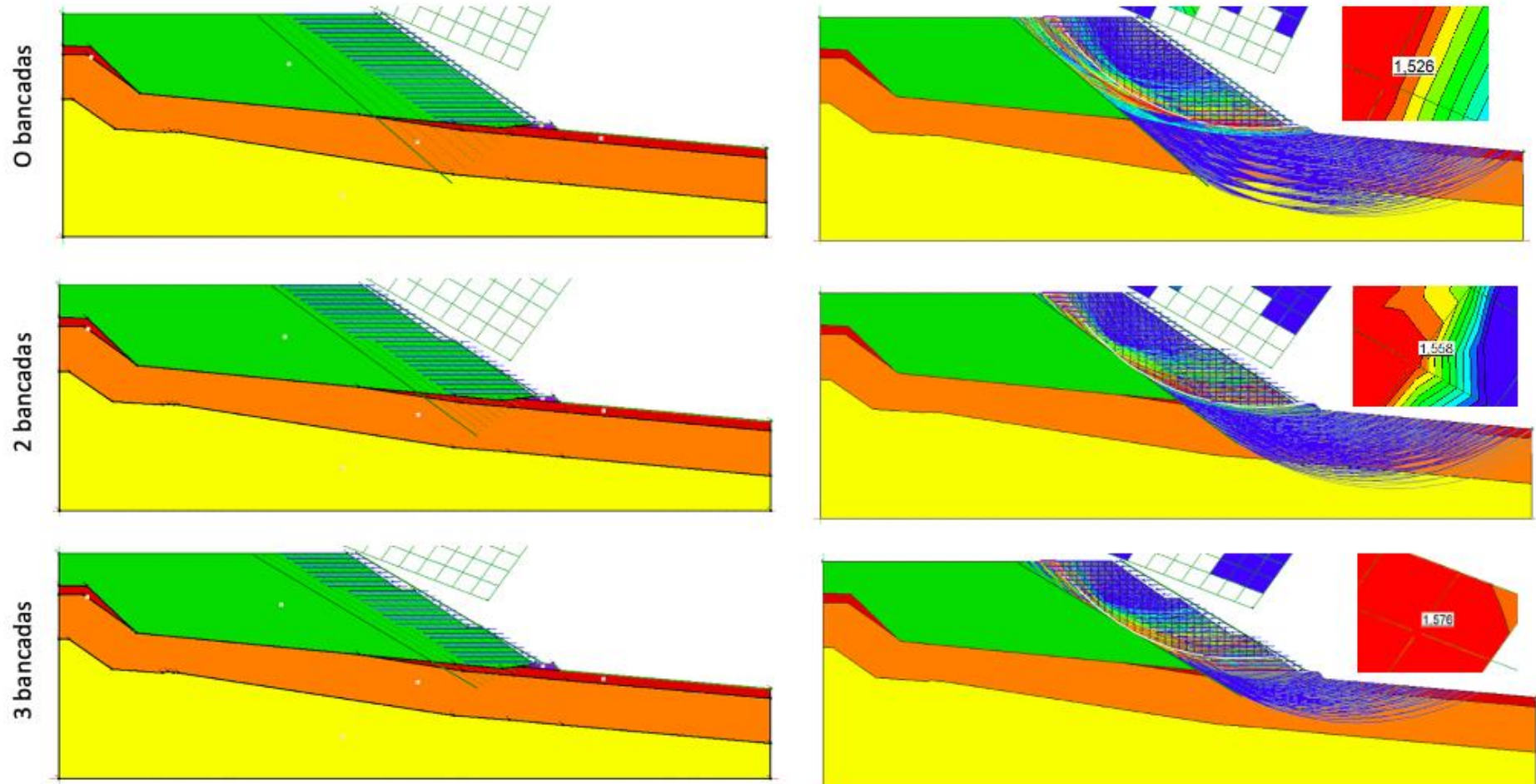
2 bancadas



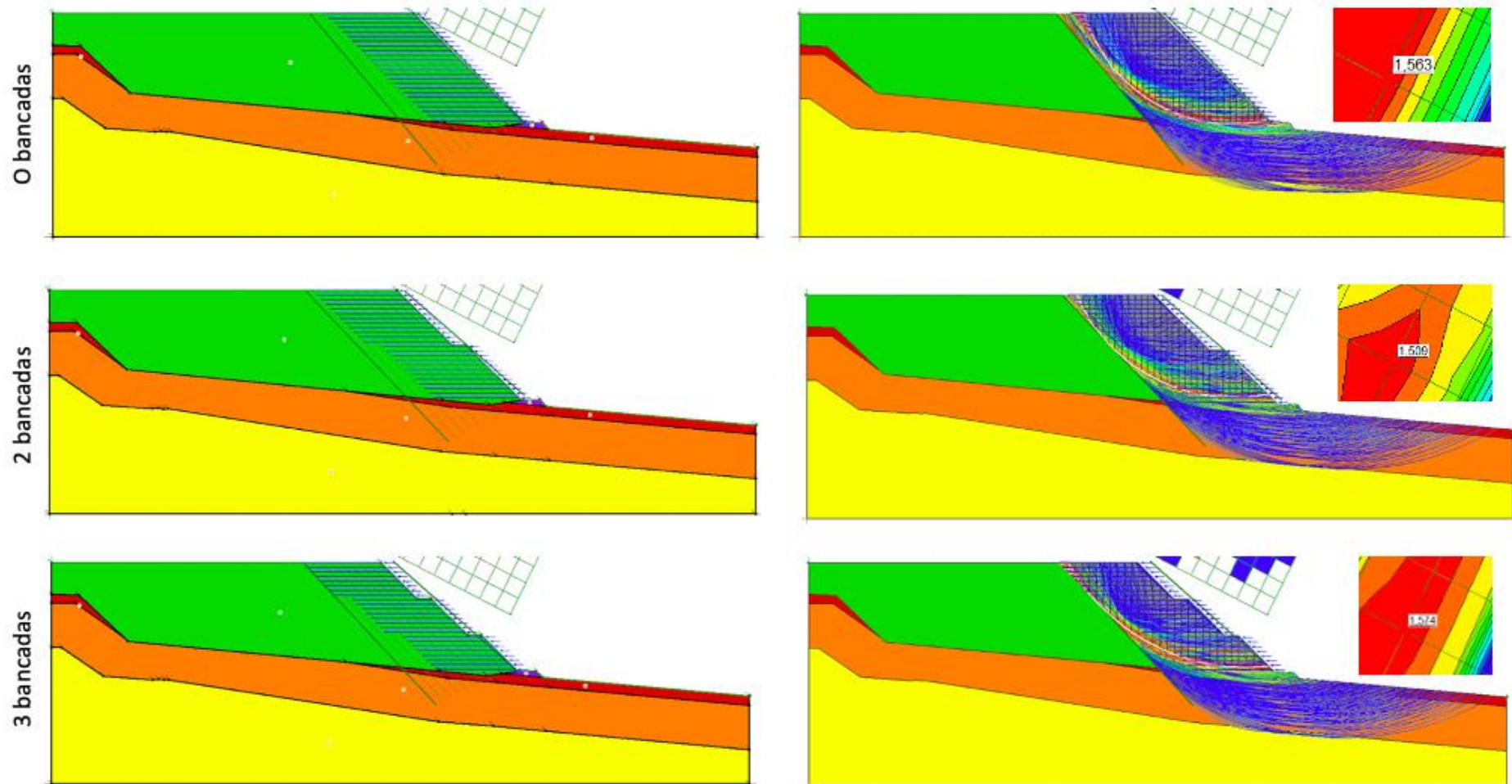
3 bancadas



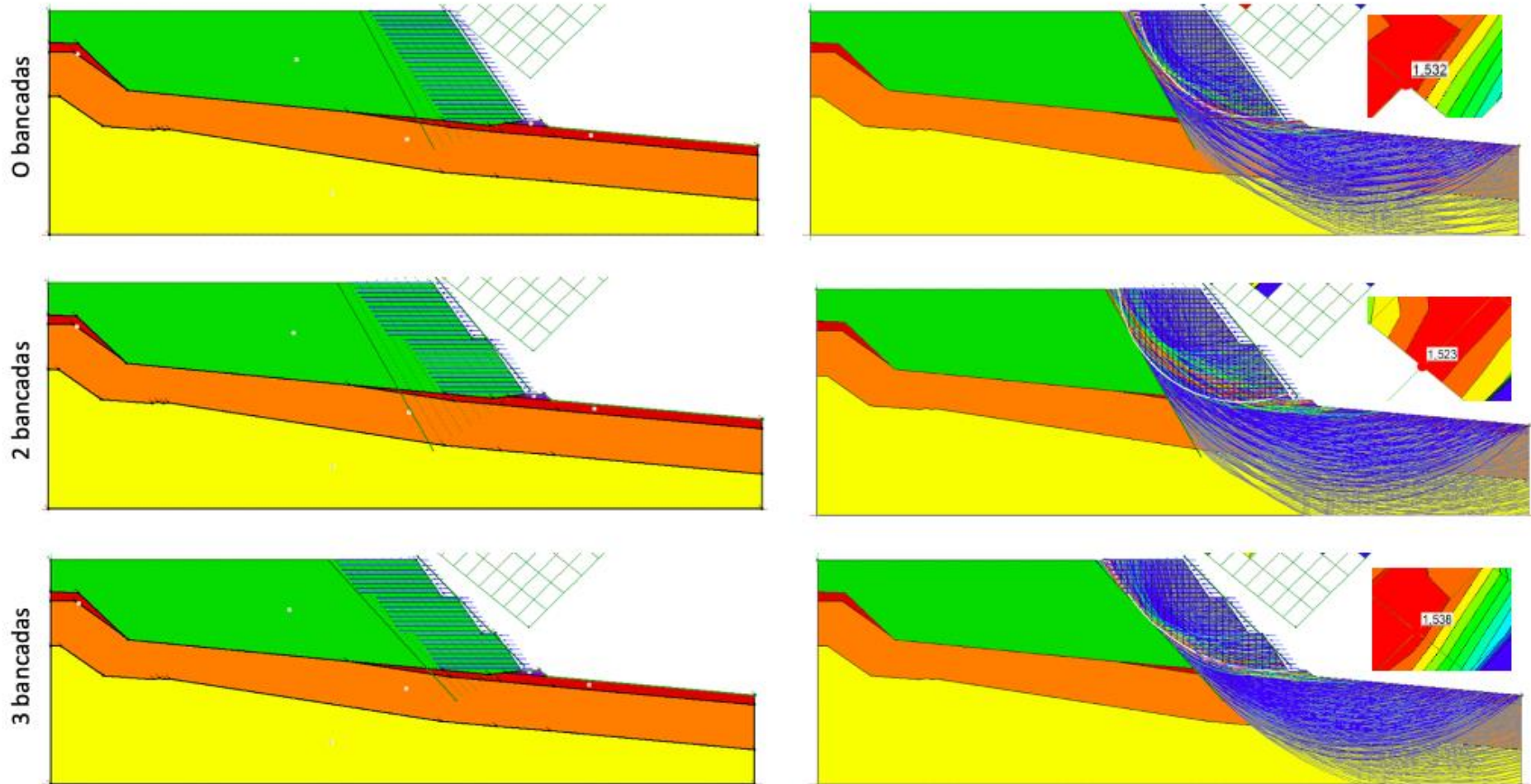
Talude 35°(Com reforço homogêneo)



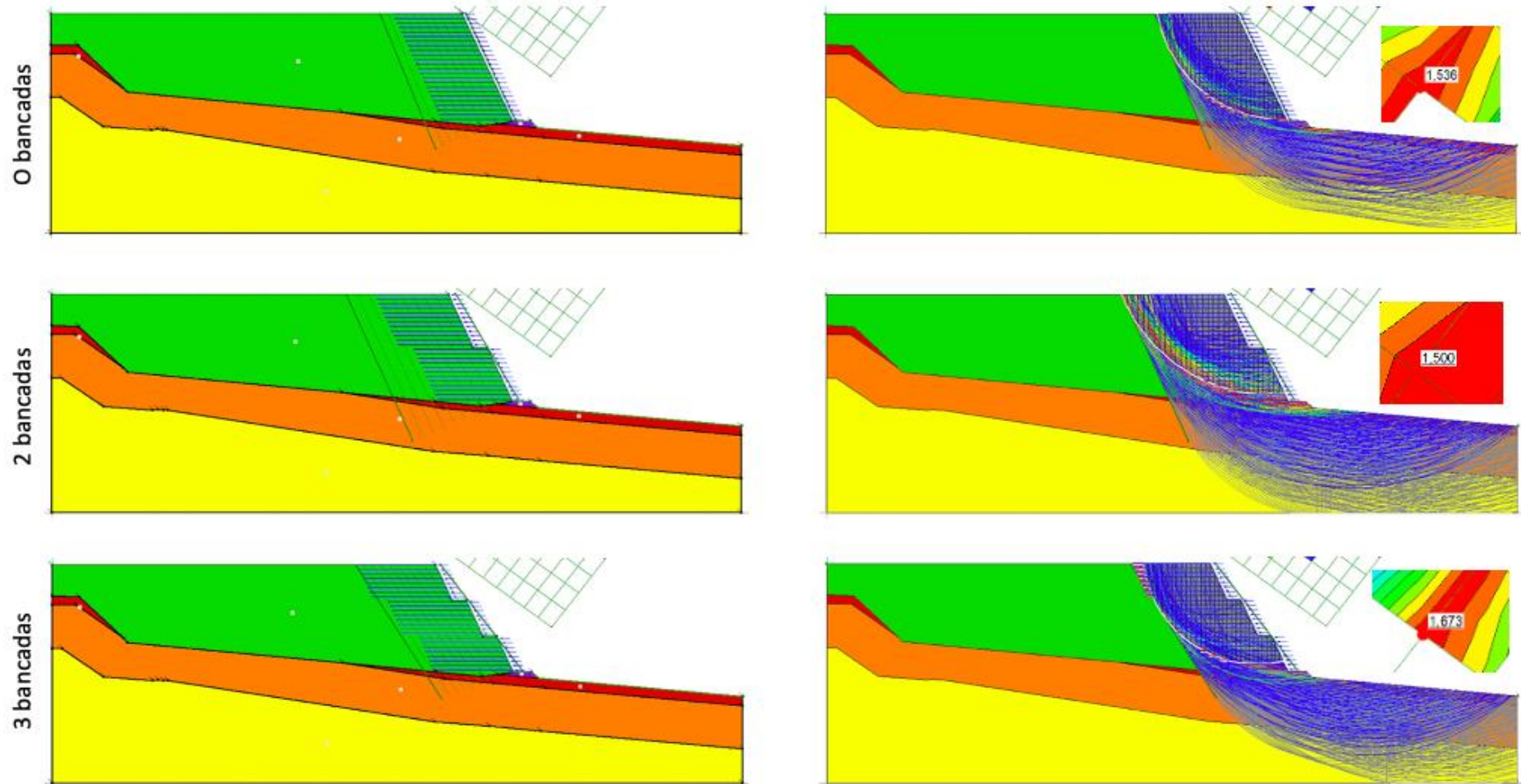
Talude 45° (Com reforço homogêneo)



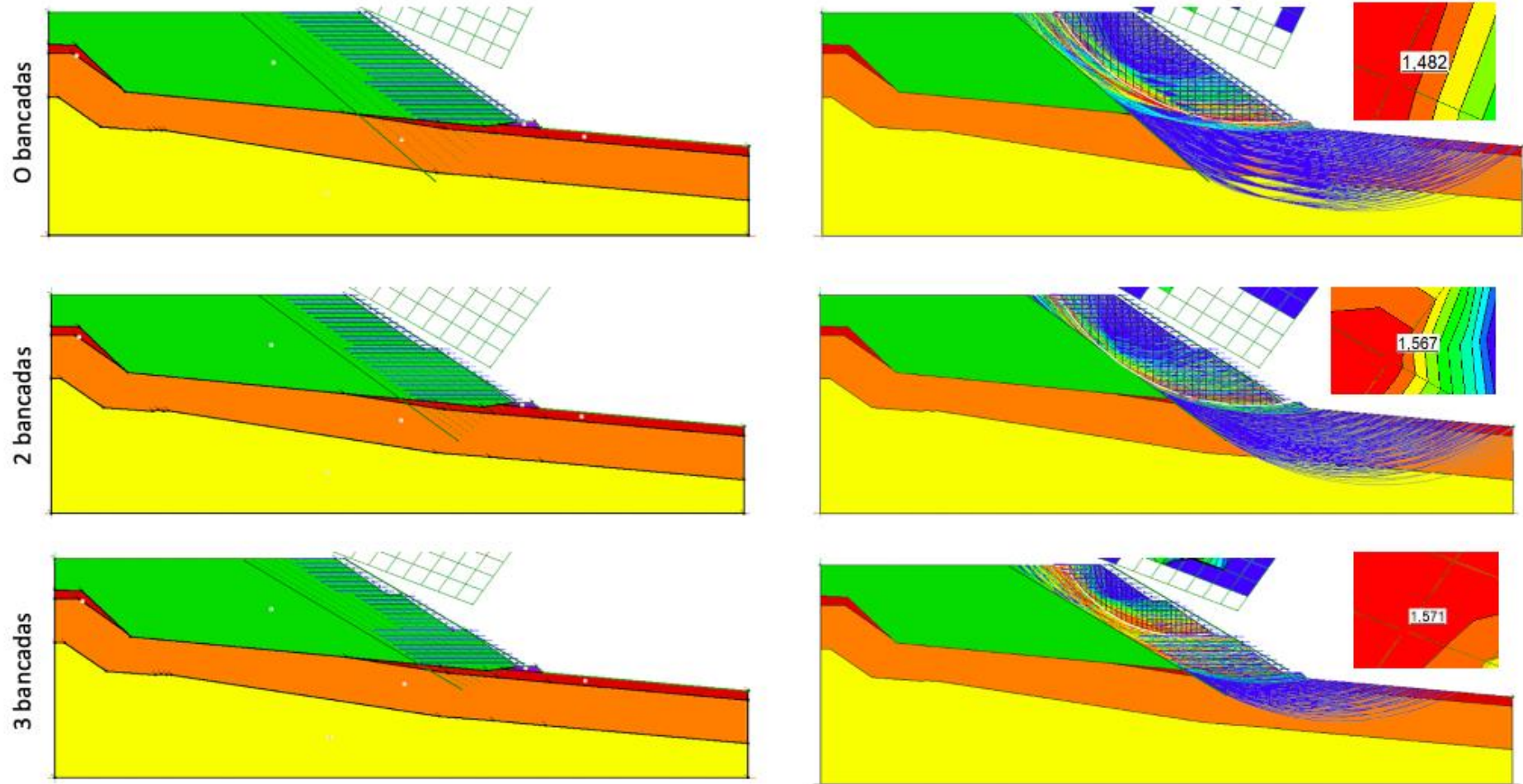
Talude 55°(Com reforço homogêneo)



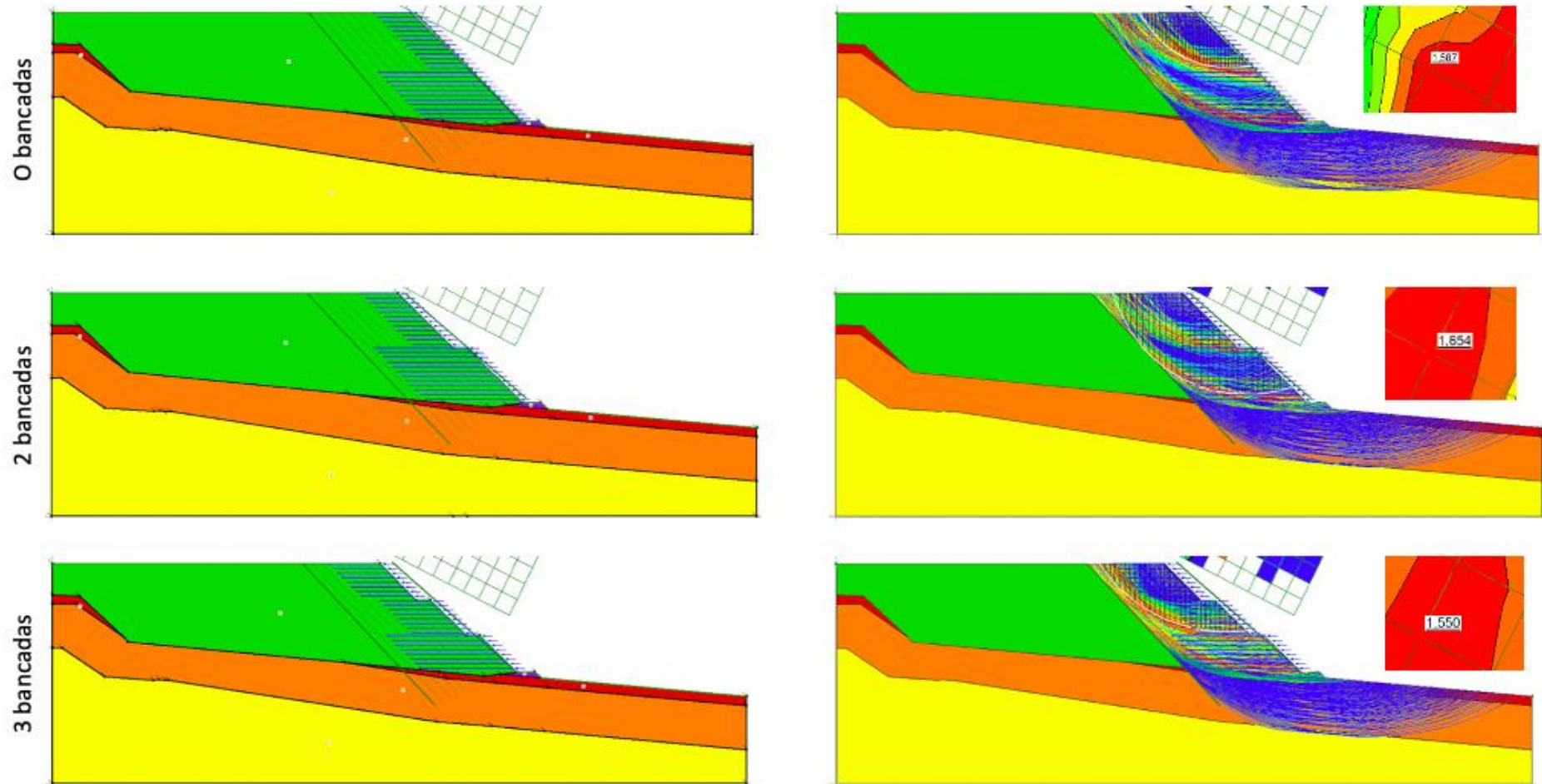
Talude 65°(Com reforço homogêneo)



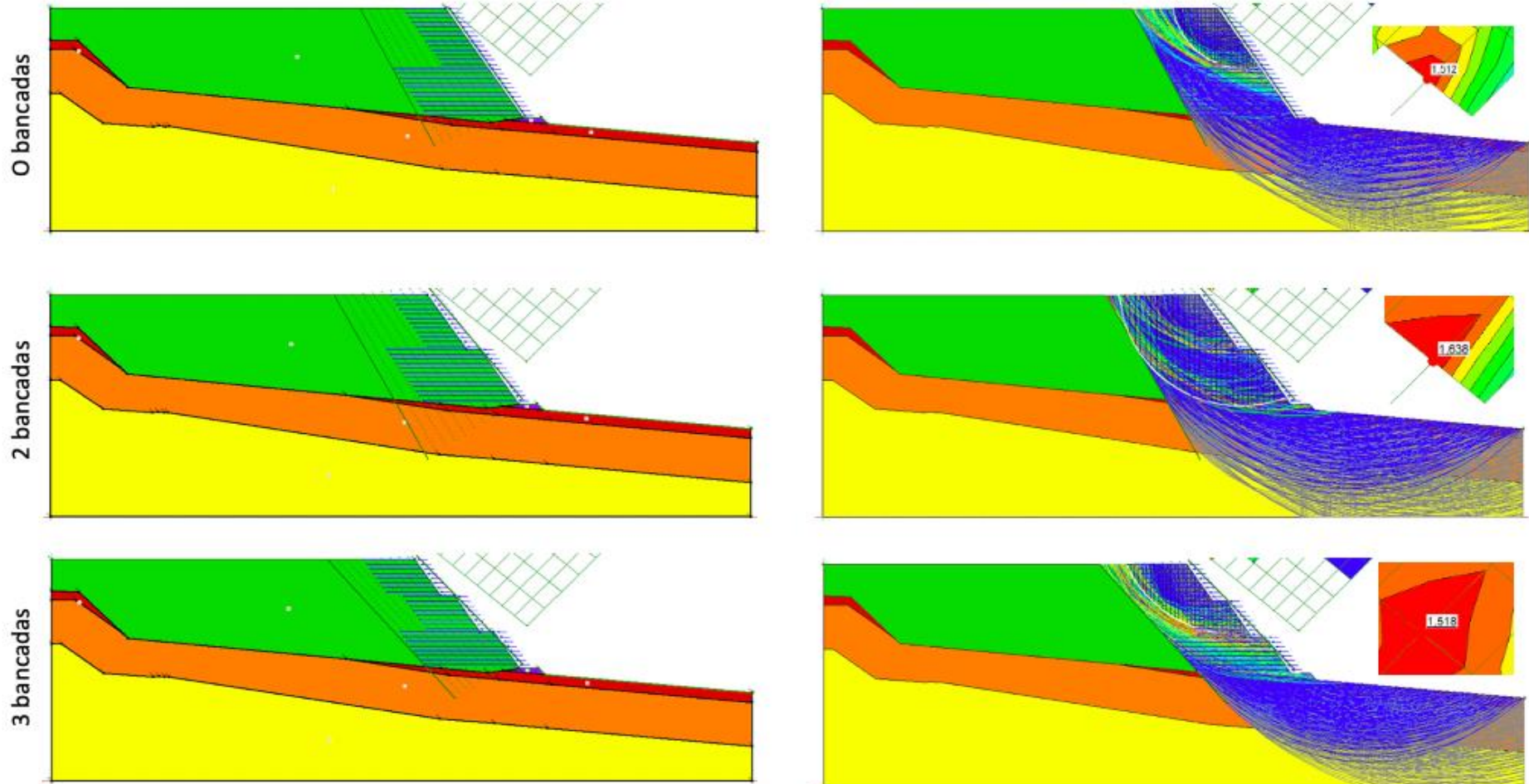
Talude 35° (Com reforço heterogêneo)



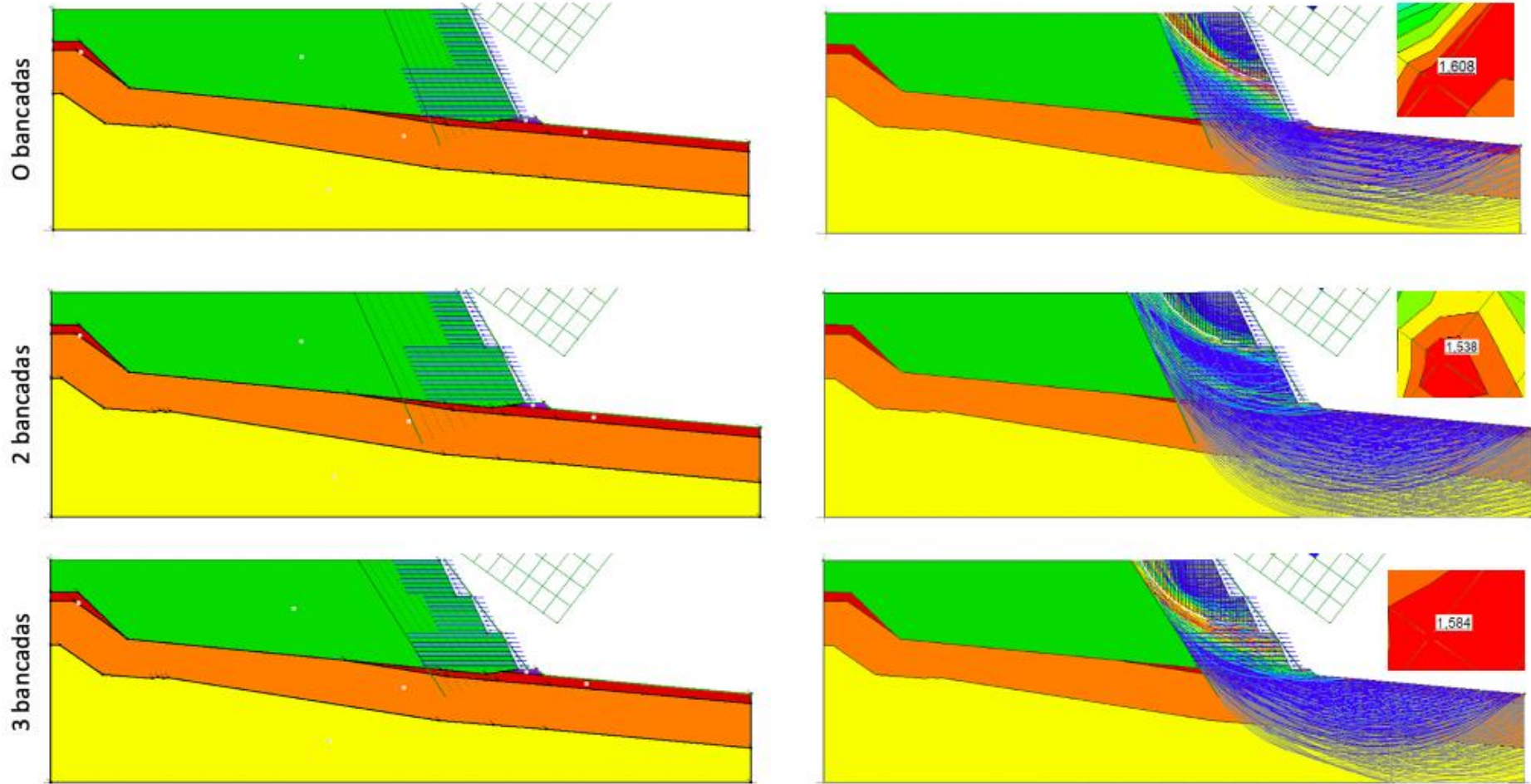
Talude 45° (Com reforço heterogêneo)



Talude 55° (Com reforço heterogêneo)



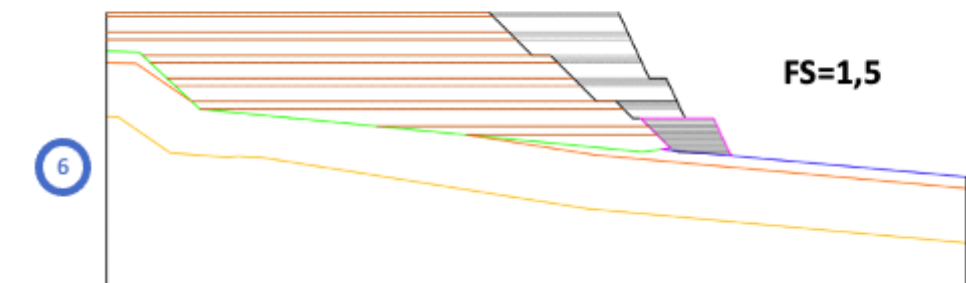
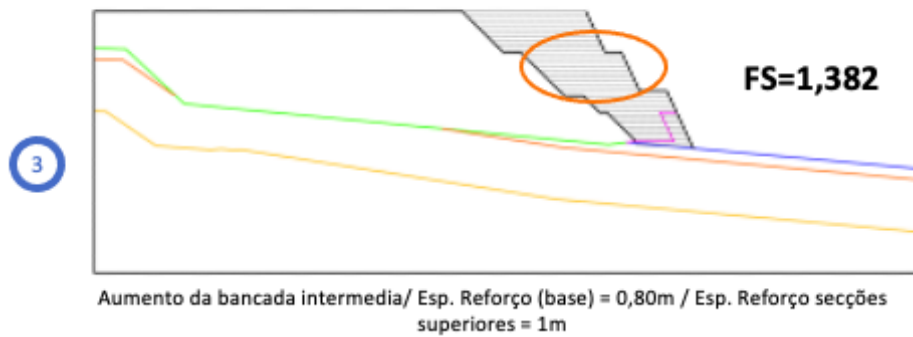
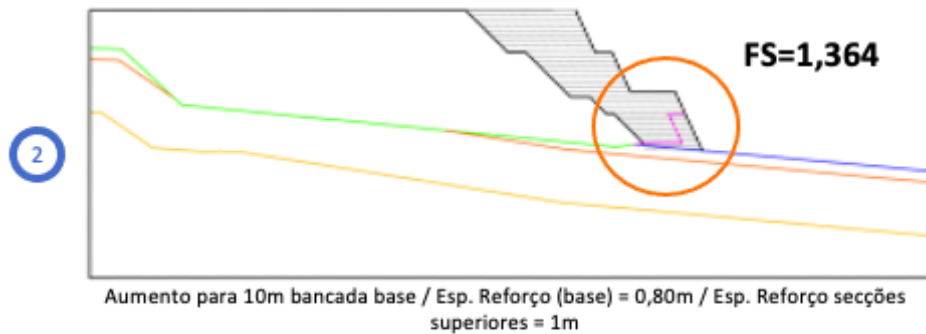
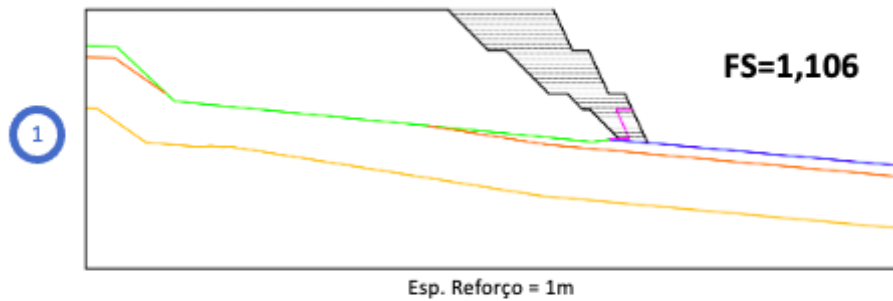
Talude 65°(Com reforço heterogéneo)



		Talude 24°			Talude 35° (simplificada)			Talude 45°			Talude 55°			Talude 65°		
Nº bancadas		0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Sem reforço	Mom. estático	1,551	1,668	1,77	1,086	1,185	1,279	0,832	0,936	1,03	0,678	0,77	0,839	0,536	0,633	0,725
	Com c.s.	1,34	1,43	1,508	0,969	1,052	1,13	0,755	0,842	0,925	0,603	0,701	0,756	0,507	0,573	0,658
Com reforço homogéneo	Mom. estático	Sem reforço porque FS > 1.5			1,526	1,558	1,512	1,563	1,509	1,574	1,532	1,523	1,538	1,536	1,5	1,673
	Com c.s.				1,325	1,303	1,316	1,306	1,309	1,299*	1,363	1,31	1,342	1,337	1,323	1,315
Com reforço heterogéneo	Mom. estático				1,539	1,567	1,581	1,587	1,654	1,55	1,512	1,638	1,518	1,608	1,538	1,584

C.S – Coeficiente de Segurança

Anexo XVII – Sequência de modelos até chegar a solução ótima



(página propositadamente em branco)

Anexo XVIII – Pormenorização dos volumes de encaixe, metros lineares de reforço e custos para a solução de raiz e caso atual

		Solução de raiz					Caso atual			
		Reforço homogéneo Reforço heterogéneo					Reforço heterogéneo			
		Nº bancadas		0	1	2	2			
Volume	V encaixe (m3)	24°	183 000		178 000	173 000	252 381 (em que 24% solos)	+17%		
		35°	215 000	+18%	210 000	205 000				
		45°	231 000		226 000	221 000				
		55°	243 000		238 000	233 000				
		65°	252 000		247 000	242 000				
Reforço	Especificações de reforço	35°	19m	17m	17m	14m	14m	10m	≈14m	
			20m	20m		20m				
		45°	19m	8m	18m	8m	17m	11m		≈11m
				20m		20m		20m		
		55°	16m	9m	17m	8m	17m	11m		
				20m		20m		20m		
		65°	15m	8m	16m	7m	17m	10m		
				20m		20m		20m		
	m/lineares de reforço	35°	64 000	61 000	57 000	57 000	47 000	45 000	52 000	
		45°	64 000	45 000	60 000	47 000	57 000	47 000		
		55°	54 000	47 000	57 000	47 000	57 000	47 000		
		65°	50 000	45 000	54 000	45 000	57 000	45 000		
Custos	Custos de reforço (€)	35°	224 000	213 500	199 500	199 500	164 500	157 500	182 000	
		45°	224 000	157 500	210 000	164 500	199 500	164 500		
		55°	189 000	164 500	199 500	164 500	199 500	164 500		
		65°	175 000	157 500	189 000	157 500	199 500	157 500		
	V solos reforçados €							9 619 m3	72 143€	
Proteção passiva							54 250€			
		Custo total					308 393€			

(página propositadamente em branco)

Anexo XIX – Rácio custo/benefício

Solução de raiz

Inclinação	Bancadas	V acréscimo (m3)	(+ Tempo de vida	Reforço heterogéneo		Reforço homogéneo	
				Custo total	€/m3	Custo total	€/m3
24º	0	183 000	---	---	---	---	---
35º	0	31 640	3 meses	213 500 €	7	224 000 €	7
	1	26 740	2 meses	199 500 €	7	199 500 €	7
	2	21 700	2 meses	157 500 €	7	164 500 €	8
45º	0	48 160	4 meses	157 500 €	3	224 000 €	5
	1	43 260	4 meses	164 500 €	4	210 000 €	5
	2	38 360	3 meses	164 500 €	4	199 500 €	5
55º	0	59 780	5 meses	164 500 €	3	189 000 €	3
	1	55 020	5 meses	164 500 €	3	199 500 €	4
	2	49 840	4 meses	164 500 €	3	199 500 €	4
65º	0	68 740	6 meses	157 500 €	2	175 000 €	3
	1	64 120	5 meses	157 500 €	2	189 000 €	3
	2	58 940	5 meses	157 500 €	3	199 500 €	3
				media	4	media	5

Caso atual			Projeto de ampliação		
V acréscimo (m3)	Custos Totais	€/m3	V acréscimo (m3)	Custos totais	€/m3
37 652	308 393 €	8	820 000	3 000 000 €	4

V 35º = 215 000