

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

NATALIA MOSCHEN BOTTECCHIA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO
CONSTRUÍDO COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS**

**VITÓRIA - ES
2021**

NATALIA MOSCHEN BOTTECCHIA

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO CONSTRUÍDO
COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Patrício José Moreira Pires.

VITÓRIA - ES

2021

NATALIA MOSCHEN BOTTECCHIA

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO CONSTRUÍDO
COM COPRODUTO SIDERÚRGICO.

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Patrício José Moreira Pires.

Coorientador: Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

Orientador

Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro

Coorientador

Prof. Me. Neemias Almeida Dias

Avaliador externo

Especialista Nocy Oliveira da Silveira

Avaliador externo

AGRADECIMENTOS

Com a entrega deste projeto de graduação mais um ciclo se encerra e esta conquista é resultado de um esforço conjunto. Sou muito grata as diversas pessoas que fizeram parte desse caminho e me ajudaram nessa jornada em busca do meu crescimento profissional e pessoal. Deixo na universidade a minha monografia e em troca recebo todo conhecimento e amizade cultivada ao longo desses anos.

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me concedido a oportunidade de fazer parte da Engenharia Civil na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), também por todas as outras oportunidades que me foram concedidas ao longo do caminho e por não ter me deixado desanimar.

Aos meus amados pais Adriana e Antônio César (*in memoriam*) que nunca mediram esforços para me ajudar a conquistar os meus sonhos, me apoiaram e incentivaram. Obrigada pelo amor incondicional. A minha irmã pelo apoio e paciência de sempre.

Ao meu namorado e aos meus sogros por todo suporte e amor ao longo desses anos, por entenderem minha ausência em diversos fins de semana.

Ao meu orientador Prof. Dr. Patrício Pires pela oportunidade concebida e por me confiar esta pesquisa e dar todo suporte necessário para a realização. Agradeço também ao Prof. Dr. Rômulo Castello, com o qual tive meu primeiro contato com a geotecnia na universidade, sua paixão, sabedoria e didática fizeram com que eu me encontrasse nessa área. Toda minha admiração e agradecimento por todo conhecimento compartilhado.

Meu muito obrigada aos servidores, professores e técnicos da UFES que sempre estiveram presentes prestando todo tipo de assistência.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo desse percurso. A amizade de vocês foi fundamental para que tornassem o curso mais leve e alegre, obrigada por toda troca de conhecimentos e companheirismo.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares por serem tão carinhosos e especiais comigo.

RESUMO

BOTTECCHIA, N. M. Análise de Estabilidade de Talude de Aterro Construído com Coproduto Siderúrgico. 2021. 105f. Projeto de Graduação. Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

A indústria siderúrgica no Brasil ocupa o décimo lugar dentre os maiores produtores mundiais de aço, o que propulsiona a geração de empregos e renda para a população, porém, gera grandes volumes de resíduos sólidos que necessitam ser gerenciados de maneira correta e sustentável, buscando o menor impacto ambiental possível. Esta pesquisa é pioneira na busca por uma nova destinação para esses resíduos no âmbito da construção civil, tendo por objetivo analisar a viabilidade do emprego de coprodutos siderúrgicos no corpo de aterros rodoviários e/ou industriais quanto à estabilidade de seus taludes. O uso de coprodutos tem se mostrado eficiente para diversas finalidades dentro da construção civil, de acordo com a literatura técnico-científica, e também tem proporcionado vantagens econômicas e ambientais, contribuindo assim com a economia circular nessas empresas. Para o desenvolvimento deste trabalho foram analisados resultados de ensaios de cisalhamento direto dos materiais, por meio dos quais se obteve os parâmetros de resistência, peso específico e umidade. A partir desses dados e com a definição de geometrias características para os taludes, foi possível realizar o cálculo da análise de estabilidade pelo software Slope/W®. Foram impostas três condições de contorno para obtenção dos fatores de segurança: amostra na umidade de compactação sem sobrecarga, amostra na umidade de compactação com sobrecarga e amostra na condição submersa com sobrecarga. Pôde-se observar, de forma geral, que ao alterar a geometria da seção transversal foram obtidos valores de fator de segurança da ordem ou superior a 1,4, atendendo aos requisitos da NBR 11.682:2009 – Estabilidade de Encostas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de estabilidade de talude, aterro, coprodutos siderúrgicos, resíduos sólidos, sustentabilidade.

ABSTRACT

BOTTECCHIA, N. M. Stability Analyses of Landfill Slope Built with Steel Co-products. 2021. 105p. Graduation Project. Civil Engineering – Federal University of Espírito Santo, Vitória.

The steel industry in Brazil is the 10th place in the the world's largest steel producers, which create the generation of jobs and income for the population, however, it generates large volumes of solid waste that need to be managed correctly and sustainably. This research was a pioneer in the search for a new destination for these wastes in civil construction, looking for analyze the feasibility of using steel co-products in road or industrial landfills regarding their stability. The use of co-products has been shown to be efficient for several purposes within civil construction, according to the technical-scientific literature, and has also provided economic and environmental advantages. For the development of this work, the results of direct shear tests of the materials were analyzed, through which the parameters of strength, specific weight and humidity were obtained. From these data and with the definition of characteristic geometries for the slopes, it was possible to perform the calculation of the stability analysis by the Slope/W® Software. Three boundary conditions were defined to obtain the safety factors: sample in compaction humidity without overload, sample in compaction humidity with overload and sample in submerged condition with overload. It could be observed, in general, that when changing the cross-section geometry, safety factor values of order or higher than 1.4 were obtained, meeting the requirements of NBR 11682:2009.

KEYWORDS: Slope stability analysis, landfill, steel co-products, solid waste, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo Produtivo do Aço.	20
Figura 2 – (a) Saída da escória e ferro gusa após vazamento do alto-forno e (b) Armazenamento da escória no fosso.	21
Figura 3 – Escória sendo resfriada com jatos de água.....	22
Figura 4 – Escória Dry-Pit resfriando em pátio.	23
Figura 5 – Processo de geração da lama de alto forno e pó do balão.	24
Figura 6 – Escória de aciaria solidificada ao ar e resfriada com água.....	25
Figura 7 – Modelo esquemático da aciaria LD, com fluxo de entrada e saída de materiais.....	26
Figura 8 – Participação do Brasil na produção de aço da América Latina.	27
Figura 9 – Produção de aço por regiões no Brasil.....	27
Figura 10 – Tipos de resíduos siderúrgicos gerados no ano de 2019.	28
Figura 11 – Destinação de Resíduos Siderúrgicos em 2019.....	28
Figura 12 – Nomenclatura utilizada para taludes.	29
Figura 13 – Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular.	31
Figura 14 – Método das Fatias.	34
Figura 15 – Forças atuantes na fatia.	35
Figura 16 – Esforços atuantes na fatia pelo método de Bishop.....	37
Figura 17 – Slope/W no conjunto de programas da Geostudio 2012.	38
Figura 18 – (a) Escória Granulada de Alto Forno, (b) Escória Dry Pit, (c) Lama de Alto Forno e (d) Pó do Balão.	41
Figura 19 – Granulometria da amostra tipo 1.	43
Figura 20 – Granulometria da amostra tipo 2.	43
Figura 21 - Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 1.....	45
Figura 22 – Página inicial do GEOSLOPE.....	46
Figura 23 – Página Inicial do Slope/W, onde é realizada a definição do método de análise.....	46
Figura 24 – Dimensões do Talude.....	47
Figura 25 – Definição da superfície de deslizamento, desenho da malha e das linhas da superfície de ruptura.	49

Figura 26 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 1, com fator de segurança de 1,06 e ângulo de talude de 45° .	51
Figura 27 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3, com fator de segurança de 1,48 e ângulo de talude de 26,57° .	51
Figura 28 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 1, com fator de segurança de 1,23 e ângulo de talude de 45° .	53
Figura 29 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 33,69° .	53
Figura 30 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3, com fator de segurança de 1,26 e ângulo de talude de 14,93° .	55
Figura 31 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 1, com fator de segurança de 1,53 e ângulo de talude de 26,57° .	55
Figura 32 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3, com fator de segurança de 1,39 e ângulo de talude de 14,93° .	56
Figura 33 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 1, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 26,57° .	57
Figura 34 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3, com fator de segurança de 1,31 e ângulo de talude de 17,10° .	58
Figura 35 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 1, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 26,57° .	59
Figura 36 – Resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 45° .	60
Figura 37 – Resultado da massa bruta para amostra de Dry Pit.	67
Figura 38 – Resultado ensaio de lixiviado para amostra de Dry Pit.	67
Figura 39 – Resultado ensaio de lixiviado para amostra de Dry Pit.	68
Figura 40 - Resultado ensaio de solubilizado para amostra de Dry Pit.	68
Figura 41 – Resultado da massa bruta para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.	69
Figura 42 – Resultado de lixiviado para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.	69
Figura 43 – Resultado de solubilizado para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.	70
Figura 44 – Resultado da massa bruta para amostra de Lama de Alto Forno.	70
Figura 45 – Resultado de lixiviado para amostra de Lama de Alto Forno.	71

Figura 46 – Resultado de solubilizado para amostra de Lama de Alto Forno.	72
Figura 47 – Resultado do lixiviado e solubilizado para amostra de Pó do Balão.....	73
Figura 48 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 2.	74
Figura 49 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 3.	75
Figura 50 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 4.	75
Figura 51 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 5.	76
Figura 52 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 6.	76
Figura 53 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 1, com fator de segurança de 1,54 e ângulo de talude de 29,74°.	77
Figura 54 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 2, com fator de segurança de 1,37 e ângulo de talude de 29,74°.	77
Figura 55 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 2, com fator de segurança de 1,48 e ângulo de talude de 26,57°.	78
Figura 56 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20m, com fator de segurança de 1,30 e ângulo de talude de 26,57°.	78
Figura 57 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20m, com fator de segurança de 1,39 e ângulo de talude de 23,96°.	79
Figura 58 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,47 e ângulo de talude de 21,80°.	79
Figura 59 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 10m, com fator de segurança de 1,02 e ângulo de talude de 45°.	80
Figura 60 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 com altura de 5 m, com fator de segurança de 1,09 e ângulo de talude de 45°.	80
Figura 61 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,50 e ângulo de talude de 26,57°.	81
Figura 62 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 1, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 38,66°.	82
Figura 63 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 2, com fator de segurança de 1,27 e ângulo de talude de 38,66°.	82
Figura 64 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 2, com fator de segurança de 1,45 e ângulo de talude de 33,69°.	83
Figura 65 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,36 e ângulo de talude de 33,69°.	83

Figura 66 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,46 e ângulo de talude de 29,74°.	84
Figura 67 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,19 e ângulo de talude de 45°.	84
Figura 68 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,32 e ângulo de talude de 45°.	85
Figura 69 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,81 e ângulo de talude de 26,57°.	85
Figura 70 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 1, com fator de segurança de 0,97 e ângulo de talude de 45°.	86
Figura 71 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 2, com fator de segurança de 1,28 e ângulo de talude de 26,57°.	86
Figura 72 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 2, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 21,80°.	87
Figura 73 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,10 e ângulo de talude de 21,80°.	87
Figura 74 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,41 e ângulo de talude de 10,78°.	88
Figura 75 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 0,82 e ângulo de talude de 45°.	88
Figura 76 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,45 e ângulo de talude de 15,95°.	89
Figura 77 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,83 e ângulo de talude de 45°.	89
Figura 78 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,51 e ângulo de talude de 14,04°.	90
Figura 79 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 1, com fator de segurança de 0,98 e ângulo de talude de 45°.	91
Figura 80 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,26 e ângulo de talude de 26,57°.	91
Figura 81 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,37 e ângulo de talude de 23,96°.	92
Figura 82 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 21,80°.	92

Figura 83 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,15 e ângulo de talude de 21,80°.	93
Figura 84 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,44 e ângulo de talude de 14,04°.	93
Figura 85 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 0,89 e ângulo de talude de 45°.	94
Figura 86 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,47 e ângulo de talude de 18,43°.	94
Figura 87 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,97 e ângulo de talude de 45°.	95
Figura 88 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,53 e ângulo de talude de 18,43°.	95
Figura 89 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 1, com fator de segurança de 1,84 e ângulo de talude de 45°.	96
Figura 90 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,25 e ângulo de talude de 26,57°.	96
Figura 91 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,38 e ângulo de talude de 21,80°.	97
Figura 92 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 19,98°.	97
Figura 93 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,21 e ângulo de talude de 19,98°.	98
Figura 94 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 14,93°.	98
Figura 95 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura 10 m, com fator de segurança de 0,78 e ângulo de talude de 45°.	99
Figura 96 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 18,43°.	99
Figura 97 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,79 e ângulo de talude de 45°.	100
Figura 98 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,52 e ângulo de talude de 14,04°.	100
Figura 99 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 1, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 45°.	101

Figura 100 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 1, com fator de segurança de 1,22 e ângulo de talude de 53,13°	101
Figura 101 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 2, com fator de segurança de 1,24 e ângulo de talude de 45°	102
Figura 102 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 2, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 38,66°	102
Figura 103 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 20 m, com fator de segurança de 1,33 e ângulo de talude de 38,66°	103
Figura 104 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 20 m, com fator de segurança de 1,44 e ângulo de talude de 33,69°	103
Figura 105 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 10 m, com fator de segurança de 1,71 e ângulo de talude de 33,69°	104
Figura 106 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 5 m, com fator de segurança de 1,59 e ângulo de talude de 45°	104
Figura 107 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 5 m, com fator de segurança de 1,22 e ângulo de talude de 63,43°	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das Escórias de Alto Forno.....	23
Tabela 2 – Composição química da lama de alto forno.	24
Tabela 3 – Métodos e suas hipóteses de forças entre fatias.	36
Tabela 4 – Misturas de Coprodutos Estudadas.	40
Tabela 5 – Granulometrias dos materiais estudados.....	44
Tabela 6 – Parâmetros de Entrada para Análise de Estabilidade.....	45
Tabela 7 – Condições de Saturação e Carregamento do Talude.	48
Tabela 8 – Fatores de Segurança de acordo com níveis de segurança contra a vida humana e danos materiais.	48
Tabela 9 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 01.	50
Tabela 10 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 02.	52
Tabela 11 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 03.	54
Tabela 12 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 04.	56
Tabela 13 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 05.	57
Tabela 14 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 06.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

FS Fator de Segurança

IAB Instituto Aço Brasil

LD Linz Dinawitz

NBR Norma Brasileira

SUCS Sistema Unificado de Classificação de Solos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	17
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS	19
2.1.1 Processo de Produção do Aço	19
2.1.2 Escórias de Alto Forno	21
2.1.3 Lama de Alto Forno e Pó de Alto Forno	23
2.1.4 Escória de Aciaria	25
2.1.5 Quantidades de Resíduos Gerados	26
2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES	29
2.2.1 Superfície de Ruptura	31
2.2.2 Método do Equilíbrio Limite	32
2.2.2.1 Método das Fatias	33
2.2.2.2 Método de Bishop Simplificado	36
2.2.3 Programa de Análise de Estabilidade	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 RESÍDUOS SIDERÚRGICOS	40
3.1.1 Caracterização	41
3.1.2 Distribuição Granulométrica e Propriedades de Engenharia	42
3.2 MÉTODOS	45
3.2.1 Definição do Software e Método	45
3.2.2 Definição da Geometria do Corpo de Aterro	47
3.2.3 Fator de Segurança	48
4. RESULTADOS	50
4.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE	50
5. CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO I	67
ANEXO II	74
APÊNDICE A	77
APÊNDICE B	82
APÊNDICE C	86

APÊNDICE D91
APÊNDICE E96
APÊNDICE F.....101

1. INTRODUÇÃO

A busca exponencial pela utilização dos recursos minerais disponíveis, tornaram tangíveis a ocupação territorial e produzem, atualmente, grandes insumos necessários à sociedade. O aço, principal produto da Segunda Revolução Industrial, abriu novas possibilidades para os processos produtivos, permitindo criar e consolidar novos produtos e novos mercados (MORANDI, 1997 apud BRIDI, 2020). Porém, apesar da produção de bens através de recursos minerais ser uma propulsora econômica, é necessária a responsabilidade de forma controlada, racional e sustentável dos resíduos que são originários do processo.

Segundo o Global Steel Report (2018), o Brasil encontra-se entre os dez maiores produtores mundiais de aço. Essa posição impõe o desafio de gerenciar o grande volume de resíduos sólidos que provem dessa cadeia produtiva conforme Oliveira (2018). O Instituto do Aço Brasil - IAB (2019), retratou que durante o ano de 2019 foram gerados cerca de 18 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos siderúrgicos. Grande parte desses resíduos são reaproveitados, entretanto, 6% ainda são estocados em pátios das empresas ou descartados em aterros por ainda não possuírem aplicações.

Nas últimas décadas tem-se buscado formas de reinserir esses resíduos na cadeia produtiva, de forma a praticar uma economia circular (OLIVEIRA, 2018). De acordo com Cunha (2020) as construções de obras geotécnicas, podem ser um nicho de aproveitamento de coprodutos provenientes da produção do aço, adicionando-os nos solos locais e obtendo com isso melhoras mecânicas. Além de ocasionar uma expressiva redução nos impactos ambientais gerados, sobretudo, quando comparados aos impactos gerados pela destinação final dos resíduos e da extração de solos de uma jazida para composição de aterros.

Silva et al. (2002 apud CUNHA, 2020) afirma que desde o início do Século XX são realizados aproveitamentos de escórias por vários países, como a Inglaterra, Alemanha, Polônia, França e Japão, para diversas finalidades. Porém, para que possamos fazer o aproveitamento desses resíduos, é necessário o conhecimento de sua origem e natureza, bem como a devida caracterização de suas propriedades de engenharia. Assim, é fundamental ter conhecimento das diversas fases que compõem

a fabricação do aço e geram os subprodutos, além, de verificar as características técnicas e possíveis impactos ambientais.

Nesse contexto, uma forma de reaproveitar esses agregados siderúrgicos é a partir da sua incorporação na construção de obras geotécnicas de aterros rodoviários e/ou industriais. Para que seja comprovada sua eficácia, são necessários estudos geotécnicos que se referem à estabilidade de aterros de resíduos sólidos. Para isso, podem-se utilizar métodos consagrados pela literatura, tais como o de Bishop Simplificado (1955), o de Jambu Simplificado (1968) e o de Morgenstern e Price (1965), sendo baseados na Teoria de Equilíbrio Limite.

Não foi encontrada na literatura a abordagem da análise de estabilidade para resíduos industriais siderúrgicos com a finalidade de utilização em aterros. No entanto, em âmbito nacional, as pesquisas de Nascimento e Broetto (2017) e de Moraes (2018) avaliaram a estabilidade de taludes de aterro com resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais a partir de métodos determinísticos de equilíbrio limite e elementos finitos visando à destinação desses materiais em aterros de resíduos industriais. Os resultados obtidos nessas pesquisas, de modo geral, foram positivos, atendendo aos fatores de segurança. Concluíram que os aspectos fundamentais na análise de estabilidade estão relacionados à geometria do talude e à caracterização dos materiais empregados no corpo do aterro.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar a estabilidade de um talude de aterro constituído por coprodutos siderúrgicos, de modo a determinar o seu fator de segurança (FS) e analisar a viabilidade da utilização desses coprodutos em corpos de aterros rodoviários e/ou industriais.

Como objetivos específicos pretende-se ainda:

- Determinar os valores de FS para taludes de aterro quanto ao deslizamento utilizando o método determinístico de Bishop Simplificado (1955) a partir do software Slope/W;
- Verificar a inclinação dos taludes, a fim de analisar a melhor geometria para um FS que atenda à literatura geotécnica, maior ou igual a 1,4.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos com a seguinte sequência:

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução ao tema com uma contextualização sobre o assunto, os objetivos gerais e específicos e a organização do estudo.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica com os principais tópicos relacionados à pesquisa. São abordados os resíduos sólidos utilizados, sua geração e utilização segundo bibliografias existentes, como também a estabilidade de taludes, os métodos determinísticos de análise de estabilidade e o programa computacional utilizado.

No Capítulo 03, são abordados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. Apresentam-se os resultados de ensaios de caracterização, a geometria definida para os taludes, o fator de segurança buscado e o software utilizado.

No Capítulo 04, são expostos os resultados encontrados a partir das análises de estabilidade dos taludes via software Slope/W®.

O último Capítulo, apresenta as principais conclusões desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica para este trabalho é composta por duas partes: a primeira abrange a produção dos coprodutos siderúrgicos e suas utilizações. Já a segunda parte traz os aspectos relacionados com a estabilidade de talude, critérios de ruptura, métodos de análise e fator de segurança.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como resíduos no estado sólido ou semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ela caracteriza e classifica esses resíduos quanto aos seus possíveis riscos ao meio ambiente e a saúde pública em:

- Resíduos classe I – Perigosos: são resíduos que podem ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos.
- Resíduos classe IIA – Não perigosos e Não inertes: não possuem as características dos resíduos perigosos mas podem ter as propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe IIB – Não perigosos e Inertes: não possuem nenhuma das características citadas acima.

Neste trabalho é abordado com detalhes a produção e as características dos principais resíduos sólidos siderúrgicos, sendo eles: escória de alto forno, escória de aciaria, lama e pó de alto forno. Esses resíduos são gerados na produção do aço e ferro fundido e são comumente chamados de coprodutos, pois já possuem diversos usos e aplicações, principalmente na área de pavimentação.

2.1.1 Processo de Produção do Aço

O processo produtivo do aço pode ser dividido em quatro etapas principais: preparação, redução, refino e conformação mecânica, conforme Figura 1.

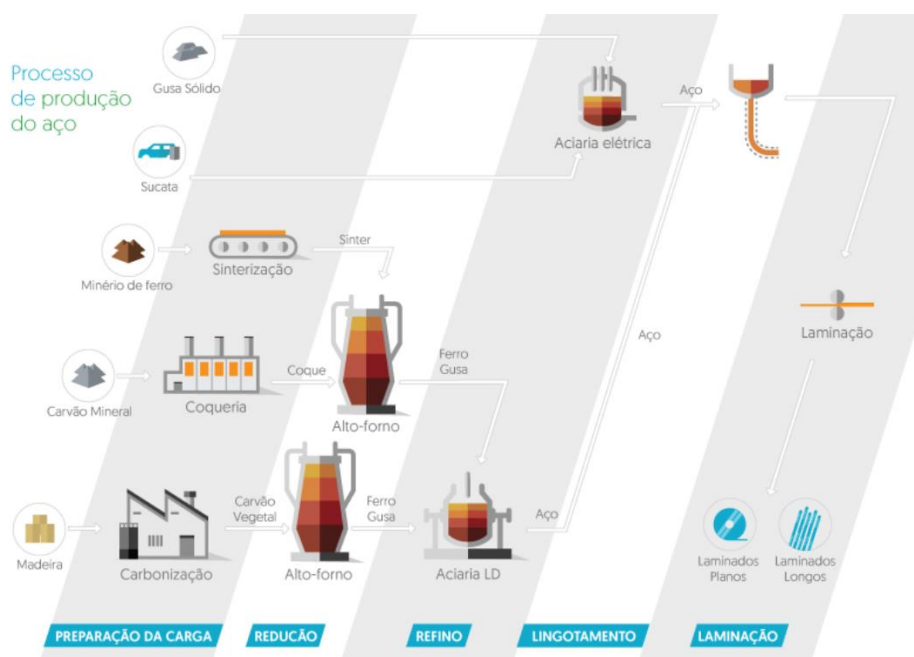


Figura 1 – Processo Produtivo do Aço.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2018).

Na primeira etapa ocorre a preparação das matérias-primas para a renderização do processo. O minério de ferro sofre a sinterização, em que seus finos são aglomerados com fundentes e adições, resultando no sinter. O carvão mineral passa por um aquecimento entre 1100°C e 1300°C para retirada de compostos voláteis, em que se produz o coque, matéria-prima na próxima etapa desse processo.

O coque e sinter passam para o alto-forno, onde o coque exerce dupla função: redutor dos óxidos de ferro e combustível sólido do processo. Ocorre a redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa, uma liga de ferro e carbono com alto teor de carbono. Nessa fase, são geradas também as escórias de alto-forno (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

Devido as altas temperaturas desse processo, Souza (2007 apud CUNHA, 2020) esclarece que essas escórias não possuem nenhum tipo de substância orgânica. Estimam-se que sejam gerados cerca 200 a 300 kg de escória de alto-forno por tonelada de ferro-gusa (ARCELORMITTAL, 2019).

A etapa seguinte do processo é o refino, quando o ferro gusa sofre um ajuste no teor de carbono e remoção de impurezas, obtendo-se assim o aço propriamente dito. Esse aço produzido vaza em lingoteiras ou em máquinas de lingoteamento contínuo, onde é moldado em produtos semiacabados e posteriormente passam por uma

conformação mecânica, sendo laminados em formas de barras, chapas, bobinas, vergalhões, tubos, fios, entre outros.

2.1.2 Escórias de Alto Forno

A escória de alto-forno é um coproduto da indústria siderúrgica, obtida em estado líquido na fabricação do ferro gusa nos altos-fornos (ALMEIDA, 2014). Ela é composta, em sua maior parte, de alumina silicatos de cálcio na forma vítrea e secundariamente de sulfetos de cálcio e manganês, além de óxidos de ferro e manganês (MASSUCATO, 2005).

Sua formação se dá pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes como o calcário e dolomita, e as cinzas do coque. Por possuir uma menor densidade que o ferro gusa, sobrenada, sendo conduzida por canais, até o seu local de resfriamento (ARCELORMITTAL, 2019). O fenômeno mencionado pode ser observado nas Figuras 2 (a) e (b):

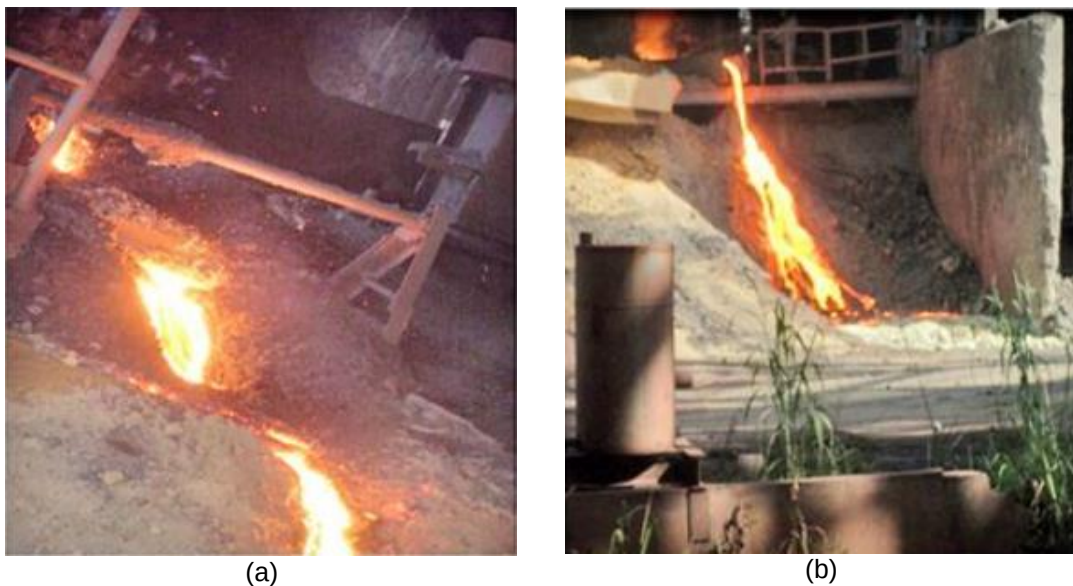


Figura 2 – (a) Saída da escória e ferro gusa após vazamento do alto-forno e (b) Armazenamento da escória no fosso.

Fonte: Almeida (2014).

Ao sair do forno, a escória pode ser resfriada lentamente, ao ar, ou rapidamente, por jatos de água. Mediante a esse processo de resfriamento tem-se a geração de escórias com diferentes propriedades e aplicações (ALMEIDA, 2014).

No caso da escória de alto-forno submetida ao resfriamento brusco por jato de água, não há tempo suficiente para cristalização do material. Forma-se, assim, uma estrutura vítrea composta por grãos, por isso, é chamado de escória granulada de alto-forno (JOHN, 1995). Esse processo é conhecido por granulação, já que o material é reduzido a grãos similares aos da areia natural, apresentando forma angular, textura superficial áspera e distribuição granulométrica com aproximadamente 0,2 mm de diâmetro e densidade aparente próxima a 1,0 g/cm³ (ALMEIDA, 2014). A Figura 3, mostra esse processo rápido de resfriamento com jatos de água.



Figura 3 – Escória sendo resfriada com jatos de água.
Fonte: Coelho apud Almeida (2014).

Devido ao seu grande potencial hidráulico, a granulada de alto forno tem um mercado amplo, principalmente para indústrias cimenteiras e concreteiras, nas quais pode ser moída e utilizada na fabricação do cimento e concreto, podendo substituir em até 70% o material tradicionalmente usado, o clínquer (ARCELORMITTAL, 2019). Diversos estudos trazem as vantagens do cimento com escória em relação ao convencional como aumento da resistência, baixo calor de hidratação e maior durabilidade (NIPPON SLAG ASSOCIATION, 2016 apud OLIVEIRA, 2018).

No caso do processo de resfriamento lento, as escórias são resfriadas ao ar em pátios da própria indústria, o que permite a cristalização de seus componentes e o material não adquire capacidade aglomerante, sendo conhecido como escória bruta de alto forno ou dry pit (CUNHA, 2020). Esse processo de resfriamento ao ar pode ser observado na Figura 4. Devido sua natureza inerte pode ser britado e utilizado em

diversas aplicações, substituindo materiais pétreos em bases de estradas, agregado para asfalto, agregado para concreto, entre outros (ARCELORMITTAL, 2019).



Figura 4 – Escória Dry-Pit resfriando em pátio.
Fonte: Almeida (2014).

A composição química das escórias de alto forno produzidas pela ArcelorMittal Tubarão varia dentro de limites pré-estabelecidos e depende das matérias primas e tipo de gusa fabricados, como podemos observar na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Composição química das Escórias de Alto Forno.	
Composição química Escória de Alto-Forno ArcelorMittal Tubarão	
(Valores de Referência)	
FeO	0,45%
SiO ₂	33,65%
Al ₂ O ₃	12,42%
CaO	41,60%
MgO	7,95%
TiO	0,73%

Fonte: ArcelorMittal (2019).

2.1.3 Lama de Alto Forno e Pó de Alto Forno

Ainda durante o processo de produção do ferro gusa são gerados o pó do balão e a lama de alto forno.

A geração desses dois resíduos siderúrgicos ocorre pelo arraste de material particulado que sai do interior do reator juntamente com o gás do alto-forno, para tubulações que os levam para o sistema de limpeza de gás onde ocorre a etapa de lavagem e separação das partículas (ALMEIDA, 2014). Esse processo está exemplificado na Figura 5 a seguir.

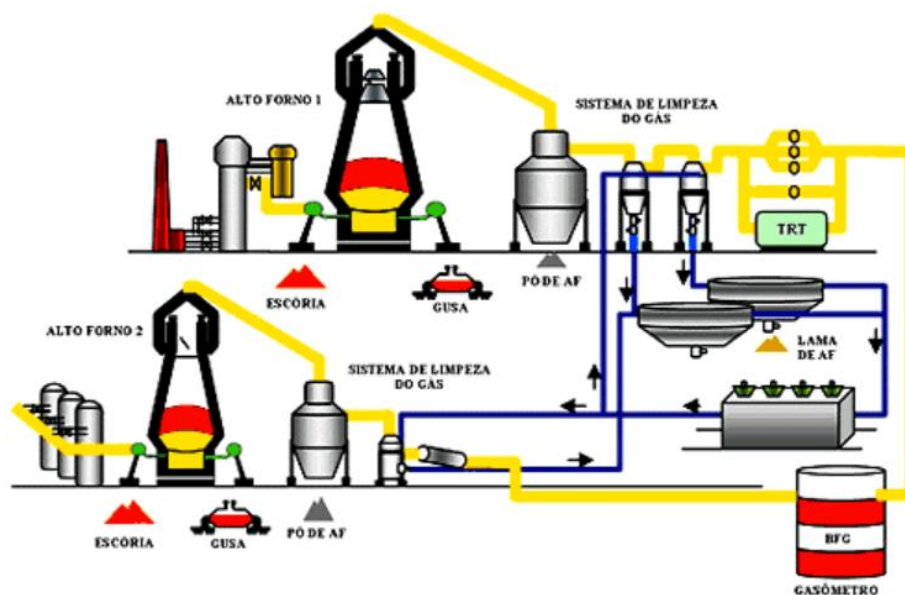


Figura 5 – Processo de geração da lama de alto forno e pó do balão.
Fonte: ArcelorMittal (2019).

A lama de alto forno por ser um coproduto que possui um elevado teor de carbono costuma ser utilizada nas indústrias cerâmicas, em até 10% da mistura, pois proporciona um tempo de cozimento menor nos lotes de tijolos e telhas, fornecem um ganho de resistência e um aumento da produtividade (ARCELORMITTAL, 2019).

Sua composição química de referência segundo ArcelorMittal Tubarão segue as características expostas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Composição química da lama de alto forno.
Composição química Lama de Alto-Forno ArcelorMittal Tubarão
(Referência)

SiO ₂	4,92%
Al ₂ O ₃	1,82%
CaO	3,76%
MgO	0,64%
MnO	0,32%
Fe ₂ O ₃	41,76%
C	37,20%
Zn	0,84%
FeM	1,74%
S	0,61%

Fonte: ArcelorMittal (2019).

2.1.4 Escória de Aciaria

A escória de aciaria é gerada durante o refino primário do aço. Esse processo consiste na transformação de matéria-prima em um produto base para a etapa subsequente, o refino secundário (FREITAS, 2018).

O ferro gusa líquido proveniente dos altos fornos, é enviado aos conversores Linz Donawitz (LD) que realizam o refino do ferro gusa para a obtenção do aço. O processo utiliza oxigênio gasoso, reduzindo os teores de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, através da oxidação desses elementos. Esse oxigênio de alta pureza, insuflado através de lança refratária, queima o carbono e o silício presentes no ferro gusa líquido, ocasionando uma elevação da temperatura. Então, são adicionados fundentes e fluxantes para a formação da escória, responsável pela remoção das impurezas presentes (SOUZA, 2007).

A escória é retirada em um recipiente e transportado a um local adequado onde é basculada e, posteriormente, resfriada por aspersão de água ou ar (SOUZA, 2007). A Figura 6 mostra a aparência dessa escória.



Figura 6 – Escória de aciaria solidificada ao ar e resfriada com água.
Fonte: Geyer (2001).

Após o seu resfriamento, a escória de aciaria é beneficiada. Ela passa por uma britagem, peneiramento e separação magnética, para a obtenção de um agregado de escória de qualidade, seja ele fino ou grosso (FREITAS, 2018).

O processo de geração dessa escória é apresentado na Figura 7.

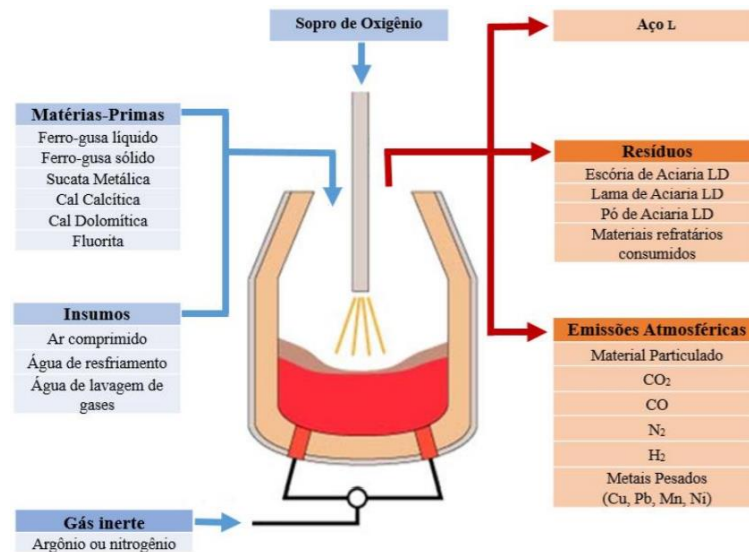


Figura 7 – Modelo esquemático da aciaria LD, com fluxo de entrada e saída de materiais.
Fonte: Freitas (2018).

Vancini (2005 apud SOUZA, 2007) informa que o índice médio de geração de escória de aciaria nas usinas que utilizam o processo LD é da ordem de 113 kg de material por tonelada de aço líquido produzido.

Depois de beneficiada, essa escória é geralmente armazenada em pilhas, assentadas em pátios de estocagem abertos. A exposição ao tempo é uma forma de controlar sua instabilidade volumétrica. A cura desse tipo de escória, consiste em molhá-la por um determinado período de tempo, permitindo a hidratação dos seus óxidos livres com o objetivo de acelerar a expansão volumétrica (MACHADO, 2000 apud FREITAS, 2018).

Uma das aplicações desse material é a utilização como base e sub-base rodoviária, cimento, gabiões, drenos rodoviários, lastro ferroviário, entre outros. A ArcelorMittal Tubarão produz os coprodutos Revsol® e Revsol Plus II® que são obtidos por meio do beneficiamento dessa escória de aciaria LD em planta de britagem, peneiramento e retirada da fração metálica (CUNHA, 2020).

2.1.5 Quantidades de Resíduos Gerados

Segundo o Relatório de Estatísticas de Produção de aço de 2021 do IAB o país ocupa o primeiro lugar em produção de aço bruto da América Latina, como pode ser visto na Figura 8, sendo responsável por cerca de 56% do aço produzido nessa região. Enquanto a nível mundial, no ano de 2021, o país representou cerca de 2,0% do total da produção de aço bruto, ocupando o nono lugar.

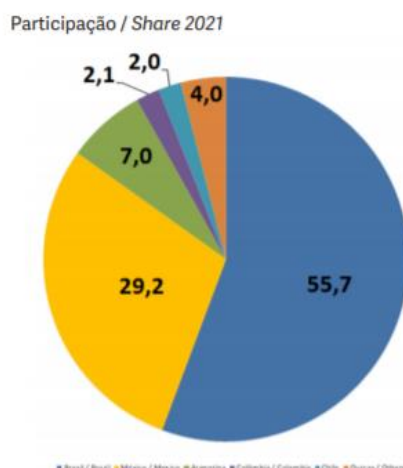


Figura 8 – Participação do Brasil na produção de aço da América Latina.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2018).

Quando estudada a produção de aço bruto por regiões no país a maior concentração se encontra na região Sudeste, onde o estado do Espírito Santo, em 2021, foi responsável por 20,8% da produção nacional, conforme Figura 9.

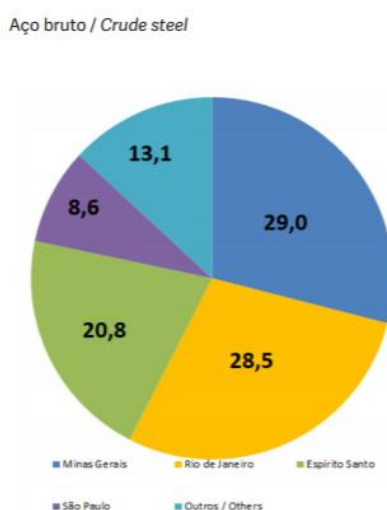


Figura 9 – Produção de aço por regiões no Brasil.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2018).

Durante o ano de 2019, foram produzidos 29 milhões de toneladas de aço bruto e gerados cerca de 18 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos siderúrgicos. De todo o resíduo gerado na produção do aço cerca de 39% desse volume foi de coprodutos obtidos na etapa de redução no alto-forno, enquanto 26% foi de escória de aciaria gerada na etapa do refino. O restante da produção é referente aos finos, pós, lamas, entre outros, como observado na Figura 10 abaixo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019).

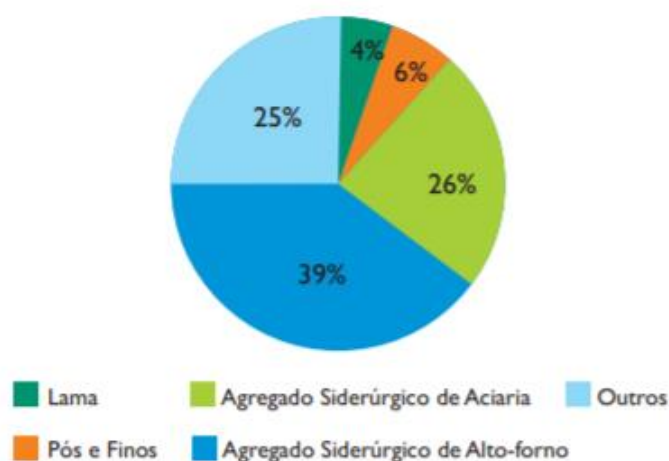


Figura 10 – Tipos de resíduos siderúrgicos gerados no ano de 2019.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2019).

A maior parte desses resíduos são reaproveitados, entretanto, no ano de 2019 cerca de 6% ainda era estocado nos pátios das empresas ou descartados em aterros sanitários por não possuírem aplicações (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019). Como visto na Figura 11.



Figura 11 – Destinação de Resíduos Siderúrgicos em 2019.
Fonte: Instituto Aço Brasil (2019).

Atualmente, existem diversas ações voltadas à promoção da sustentabilidade da indústria do aço, a exemplo os monitoramentos realizados pelo IAB. Um novo conceito tem se integrado com força à agenda que é a economia circular, em que se objetiva manter os materiais em utilização pelo maior tempo possível e, assim, trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais à sociedade. Uma forma de promover isso, é buscando aplicações para os coprodutos que ainda são estocados e/ou vão para aterros sanitários.

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Gerscovich (2012) denomina talude por qualquer superfície inclinada sendo constituída de um maciço de rocha ou solo. Podendo ser natural, denominado de encosta ou construído pelo homem, denominados de taludes de cortes e taludes de aterros.

Segundo Oliveira (2006), teoricamente um talude é considerado uma massa de solo ou rocha submetida a três campos de forças: as forças devido ao peso, ao escoamento da água e à resistência ao cisalhamento. A Figura 12 representa a nomenclatura usualmente adotada.

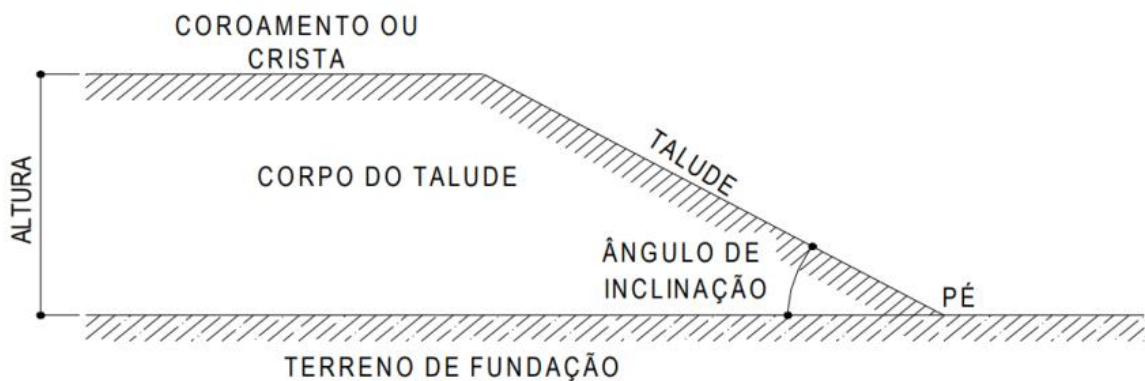


Figura 12 – Nomenclatura utilizada para taludes.
Fonte: Scoz (2002) apud Oliveira (2006).

Guidicini e Nieble (1983 apud OLIVEIRA, 2006) apresentam uma classificação dos agentes e causas de movimentos de massas. A causa está relacionada ao modo de atuação de determinado agente e pode ser classificada em internas, externas e intermediárias. As causas internas levam o talude ao colapso sem que haja qualquer mudança nas condições geométricas e que resultam em uma diminuição da resistência interna do material e um aumento da pressão hidrostática, diminuindo a coesão e o ângulo de atrito interno por processo de alteração. As causas externas, provocam um aumento das tensões de cisalhamento, sem que haja a diminuição da resistência do material. Já as causas intermediárias, resultam nos efeitos causados por agentes externos no interior do talude através da elevação do nível piezométrico e da coluna de água em descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático e erosão subterrânea retrogressiva.

A resistência de um solo está intimamente ligada à sua resistência ao cisalhamento, visto que são raras as rupturas por tensões de tração (PINTO, 2006). É essa capacidade dos grãos de resistir a esforços de cisalhamento que permite que carregamentos e descarregamentos sejam executados sem causar instabilidade. Ela é função do atrito entre partículas, da coesão causada por ligações físico-químicas entre as partículas e do imbricamento, uma resistência adicional proveniente das diferenças nos arranjos das partículas. (GERSCOVICH, 2009).

A análise de estabilidade tem por objetivo avaliar a chance de ocorrência de escorregamento de massa de solo de um talude. Em geral, essas análises são realizadas pela comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. A partir disso, define-se um fator de segurança. Esse tipo de abordagem é denominada determinística, pois estabelece um determinado valor para o FS. O FS admissível de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil. (GERSCOVICH, 2012).

O amplo desenvolvimento da análise e controle de instabilidade de taludes está atrelado à consolidação da Engenharia e da Geologia com grandes obras civis (PIMENTA, 2005). A norma brasileira NBR 11682/2009 prescreve e estabelece os requisitos exigíveis para o estudo e controle da estabilidade de encostas e de taludes resultantes de cortes e aterros. Além disso, permite enquadrar o projeto em níveis de segurança a partir dos riscos de perdas humanas e materiais para definição do fator de segurança mínimo admissível (ABNT, 2009).

Várias condicionantes interferem na estabilidade de um talude, que podem ser tanto relativos à natureza dos materiais constituintes quanto a dos agentes perturbadores (OLIVEIRA, 2006).

Segundo Pimenta Júnior (2005), os métodos de análise da estabilidade de talude podem ser divididos em três grupos principais:

- Métodos analíticos: baseiam-se na teoria do equilíbrio limite, análise limite e nos modelos matemáticos de tensão e deformação;
- Métodos experimentais: empregam modelos físicos de diferentes escalas.
- Métodos observacionais: baseados na experiência acumulada com a análise de rupturas anteriores.

Neste trabalho foi dado enfoque ao método determinístico a partir da análise de equilíbrio limite.

2.2.1 Superfície de Ruptura

Segundo Gerscovich, uma massa de solo pode se romper segundo diferentes formas: circular, planar, multiplanar, mista, entre outras. A forma da ruptura geralmente está condicionada à heterogeneidade ao longo do perfil do talude (2012). A Figura 13 traz um exemplo dos principais tipos de ruptura de um talude que são os seguintes:

- Superfície planar: ocorre em uma superfície pré-existente com a presença de alguma descontinuidade, como uma falha. Dependem da distribuição e das características de descontinuidade do talude.
- Superfície em cunha: corresponde ao deslizamento de um bloco em forma de cunha em um maciço com vários planos de descontinuidades.
- Superfície circular: é observada em solos relativamente homogêneos, com comportamento isotrópico em que os planos de descontinuidades não controlam o comportamento mecânico. É amplamente utilizado nos cálculos por conveniência.

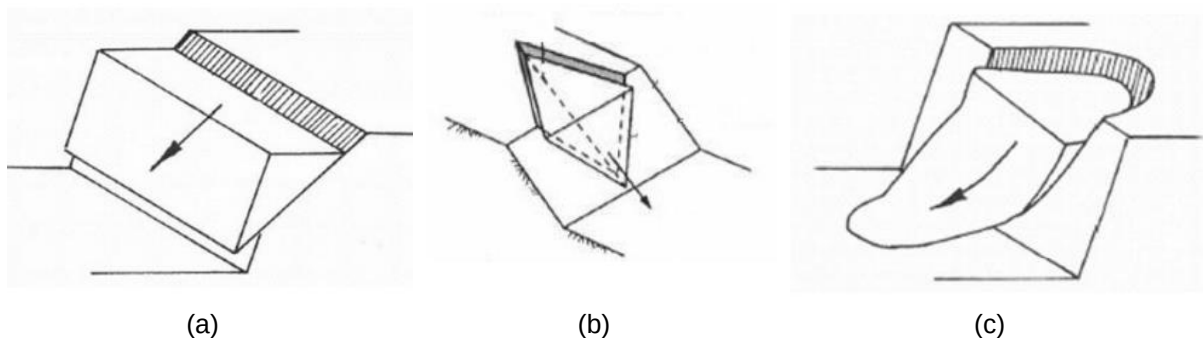


Figura 13 – Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular.

Fonte: Maxwell (2021).

Estudos indicam que a ruptura de maciços compostos por solos argilosos com propriedades mecânicas homogêneas tende a se desenvolver sob uma superfície circular, enquanto nos solos arenosos tem-se uma superfície planar (NASCIMENTO; BROETTO, 2017).

A ruptura de um talude é definida por uma curva tensão versus deformação e varia de acordo com o critério adotado. Neste trabalho, foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb

que envolve os parâmetros: ângulo de atrito (ϕ') dado pela inclinação da reta e coesão (c') dado pelo intercepto. A determinação da envoltória de ruptura para esse método é realizada a partir do traçado de uma reta que melhor envolve as tensões de ruptura determinadas experimentalmente.

2.2.2 Método do Equilíbrio Limite

Segundo Gerscovich (2012), o método do equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo delimitada por uma superfície de ruptura, sendo ela plana, circular, poligonal ou mista. Esse método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos contidos nessa superfície atingem o $FS=1$.

Para isso, são adotadas as seguintes premissas:

- Acima da superfície de ruptura adotada, o solo é considerado um corpo livre e dividido em fatias.
- O equilíbrio de forças é calculado pela análise de cada uma das fatias a partir das equações da estática, o equilíbrio dos momentos é realizado comparando o somatório de momentos estabilizantes e instabilizantes, e a tensão de cisalhamento mobilizada (τ_{mob}) é uma das incógnitas do problema.
- Nessa análise, a tensão cisalhante mobilizada é determinada de modo que a massa esteja em estado de equilíbrio limite, assim:

$$\tau_{mob} = \frac{c' + \sigma' \times tg \phi'}{FS} \quad (1)$$

Onde:

τ_{mob} = tensão de cisalhamento mobilizada;

c' = intercepto efetivo de coesão;

σ' = tensão efetiva normal ao plano de cisalhamento;

ϕ' = ângulo de atrito interno efetivo;

FS = fator de segurança.

Massad (2003), salienta que esse método se apoia em alguns pressupostos, sendo eles:

- O solo se comporta como material rígido-plástico, ou seja, se rompe bruscamente, sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas apenas até ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;
- O fator de segurança (FS) é considerado constante ao longo da ruptura.

Ao se examinar as incógnitas e equações disponíveis é possível observar que se trata de um problema estaticamente indeterminado. Juntamente com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, esses elementos da estática e hipóteses para superar essas indeterminações constituem a base dos métodos determinísticos de equilíbrio limite (RIBEIRO, 2008).

A determinação do menor fator de segurança se dá por meio de tentativas, uma vez que seu cálculo exige o conhecimento da geometria da superfície de cisalhamento. São pesquisadas várias superfícies até que se encontre a superfície crítica (OLIVEIRA, 2006).

Segundo Panitz (2008 apud MORAES, 2018), esse método conta com algumas limitações quando o talude em questão apresenta heterogenia e anisotropia, e quando as propriedades mecânicas sofrem alterações com o tempo, devido à percolação de água e deslocamento progressivos. Porém, ainda hoje, é um dos métodos mais utilizados, uma vez que os engenheiros têm mais experiência e familiaridade (SILVA, 2014).

2.2.2.1 Método das Fatias

O método das fatias é um dos métodos mais utilizados para análise de estabilidade por não apresentar restrições quanto o tipo de análise, geometria do talude e homogeneidade do solo. Ele possibilita que o solo seja heterogêneo, que o talude possua uma superfície irregular, e permite a inclusão de poropressão e análises à longo prazo (GERSCOVICH, 2012).

Uma das razões para ser amplamente utilizado é a possibilidade de obtenção de resultados através de cálculos manuais. Os conceitos associados ao método das fatias não são complicados de se entender e as técnicas são ainda mais simples de implementar em softwares (SILVA, 2014).

Sua metodologia consiste em dividir o talude em fatias, conforme Figura 14, com a base linear, de forma que em uma mesma fatia esteja contido apenas um material e que não apresente descontinuidades.

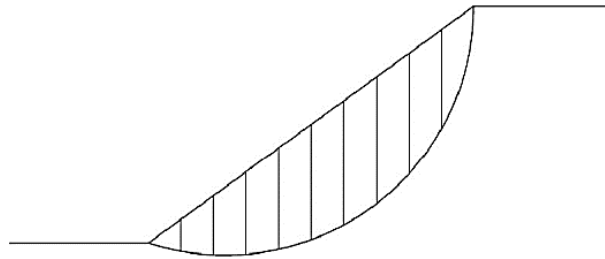


Figura 14 – Método das Fatias.
Fonte: Silva (2014).

Seguinte, aplica-se em cada uma das fatias as equações de equilíbrio:

$$\sum \text{Forças horizontais} = 0 \quad (2)$$

$$\sum \text{Forças verticais} = 0 \quad (3)$$

$$\sum \text{Momentos} = 0 \quad (4)$$

Realiza-se o equilíbrio de forças em cada fatia, assumindo que as tensões normais na base são geradas pelo peso de solo contido nessa fatia e calcula-se o equilíbrio do conjunto por meio do equilíbrio de momentos em relação ao centro da superfície circular de deslizamento, considerando também as forças tangenciais e pesos na base das fatias. O somatório dos momentos das forças interlamelares é considerado nulo (GERSCOVICH, 2012).

A partir disso, o fator de segurança do talude será definido pelo quociente entre o momento resistente total M_R e o momento instabilizante M_S .

$$FS = \frac{M_R}{M_S} \quad (5)$$

As forças atuantes em uma única fatia vertical estão ilustradas na Figura 15.

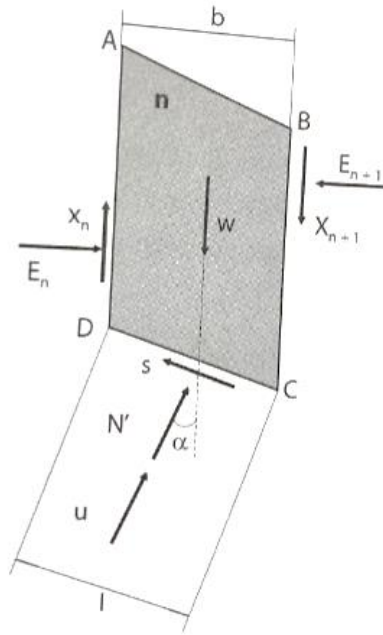


Figura 15 – Forças atuantes na fatia.
Fonte: Gerscovich (2012).

Onde:

W_i = peso da fatia;

E = forças horizontais nas laterais das fatias;

X = resistência vertical entre fatias;

N = força normal na base da fatia;

S = resistência do solo na base da fatia;

U = poro pressão.

Assim,

$$FS = \frac{\sum (c' l + (N' - ul) \tan \phi')}{\sum W_i \sin \alpha} \quad (6)$$

Uma vez que o número de equações é menor que o número de incógnitas, o problema torna-se estaticamente indeterminado. Sendo necessárias simplificações para obter resultados.

Vários métodos foram criados ao longo dos anos e são todos muito similares. As principais diferenças estão essencialmente nas equações de forças e momentos que são consideradas e satisfeitas, quais forças entre fatias são incluídas e qual a relação

entre as forças entre fatias normal e de corte (SILVA, 2014). A Tabela 3 apresenta um resumo sobre os principais métodos e suas hipóteses.

Tabela 3 – Métodos e suas hipóteses de forças entre fatias.

Método	Hipótese
Fellenius (1936)	Resultante paralela à inclinação média da fatia
Bishop Simplificado (1955)	Resultante horizontal
Jambu Simplificado (1968)	Resultante horizontal e um fator de correção para considerar força entre fatias
Morgenstern e Price (1965)	A direção da resultante é definida por uma função

Fonte: Gerscovich (2012).

Os métodos mais utilizados na prática são os de Jambu e Bishop Simplificado. Embora o método de Bishop Simplificado não satisfaça ao equilíbrio de forças horizontais, seus fatores de segurança são considerados aceitáveis para o caso de superfícies circulares de ruptura. Quando comparado aos métodos mais rigorosos as diferenças entre os valores de FS não ultrapassam 5% (GERSCOVICH, 2014).

2.2.2.2 Método de Bishop Simplificado

Esse método foi proposto por Bishop no ano de 1955. Embora não satisfaça todas as condições de equilíbrio ele tem sido bem aceito pela engenharia geotécnica como um método das fatias preciso (SILVA, 2014).

O método de Bishop Simplificado considera que a superfície de ruptura é circular e que a resultante de forças laterais na fatia é horizontal, como pode ser observado na Figura 16. O fator de segurança é obtido a partir do equilíbrio das forças verticais e dado pelas equações:

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \sum_{i=1}^n [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'] / M_i(\theta) \quad (7)$$

$$M_i(\theta) = \cos \theta_i \left[1 + \frac{\tan \theta_i \tan \phi'}{FS_i} \right] \quad (8)$$

Onde:

c' = coesão efetiva do solo;

u_i = poropressão média na base da fatia;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo do solo;

b_i = largura da fatia;

θ_i = inclinação da fatia;

W_i = peso da fatia.

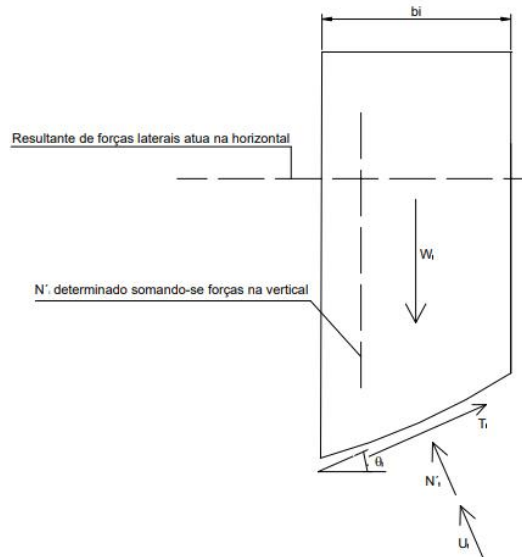


Figura 16 – Esforços atuantes na fatia pelo método de Bishop.
Fonte: Ribeiro (2008).

Apesar da simplificação, o fator de segurança encontra-se em ambos os lados da equação. Para a resolução do problema faz-se necessário um processo iterativo. Adota-se um FS inicial e repete-se o processo até que o valor calculado se iguale ao arbitrado (FS_i) (RIBEIRO, 2008, NASCIMENTO; BROETTO, 2017).

O fator de segurança médio de um projeto corresponde a um valor mínimo que depende do tipo de obra e vida útil da mesma. Ele é um valor numérico estabelecido pela resistência ao cisalhamento disponível do solo e a tensão de cisalhamento mobilizada, sob efeito dos esforços atuantes (GERSCOVICH, 2016).

2.2.3 Programa de Análise de Estabilidade

O Slope/W® está presente no conjunto Geostudio 2012, e é considerado um dos softwares mais modernos e conhecidos utilizados para a análise de estabilidade de taludes, fundamentando-se na análise de equilíbrio limite (MARANGON, 2017). A Figura 17 mostra sua interface.

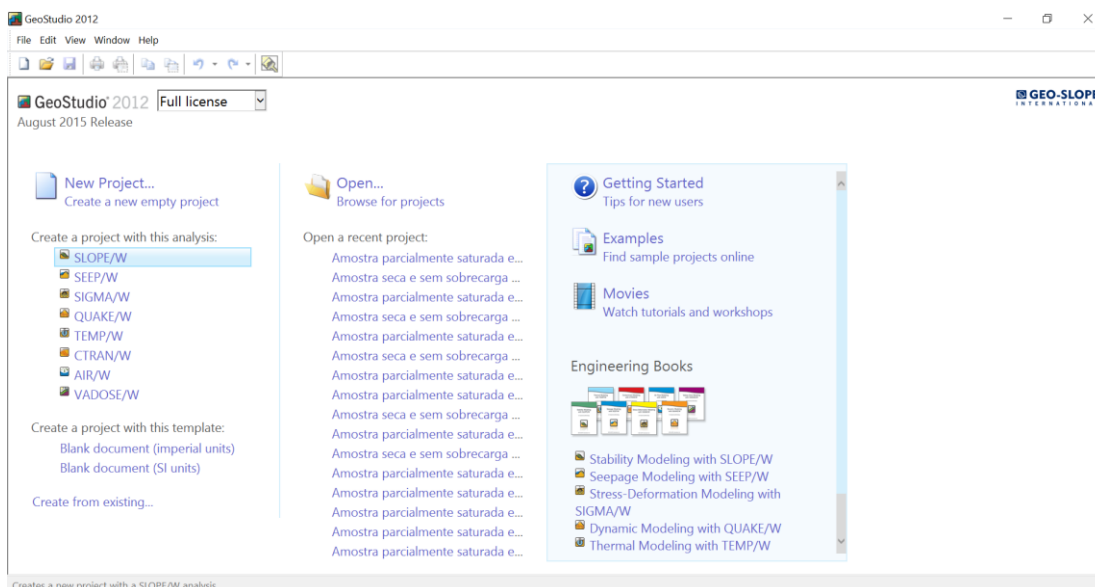


Figura 17 – Slope/W no conjunto de programas da Geostudio 2012.
Fonte: Autor (2021).

Segundo seu manual, ele possibilita a análise de diversos problemas de estabilidade por meio de uma variedade de métodos, principalmente o das fatias. Permite também a modelagem dos diferentes tipos de solos, estratigrafias e geometrias, sendo simples ou complexas, superfícies de escorregamento, o emprego de condições de poropressões variáveis, diferentes propriedades dos solos e condições de carregamentos.

O Slope/W® é capaz de modelar diversos problemas de estabilidade, como: encostas naturais, aterros, escavações ataludadas, muros, estruturas de contenção, encostas, entre tantos outros (NASCIMENTO; BROETTO, 2017).

Além disso, a partir dos métodos de análise contidos no software, ele também possibilita que análises cada vez mais complexas sejam realizadas, permitindo por exemplo, o estudo de estruturas reforçadas com geossintéticos, cortinas atirantadas e outras técnicas construtivas presentes no dia-a-dia do engenheiro geotécnico (MARANGON, 2017).

Para que se realize a análise de estabilidade é necessário inserir os dados de entrada do programa. Sendo eles: a geometria do talude, as camadas de materiais constituintes, seus parâmetros geotécnicos como ângulo de atrito, intercepto de coesão e peso específico, o método de análise, definir a influência ou não da pressão neutra, o uso de sobrecarga e também realizar simulações de carregamento não drenado se desejado. O programa possui uma interface simples, com fácil

visualização dos resultados e com informações sobre as superfícies de deslizamento, incluindo a massa total de deslizamento, detalhamento das forças atuantes sobre uma área específica, além disso, também gera relatórios detalhados sobre os resultados encontrados (NASCIMENTO; BROETTO, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordadas as principais características e propriedades dos resíduos siderúrgicos estudados para utilização no corpo de um aterro hipotético, o software e método escolhido para realização da análise de estabilidade do talude, assim como a geometria e fator de segurança adotado.

3.1 RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

Foram estudadas seis amostras compostas basicamente por quatro coprodutos siderúrgicos, sendo eles: Dry Pit, Lama de Alto Forno, Granulada de Alto Forno, e Pó de Balão. Alguns desses materiais foram analisados isolados e outros em misturas que possuem nomes comerciais. A Tabela 4 a seguir traz todas as misturas estudadas e as Figuras 18 (a), (b), (c) e (d) fotos dos materiais componentes dessas misturas:

Tabela 4 – Misturas de Coprodutos Estudadas.

Amostras	Composição
01	33% Dry Pit + 33% Lama de Alto Forno + 33% Escória Granulada de Alto Forno
02	50% Lama de Alto Forno + 50% Escória Granulada de Alto Forno
03	Ecocarbo I: Pó de Balão
04	Ecocarbo II: Lama de Alto Forno
05	Sidersolo: 80% de Lama de Alto Forno + 20% de Escória Granulada de Alto Forno
06	Escória Granulada de Alto Forno

Fonte: Autor (2021).

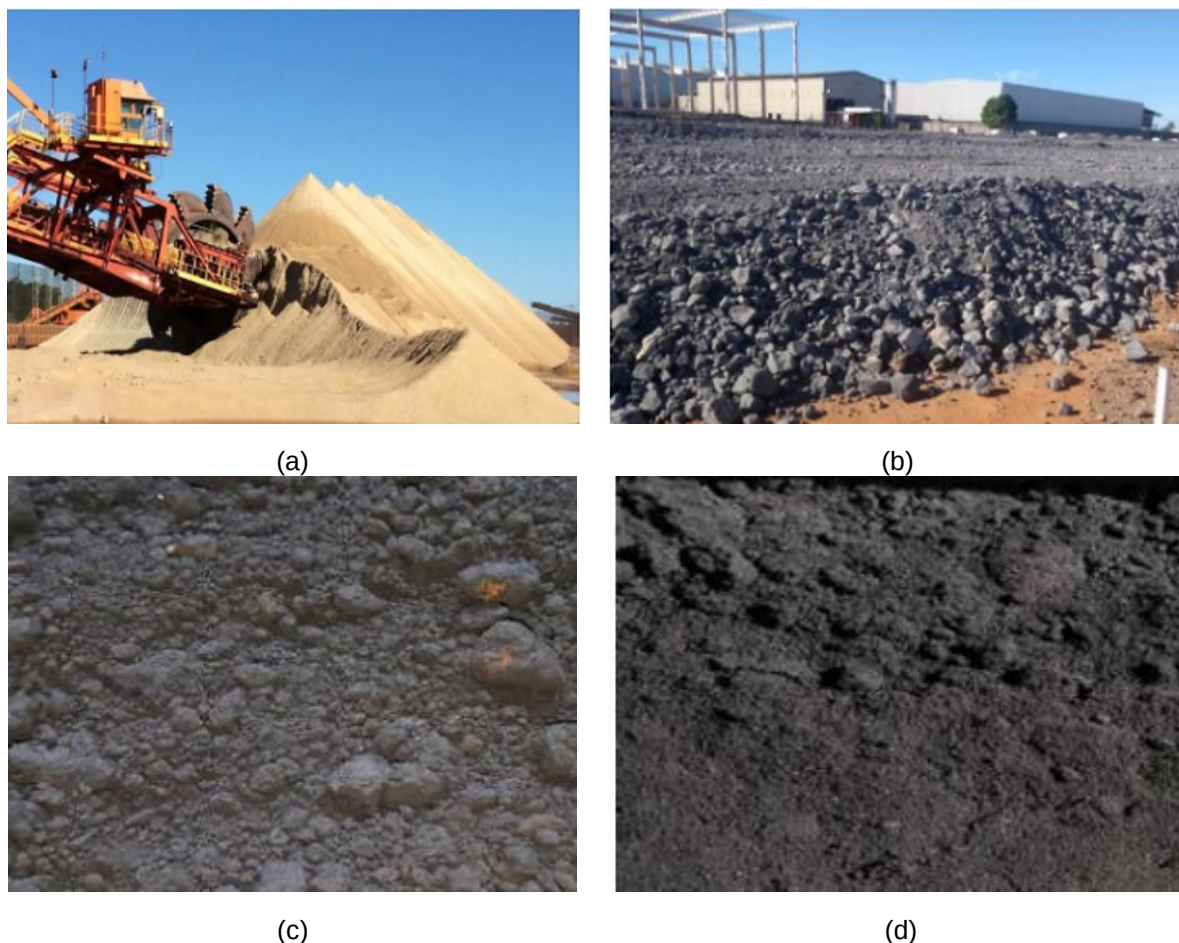


Figura 18 – (a) Escória Granulada de Alto Forno, (b) Escória Dry Pit, (c) Lama de Alto Forno e (d) Pó do Balão.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2021).

3.1.1 Caracterização

Foram disponibilizadas pela ArcelorMittal Tubarão as caracterizações dos coprodutos citados acima. Eles foram ensaiados pela Merieux NutriSciences conforme preconizam as normas NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, e classificados conforme NBR 10004:2004 – Classificação de resíduos sólidos em: classe I – perigosos e classe II – não perigosos e em inertes e não inertes.

O Dry-Pit e a Escória de Alto Forno atingiram valores dentro dos limites para a massa bruta, solubilizado e lixiviado, se enquadrando na Classe II B – Resíduos não Perigosos e Inertes. Já a Lama de Alto Forno os parâmetros Cianeto, Ferro, Fluoreto ultrapassam os limites máximos permitidos no solubilizado e ela foi então classificada como Classe II A – Resíduos não Perigosos e não Inertes. O Pó do Balão também

obteve alguns parâmetros presentes que ultrapassam os limites máximos permitidos no solubilizado, esses materiais foram o Cianeto e o Cloreto, assim, também foi classificado como Classe II A – Resíduos não Perigosos e não Inertes. Esses resultados estão tabelados em anexo.

Apesar da NBR 10.004:2004 classificar de forma objetiva os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, essa classificação não impede o estudo e uso dos resíduos em outras atividades alternativas desde que possa ser garantida a segurança ao trabalhador, ao consumidor final e ao meio ambiente, segundo nota técnica disponibilizada pela Associação de Normas Técnicas em 2006 apud (KAMINSKI, 2007).

3.1.2 Distribuição Granulométrica e Propriedades de Engenharia

Ensaio de granulometria foram realizados para as amostras 1 e 2 pelo Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Espírito Santo (2019) em um projeto de pesquisa em parceria com a ArcelorMittal Tubarão e com a Eco Rodovias, anterior a esta pesquisa, seguindo a NBR 7181:2018 – Solo – Análise granulométrica. A análise granulométrica define as proporções relativas em que cada dimensão das partículas se encontram em um material. A representação gráfica dessa medida se dá a partir de um gráfico em que as abcissas apresentam o logaritmo do diâmetro e as ordenadas a porcentagem em peso passante na peneira correspondente aquele diâmetro (CASTELLO, 1998). A curva granulométrica possui importância fundamental para a caracterização de um material. Os resultados desse ensaio estão mostrados nas Figuras 19 e 20 abaixo:

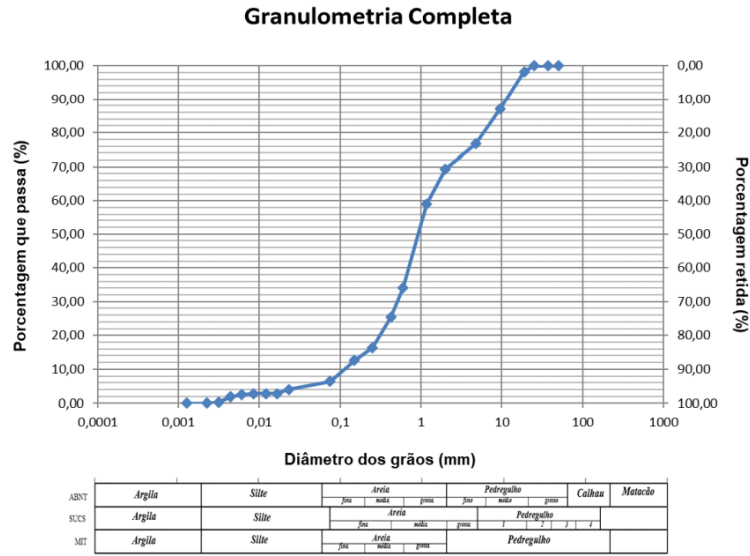


Figura 19 – Granulometria da amostra tipo 1.
Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

Essa amostra passou pelo ensaio de limites de liquidez e plasticidade sendo considerada um material não plástico e não líquido. Assim, sua classificação no Sistema Unificado de Classificações de Solos (SUCS) é SW, sendo sua granulometria semelhante à de uma areia bem graduada com pedregulho.

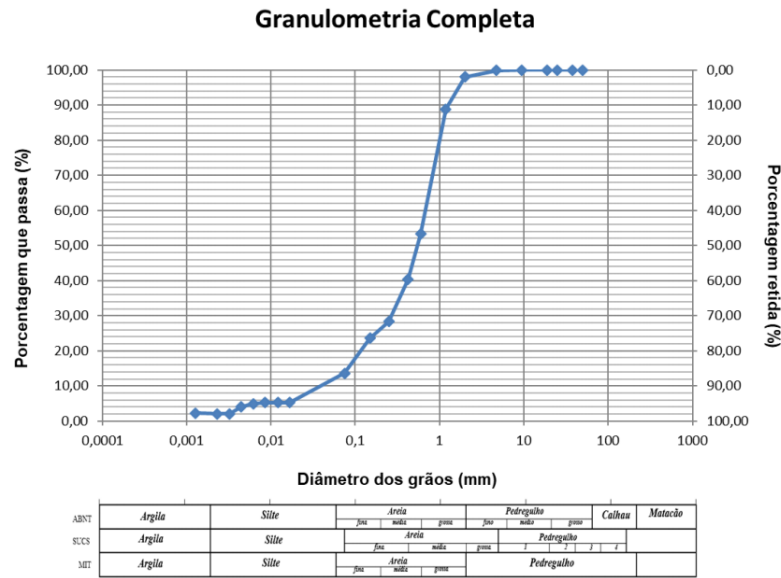


Figura 20 – Granulometria da amostra tipo 2.
Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

Já a segunda amostra, também considerada não líquida e não plástica segundo ensaios de limites de liquidez e plasticidade teve sua classificação no SUCS como SM, se assemelhando à granulometria de uma areia siltosa.

Para as demais misturas e materiais estudados foram fornecidas pela empresa ArcelorMittal suas granulometrias comerciais que constam em resumo na Tabela 5. Assim, o Ecocarbo I possui granulometria de 0 a 1mm, o Ecocarbo II possui grãos menores que 0,150mm, o Sidersolo possui granulometria fina, se assemelhando a argilas e siltes e a Granulada de Alto Forno possui granulometria menor que 4mm.

Tabela 5 – Granulometrias dos materiais estudados.

Material	Diâmetro máximo da partícula (mm)
33% Dry Pit + 33% Lama de Alto Forno + 33% Escória Granulada de Alto Forno	9,50
50% Lama de Alto Forno + 50% Escória Granulada de Alto Forno	1,18
Ecocarbo I: Pó de Balão	1,00
Ecocarbo II: Lama de Alto Forno	0,15
Sidersolo: 80% de Lama de Alto Forno + 20% de Escória Granulada de Alto Forno	0,002
Escória Granulada de Alto Forno	4,00

Fonte: Adaptado Laboratório de Mecânica dos Solos UFES (2019) e ArcelorMittal (2021).

Ainda, foram realizados pelo laboratório de Geotecnia e Pavimentação (2019) na parceria firmada os ensaios de peso específico, umidade e cisalhamento direto desses materiais. Eles ocorreram na condição submersa, com energia de compactação intermediária e seguiram as normas NBR 6457:2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, para obtenção da umidade, NBR 6458:2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e absorção de água, para obtenção do peso específico.

A partir de ensaios de cisalhamento direto, seguindo a norma ASTM D3080 - Método de Teste Padrão para Cisalhamento Direto de Solos sob Condições Drenadas Consolidadas, foram obtidas as envoltórias de resistência.

A Figura 21 traz a envoltória para a amostra 1. Os demais resultados estão expostos no apêndice deste trabalho.

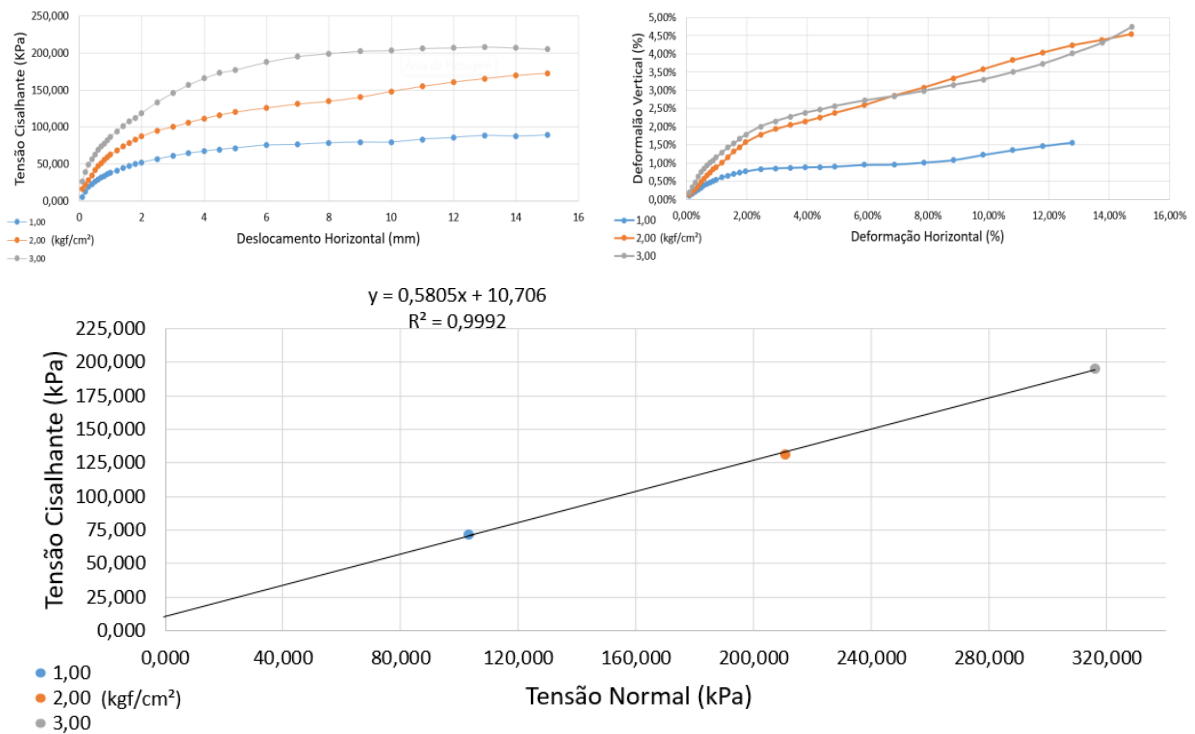


Figura 21 - Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 1.
Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

A Tabela 6 apresenta um resumo dos parâmetros determinados a partir dos ensaios de cisalhamento direto. Esses são os parâmetros de entrada para o software: ângulo de atrito (ϕ'), coesão (c') e peso específico total (γ_t).

Tabela 6 – Parâmetros de Entrada para Análise de Estabilidade.

Amostras	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ_d (kN/m³)	w (%)	γ_t (kN/m³)
01	30,14°	10,69	14,90	13,13	16,86
02	35,53°	11,38	14,10	25,4	17,68
03	29,44°	4,90	8,60	30,2	11,20
04	22,99°	13,04	10,40	33,3	13,86
05	28,67°	4,41	10,50	28,7	13,51
06	31,94°	25,60	16,30	14,5	18,66

Fonte: Autor (2021).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Definição do Software e Método

É comum o uso de modelagem a partir de softwares para a realização da análise de estabilidade de taludes. Neste trabalho optou-se por utilizar o conjunto de programas

desenvolvidos pela Geo-Slope International por permitir modelar tipos heterogêneos de materiais com complexa geometria, considerando diferentes superfícies de deslizamento e poropressões (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2013). Os fatores de segurança para cada corpo de aterro foram calculados no Slope/W®. Na Figura 22 é possível ver sua página inicial.

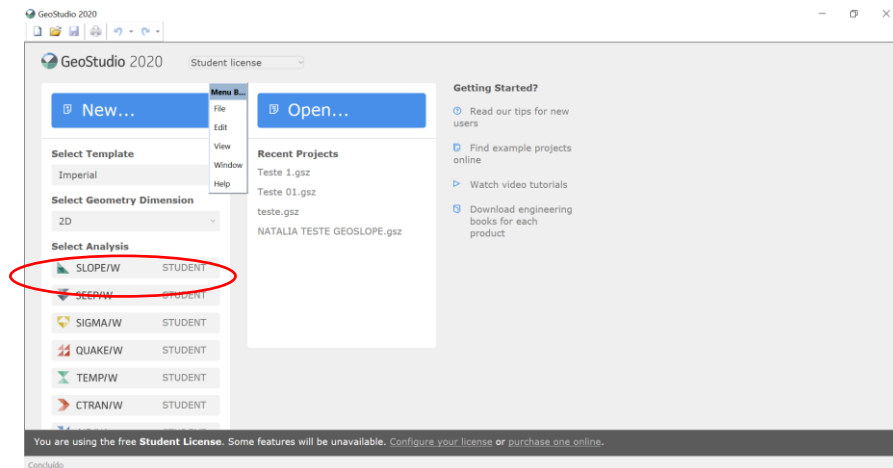


Figura 22 – Página inicial do GEOSLOPE.
Fonte: Autor (2021).

O software disponibiliza diversos métodos que utilizam a análise de equilíbrio limite, que, tradicionalmente são utilizados para fazer estimativas de valores do fator de segurança associados a análises de estabilidade de taludes. Dentre eles, optou-se por utilizar o método de Bishop Simplificado.

No software a definição do método é realizada na página inicial do Slope/W®, mostrada na Figura 23.

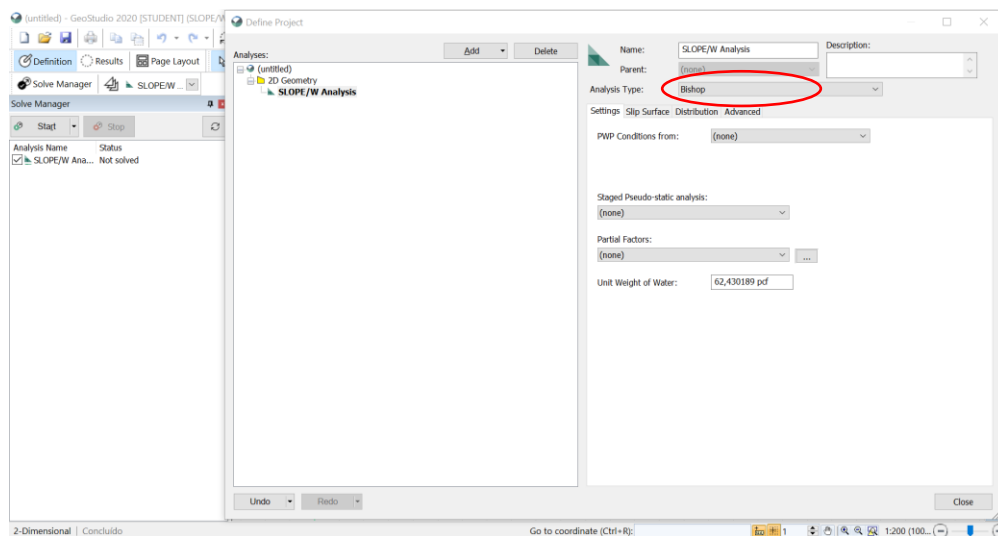


Figura 23 – Página Inicial do Slope/W, onde é realizada a definição do método de análise.
Fonte: Autor (2021).

3.2.2 Definição da Geometria do Corpo de Aterro

As seções para análise foram desenhadas no software *Slope/W*® a partir de coordenadas geométricas que poderiam ser utilizadas para corpo de aterro industrial ou rodoviário e parâmetros geotécnicos definidos anteriormente. Na base do corpo do aterro foi utilizada uma camada de rocha para que a superfície crítica (arco de circunferência associada ao FS mínimo) fosse forçada a acontecer no material estudado. A Figura 24 mostra o esquema típico utilizado.

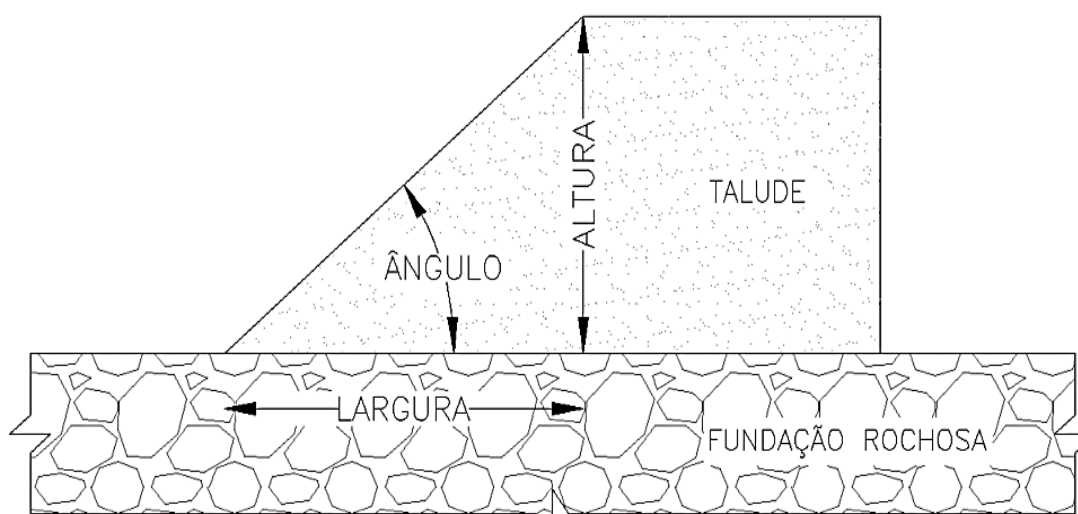


Figura 24 – Dimensões do Talude.
Fonte: Autor (2021).

Posteriormente à definição do método e parâmetros de entrada do software, foram definidas as diferentes alturas e inclinações para realização das análises de estabilidade. Inicialmente foi utilizado um talude com inclinação de 45° e com altura total de 20 metros. Depois reduziu-se gradativamente essa altura até 5 metros, um valor típico para taludes rodoviários. A relação altura e largura foi alterada, aumentando e diminuindo a inclinação do talude dependendo do tipo de amostra de coproduto ensaiada e das condições de contorno do problema a fim de que se obtivesse um fator de segurança satisfatório.

Na Tabela 7, estão dispostas as condições ensaiadas que variaram de amostras na umidade de compactação e sem sobrecarga a amostras saturadas e com sobrecarga mínima de 20 kPa segundo NBR 11.682 (ABNT, 2009), obtendo-se assim, diferentes fatores de segurança.

Tabela 7 – Condições de Saturação e Carregamento do Talude.

Amostra	Condição de Saturação e Carregamento
1	Amostra na umidade de compactação e sem sobrecarga
2	Amostra na umidade de compactação e com sobrecarga mínima de 20kPa
3	Amostra parcialmente saturada e com sobrecarga mínima de 20kPa

Fonte: Autor (2021).

3.2.3 Fator de Segurança

Neste trabalho, buscou-se encontrar um fator de segurança que atendesse às exigências da NBR 11.682/09, conforme o risco que a ruptura do talude apresenta às vidas humanas e aos bens materiais, como explicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de Segurança de acordo com níveis de segurança contra a vida humana e danos materiais.

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

Fonte: Adaptada NBR 11.682 (2009).

Para o cálculo do fator de segurança via software utilizou-se o modelo de ruptura circular, cuja posição é definida a partir de um ponto central. Assim, a superfície crítica de ruptura, correspondente a um fator de segurança mínimo, tem um ponto central inicialmente desconhecido. Sua localização aproximada é obtida a partir de um processo de tentativas. Foi estabelecida uma malha com diversos pontos centrais de superfícies circulares, buscando-se a superfície crítica de ruptura a partir do cálculo dos fatores de segurança para cada ponto da malha, como pode ser visto na Figura 25 a seguir.

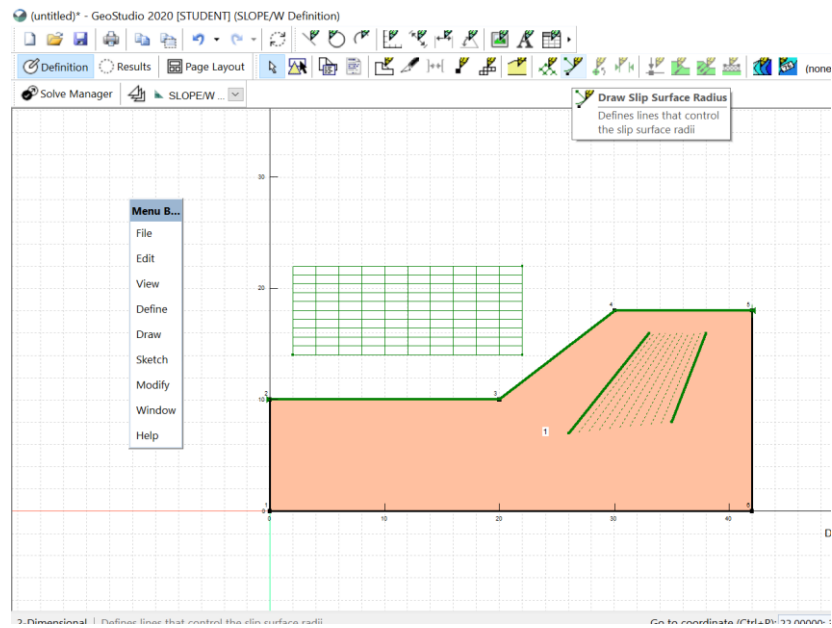


Figura 25 – Definição da superfície de deslizamento, desenho da malha e das linhas da superfície de ruptura.

Fonte: Autor (2021).

Os valores encontrados via software foram comparados com o fator de segurança mínimo atribuído, no qual compreendeu-se que, o nível de segurança contra danos a vidas humanas e contra danos materiais e ambientais são médios, assim, o valor almejado foi de 1,4.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das análises de estabilidade realizadas para as diferentes amostras, suas geometrias e os fatores de segurança obtidos por meio do método de Bishop Simplificado.

4.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

- AMOSTRA 01:

Como mencionado anteriormente essa amostra é composta por 33% de dry pit, 33% de lama de alto forno e 33% de granulada de alto forno. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 16,86 kN/m³, coesão (c') de 10,69 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 30,14°.

Na Tabela 9 estão expostos os resultados encontrados para as três condições ensaiadas e suas diferentes geometrias.

Tabela 9 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 01.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	1,06
	20,00	35,00	1:1,75	29,74	1,54
2	20,00	35,00	1:1,75	29,74	1,37
	20,00	40,00	1:2	26,57	1,48
3	20,00	40,00	1:2	26,57	1,30
	20,00	45,00	1:2,25	23,96	1,39
	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,47
	10,00	10,00	1:1	45,00	1,02
	10,00	20,00	1:2	26,57	1,48
	5,00	5,00	1:1	45,00	1,09
	5,00	10,00	1:2	26,57	1,50

Fonte: Autor (2021).

É possível observar que para a amostra 1 foram encontrados fatores de segurança satisfatórios, maiores que 1,4, para as três condições ensaiadas. Porém, a inclinação do talude variou, diminuindo sua inclinação para que o fator de segurança fosse alcançado nas piores condições. Assim, para a condição 1 foi necessária uma inclinação de 1:1,75 com altura de 20 m para que se atingisse o fator de segurança almejado. Já para a amostra na condição 2 foi necessário diminuir a inclinação para 1:2 mantendo a altura de 20 m e para a condição 3 o ângulo de inclinação do talude precisou ser ainda menor, com 1:2,5 de inclinação em taludes com 20 m de altura e 1:2 em taludes com 10 m e 5 m de altura.

Por essa mistura se caracterizar como material grosso, com pequena porcentagem de finos, sua resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre suas partículas que tem relação direta com o ângulo de atrito. Assim, os resultados encontrados são razoáveis e estão compatíveis com a literatura. As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, o pior valor de FS (condição 1) e melhor valor de FS (condição 3). As figuras correspondentes às outras condições, alturas e inclinações constam no apêndice.

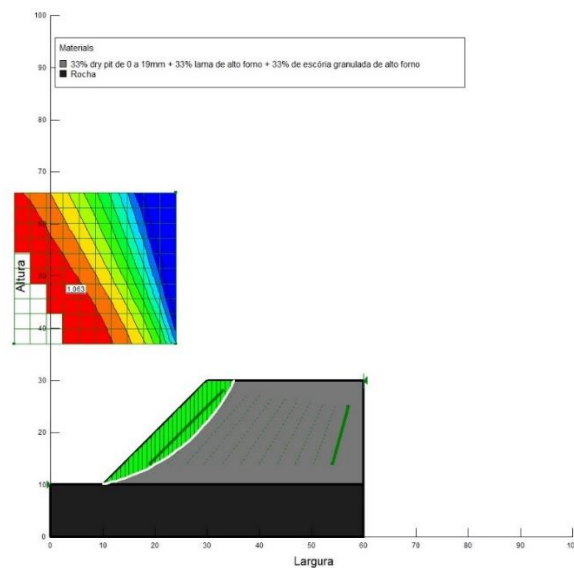


Figura 26 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 1, com fator de segurança de 1,06 e ângulo de talude de 45°.

Fonte: Autor (2021).

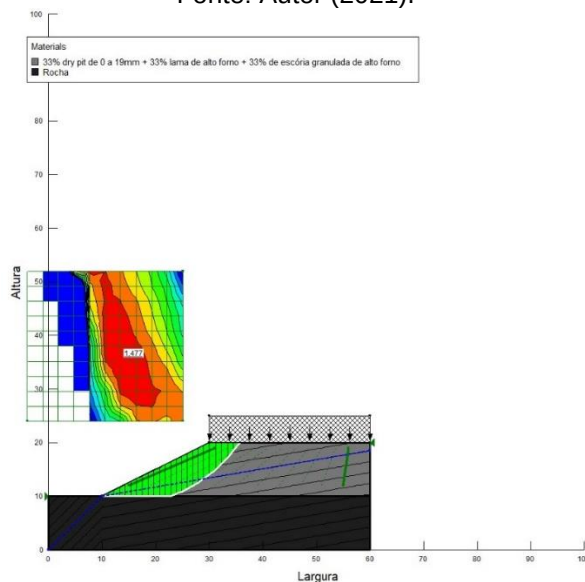


Figura 27 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3, com fator de segurança de 1,48 e ângulo de talude de 26,57°.

Fonte: Autor (2021).

- AMOSTRA 02:

Essa amostra é composta por 50% de lama de alto forno e 50% de granulada de alto forno. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 17,68 kN/m³, coesão (c') de 11,38 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 35,53°.

Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 02.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	1,23
	20,00	25,00	1:1,25	38,66	1,42
2	20,00	25,00	1:1,25	38,66	1,27
	20,00	30,00	1:1,5	33,69	1,45
3	20,00	30,00	1:1,5	33,69	1,36
	20,00	35,00	1:1,75	29,74	1,46
	10,00	10,00	1:1	45,00	1,19
	10,00	15,00	1:1,5	33,69	1,49
	5,00	5,00	1:1	45,00	1,32
	5,00	10,00	1:2	26,57	1,81

Fonte: Autor (2021).

Assim como a amostra 1, a classificação granulométrica dessa mistura mostrou se tratar de um material grosso. Foram obtidos fatores de segurança satisfatórios nas três condições ensaiadas, variando-se a inclinação para cada uma delas. Para a condição 1 foi necessária uma inclinação de talude de 1:1,25 com altura de 20 m para que se atingisse o fator de segurança estipulado. Para a condição 2 uma inclinação de 1:1,5 com altura de 20 m. Já para a terceira condição foi necessária uma inclinação de 1:1,75 para taludes com altura de 20 m, 1:1,5 para taludes com altura de 10 m e 1:2 com altura de 5 m. Observou-se que para essa amostra os resultados obtidos foram melhores que os observados na amostra anterior. Isso pode ser explicado por seu ângulo de atrito possuir um valor mais alto. As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, o pior valor de FS (condição 1) e melhor valor de FS (condição 3). As figuras correspondentes às outras condições, alturas e inclinações constam no apêndice.

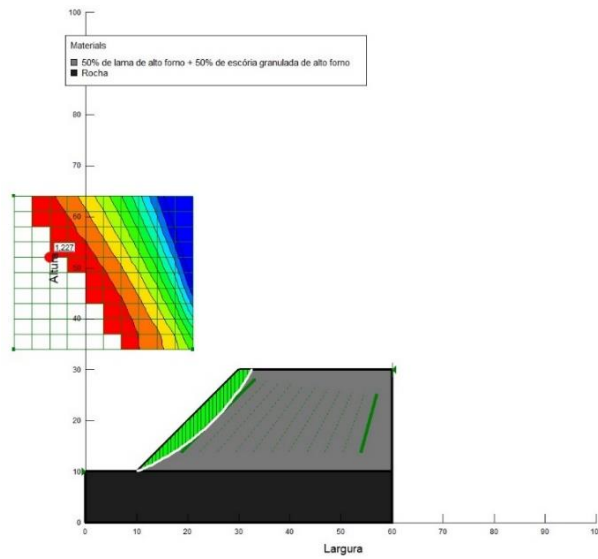


Figura 28 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 1, com fator de segurança de 1,23 e ângulo de talude de 45°.

Fonte: Autor (2021).

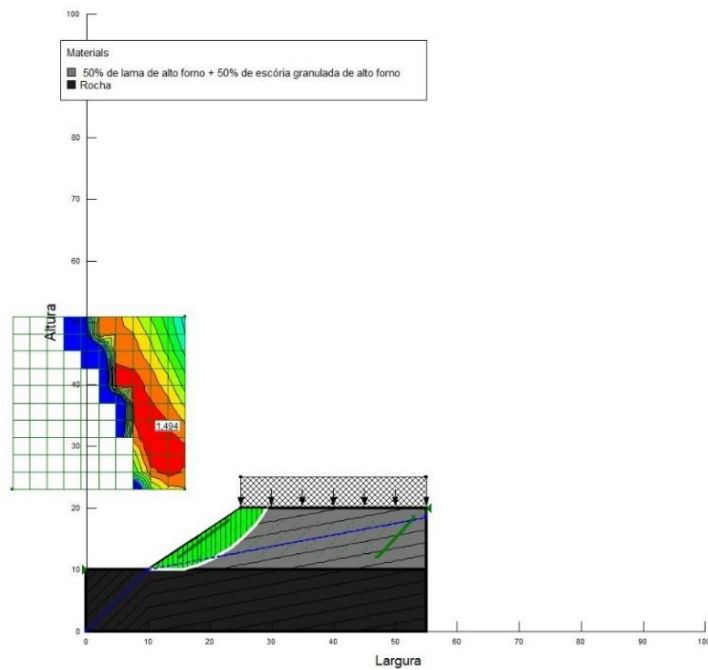


Figura 29 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 33,69°.

Fonte: Autor (2021).

- **AMOSTRA 03:**

Essa amostra é composta por 100% de pó de balão. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 11,20 kN/m³, coesão (c') de 4,90 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 29,44°.

Os resultados para análise de estabilidade encontrados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 03.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	0,97
	20,00	40,00	1:2	26,57	1,53
2	20,00	40,00	1:2	26,57	1,24
	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,40
3	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,10
	20,00	75,00	1:3,75	14,93	1,26
	20,00	105,00	1:5,25	10,78	1,41
	10,00	10,00	1:1	45,00	0,82
	10,00	35,00	1:3,5	15,95	1,45
	5,00	5,00	1:1	45,00	0,83
	5,00	20,00	1:4	14,04	1,51

Fonte: Autor (2021).

Para que fossem atingidos fatores de segurança satisfatórios para a primeira condição foi necessária uma inclinação de 1:2 para talude com altura de 20 m, já para a condição 2 uma inclinação de 1:2,5 com altura de 20 m e para a condição 3 uma inclinação de 1:5,25 para taludes com altura de 20m, 1:3,5 para taludes com altura de 10 m e 1:4 para taludes com altura de 5 m. Assim, a pior hipótese de utilização desse material seria em taludes na condição saturada e com sobrecarga, sendo necessárias grandes extensões e pequenas alturas para que satisfaça as condições requeridas. Sabe-se que a água pode reduzir significativamente a resistência ao cisalhamento de um solo não coesivo, isso explicaria os piores resultados para a condição 3. Seus resultados de forma geral também se mostraram piores se comparados às amostras anteriores e isso pode ser explicado por seu menor ângulo de atrito. As Figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, o pior valor de FS (condição 3) e melhor valor de FS (condição 1). As figuras correspondentes às outras condições, alturas e inclinações constam no apêndice deste trabalho.

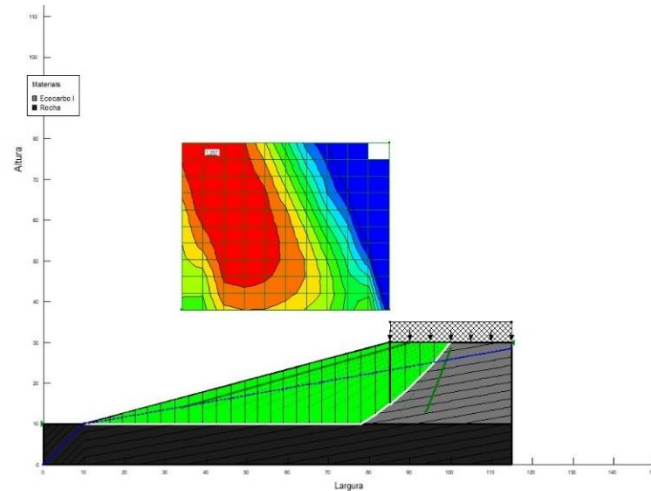


Figura 30 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3, com fator de segurança de 1,26 e ângulo de talude de 14,93°.

Fonte: Autor (2021).

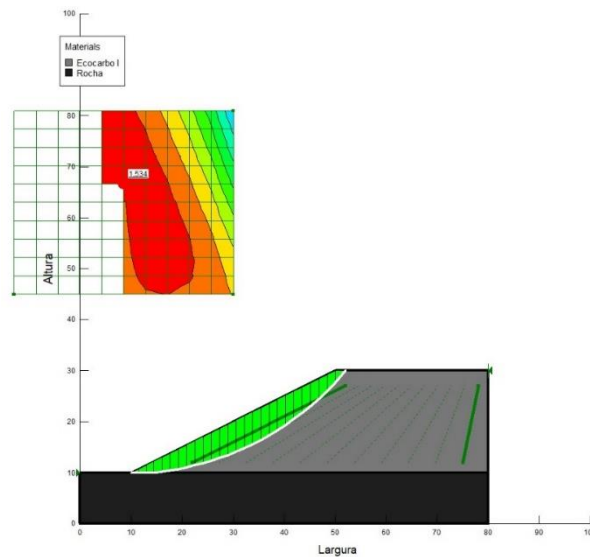


Figura 31 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 1, com fator de segurança de 1,53 e ângulo de talude de 26,57°.

Fonte: Autor (2021).

- **AMOSTRA 04:**

Essa amostra é composta por 100% de lama de alto forno. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 13,86 kN/m³, coesão (c') de 13,04 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 22,99°.

Os resultados encontrados para essa amostra estão dispostos na Tabela 12.

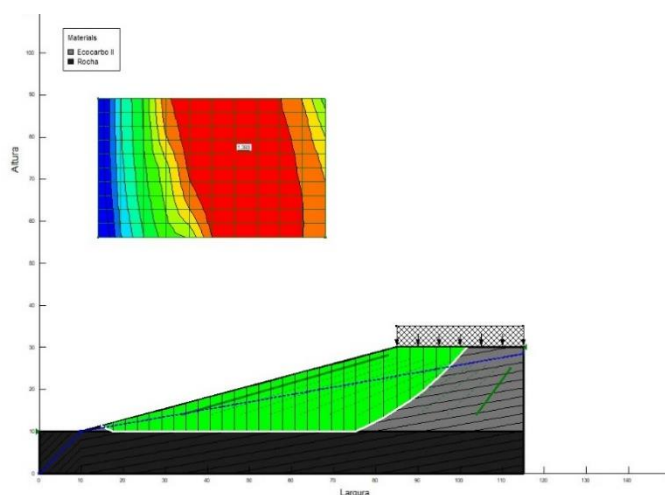
Tabela 12 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 04.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	0,98
	20,00	40,00	1:2	26,57	1,49
2	20,00	40,00	1:2	26,57	1,26
	20,00	45,00	1:2,25	23,96	1,37
	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,49
3	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,15
	20,00	75,00	1:3,75	14,93	1,39
	20,00	80,00	1:4	14,04	1,44
	10,00	10,00	1:1	45,00	0,89
	10,00	30,00	1:3	18,43	1,47
	5,00	5,00	1:1	45,00	0,97
	5,00	15,00	1:3	18,43	1,53

Fonte: Autor (2021).

Conforme pode ser observado na Tabela 12 para que fossem obtidos fatores de segurança satisfatórios para a primeira condição seria necessária uma inclinação de 1:2 e altura de 20 m. Já para a segunda condição uma inclinação de 1:2,5 e altura de 20 m e para a condição 3 uma inclinação de 1:4 para taludes com 20 m de altura e 1:3 para taludes com menores dimensões, alturas de 10 m e 5 m.

Esse material possui uma granulometria fina, isso explica seu baixo valor de ângulo de atrito e alto valor de coesão. Sua resistência ao cisalhamento está mais correlacionada as suas características coesivas e isso pode explicar seus piores resultados se comparados às amostras com granulometria grossa. As Figuras 32 e 33 mostram alguns resultados, sendo que, constam no apêndice, as figuras correspondentes às outras condições, inclinações e alturas.

**Figura 32** – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3, com fator de segurança de 1,39 e ângulo de talude de 14,93°.

Fonte: Autor (2021).

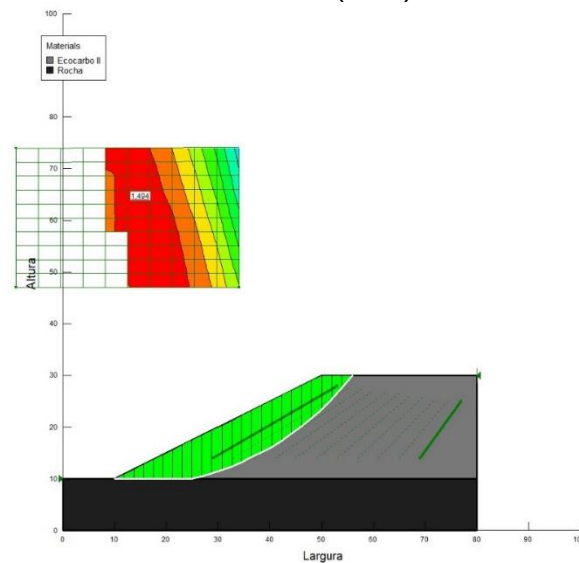


Figura 33 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 1, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 26,57°.

Fonte: Autor (2021).

- **AMOSTRA 05:**

Composta por 80% de lama de alto forno e 20% de granulada de alto forno. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 13,51 kN/m³, coesão (c') de 4,41 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 28,67°.

Os resultados encontrados para essa amostra estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 05.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	0,84
	20,00	40,00	1:2	26,57	1,43
2	20,00	40,00	1:2	26,57	1,25
	20,00	50,00	1:2,5	21,80	1,38
	20,00	55,00	1:2,75	19,98	1,43
	20,00	55,00	1:2,75	19,98	1,21
3	20,00	65,00	1:3,25	17,10	1,31
	20,00	75,00	1:3,75	14,93	1,40
	10,00	10,00	1:1	45,00	0,78
	10,00	30,00	1:3	18,43	1,42
	5,00	5,00	1:1	45,00	0,79
	5,00	20,00	1:4	14,04	1,52

Fonte: Autor (2021).

Conforme pode ser observado na Tabela 13 para que fossem alcançados fatores de segurança satisfatórios para a primeira condição foi necessária uma inclinação de 1:2 com altura de 20 m, para segunda condição 1:2,75 para a mesma altura e para a terceira condição 1:3,75 para altura de 20 m, 1:3 para altura de 10 m e 1:4 para altura de 5 m. É possível observar que a utilização da escória granulada com a lama de alto forno não apresentou melhoras nos fatores de segurança se comparados com a amostra 4 composta apenas pela lama de alto forno, apesar de um aumento significativo do ângulo de atrito. Isso pode ser explicado pelo valor da coesão, que diminuiu consideravelmente de uma amostra para outra. O resultado obtido para o pior caso está exposto na Figura 34 (condição 03) e para o melhor caso na Figura 35 (condição 01). Constam no apêndice, as figuras correspondentes às análises para as outras condições, alturas e inclinações.

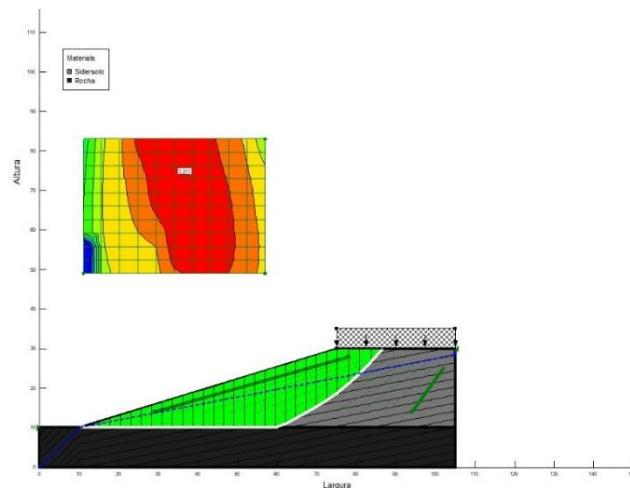


Figura 34 – Pior resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3, com fator de segurança de 1,31 e ângulo de talude de 17,10°.

Fonte: Autor (2021).

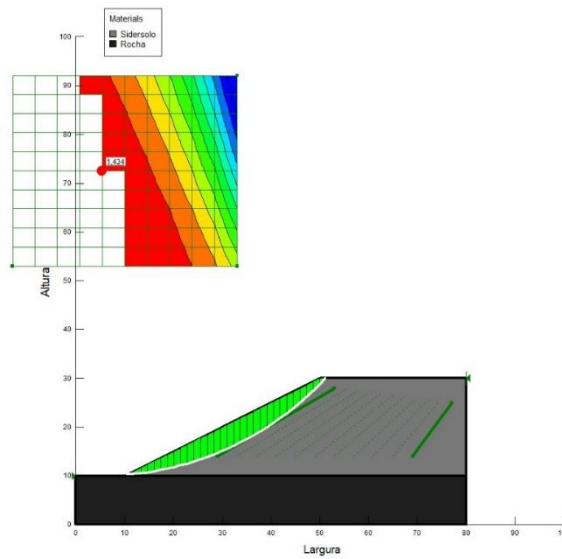


Figura 35 – Melhor resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 1, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 26,57°.

Fonte: Autor (2021).

- AMOSTRA 06:

Composta por 100% de granulada de alto forno. Seus parâmetros de entrada no software foram: peso específico total (γ_t) de 18,66 kN/m³, coesão (c') de 25,60 kPa e ângulo de atrito (ϕ') de 31,94°.

Os resultados encontrados para essa amostra estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Fatores de Segurança obtidos para análise de estabilidade da amostra 06.

Condição	Altura (m)	Largura (m)	v:h	Ângulo (°)	FS (EL)
1	20,00	20,00	1:1	45,00	1,43
	20,00	15,00	1:0,75	53,13	1,22
2	20,00	20,00	1:1	45,00	1,24
	20,00	25,00	1:1,25	38,66	1,42
3	20,00	25,00	1:1,25	38,66	1,33
	20,00	30,00	1:1,5	33,69	1,44
	10,00	10,00	1:1	45,00	1,40
	10,00	15,00	1:1,5	33,69	1,71
	5,00	5,00	1:1	45,00	1,59
	5,00	2,50	1:0,5	63,43	1,22

Fonte: Autor (2021).

Essa amostra foi a que apresentou os melhores resultados. Isso pode ser explicado por seu maior valor de ângulo de atrito e também de coesão, devido à sua granulometria. Observa-se a partir da Tabela 14 que foi possível manter um ângulo

de inclinação alto de 45° para o talude e ainda assim obter fatores de segurança satisfatórios. A Figura 36 mostra um dos resultados obtidos. Constam, no apêndice, os outros resultados expressos em figuras.

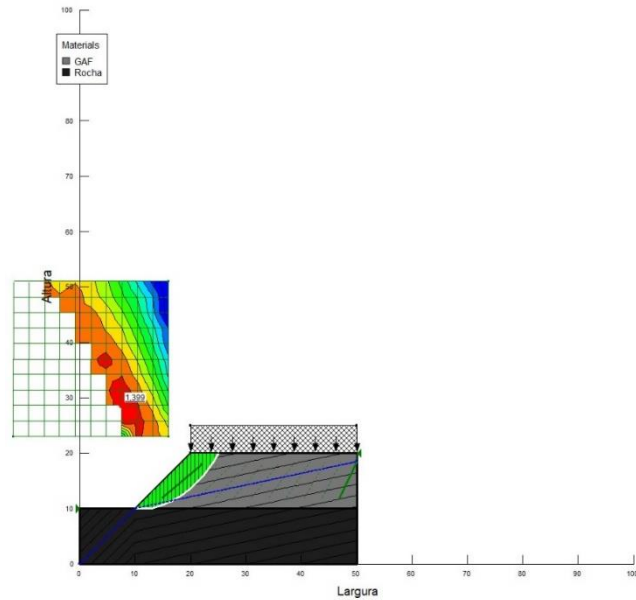


Figura 36 – Resultado da análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 45° .

Fonte: Autor (2021).

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve o objetivo de analisar a viabilidade técnica do uso de coprodutos siderúrgicos no corpo de aterros rodoviários e/ou industriais. Para isso, foram realizadas análises de estabilidade de taludes a partir de uma abordagem determinística pelo método de Bishop Simplificado.

Os materiais analisados foram resíduos sólidos Classe II A – Não Perigosos e Inertes e Classe II B – Não Perigosos e Não Inertes, que são materiais relativamente homogêneos e possuem uma classificação parecida com a de solos naturais como brita, argila e areia, por exemplo. Sua destinação, em geral, ainda é realizada em aterros sanitários e devido à grande quantidade gerada e ao valor agregado que esses materiais possuem, esta pesquisa teve como proposta analisar uma nova aplicação, em corpos de aterro.

A partir das análises realizadas, verificou-se que o aterro composto de granulada de alto forno obteve bons resultados, chegando a uma inclinação de talude de 45° com altura de 20 m e com um FS satisfatório, maior que 1,4, por outro lado, os menores ângulos de inclinação foram encontrados nas seções dos taludes constituídos pelas amostras de sidersolo, ecocarbo I e ecocarbo II.

Observando que alguns dos taludes não atenderam ao fator de segurança estabelecido como admissível optou-se por intervir na geometria, diminuindo as declividades dos taludes do projeto do aterro final. Uma outra alternativa, mantendo a geometria desse talude, seria realizar o melhoramento do solo, mecânica ou quimicamente, aumentando assim, os parâmetros de resistência do solo.

De forma geral, conclui-se que ao modificar a geometria, os valores encontrados pela análise determinística são considerados aceitáveis pela literatura geotécnica ($FS \geq 1,40$) e poderiam ser considerados como parâmetros de projeto. Contudo, uma análise mais aprofundada encontrando melhores parâmetros para o corpo de aterro ainda é válida.

Um aspecto imprescindível desta pesquisa foi a obtenção e publicação dos parâmetros de resistência destes materiais, sendo estes dados ainda inexistentes na literatura ou mesmo pouco estudados. Este trabalho foi um dos pioneiros na viabilidade do uso de coprodutos siderúrgicos em corpos de aterro, contribuindo

assim, para uma nova destinação ainda não explorada e para futuras pesquisas científicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Classificação de Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ALMEIDA, G. M. **Utilização de Escória Produzida em Alto Forno a Carvão Vegetal como Agregado Graúdo e Miúdo para Concreto**. 2014. 135p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará.

ASTM D3080 – **Standart Test Method for Direct Shear Test of Soils Consolidated Drained Conditions**. 2020.

ARCELORMITTAL. **Escória de Alto Forno**. 2019. Disponível em <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: 19 de agosto de 2021.

ARCELORMITTAL. **Lama de Alto Forno**. 2019. Disponível em <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/lama-alto-forno>>. Acesso em: 19 de agosto de 2021.

BRIDI, L. O. **Estudo do efeito da Estabilização com Coproduto de Dessulfuração KR sob as Propriedades Físicas, Mecânicas e Químicas de Solos com Diferentes Teores de Finos**. 2020. 141f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.

CASTELLO, R. R. **Notas de Aula de Geotecnia**. Espírito Santo, 1998.

CUNHA, Y. G. **Avaliação das Propriedades Ambientais do Lixiviado e da Massa Bruta de Solos Melhorados com Coprodutos Siderúrgicos Obtidos em Laboratório por Meio de Ensaio de Coluna**. 2020. 102p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

FREITAS, S. M. A. C. D. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável**. 2018. 128f. Projeto de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. Ouro Preto, Minas Gerais.

GEO-SLOPE. **Stability Modelinh with SLOPE/W**. Calgary: GEO-SLOPE International LTDA, 2013.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a Potencialidade de uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto**. 2001. 188f. Tese apresentada ao Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e Sustentabilidade 2020**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/SUSTENTAB_digital_2020-1.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia**. 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/08/Estatistica-da-Siderurgia_2o_TRI_2021.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Institucional**. 2019. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/INSTITUCIONAL_digital_2020.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. 2018. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2021.
INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION – ITA. US Department of Commerce. **Global Steel Report**. 2018. Disponível em: <https://legacy.trade.gov/steel/pdfs/global-monitor-report-2018.pdf>. Acesso em: 16 de agosto de 2021.

JOHN, V. M. **Cimento de Escória Ativada com Silicatos de Sódio**. 1995. 199p. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, São Paulo.

KAMINSKI, F. H.C. **Análise crítica da norma ABNT NBR 10004:2004 Resíduos sólidos-Classificação**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARANGON, M. **Notas de Aula: Geotecnia de Fundações e Obras de Terra**. Unidade 04 – Utilização de Recursos Computacionais em Geotecnia: Uso do programa Slope/W. 2017. Juiz de Fora, Minas Gerais.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2003.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de Escória de Alto Forno a Carvão Vegetal como Adição no Concreto**. 2005. 122p. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia da Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo.

MAXWELL. **Tipos de escorregamento do maciço rochoso**. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11512/11512_3.PDF>. Acesso em: 25 de agosto de 2021.

MORAES, J. M. S. D. **Análise Comparativa de Estabilidade de Aterro de Resíduo com Beneficiamento de Rocha Ornamental pelos Métodos Determinísticos de Equilíbrio Limite e Tensão-Deformação**. 2018. 74p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.

NASCIMENTO, B. M. D.; BROETTO, R. B. **Análise de Estabilidade de Talude em Aterro de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. 2017. 85p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.

OLIVEIRA, C. F. **Uso de Coproduto de Dessulfuração de Reator Kambara como Agente Estabilizante de Solos para Fins de Pavimentação**. 2018. 108p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

OLIVEIRA, V. S. **Análise de Estabilidade Bi e Tridimensional de Taludes Estabilizados com Solo Grampeado**. 2006. 170p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

OLIVEIRA, H. M. D. **Comportamento de Aterros Reforçados sobre Solos Moles Levados à Ruptura**. 2006. 140p. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PIMENTA, I. J. **Caracterização e Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Mina de Capão Xavier**. 2005. 162p. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2006.

RIBEIRO, R. C. H; SAYÃO, A. S. F. J. **Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas**. 2008. 161p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, B. V. D. **Estabilidade de Taludes de Aterros não Controlados de Resíduos**. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Geológica na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

SILVA, J. P. M. D. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal.

SOUZA, E. B. D. O. **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. 2007. 128f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

UFES. Laboratório de Geotecnia e Pavimentação. **Relatório nº 1**. Vitória, 2019.

UFES. Laboratório de Geotecnia e Pavimentação. **Relatório de Cisalhamento**. Vitória, 2019.

ANEXO I

São apresentados neste anexo os resultados dos ensaios de massa bruta, lixiviado e solubilizado realizados pela Meriux NutriSciences para os coprodutos estudados.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
Arsênio	mg/kg	1	< 1	
Cádmio	mg/kg	0,1	< 0,1	
Chumbo	mg/kg	1	< 1	
Cromo	mg/kg	1	31,0	
Selênio	mg/kg	1	< 1	

NBR 10004:2004 - Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	11,13	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1,1	< 1,1	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	87,4	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,11	0,2	250 (c)

Figura 37 – Resultado da massa bruta para amostra de Dry Pit.
Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	1,53	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	0,0116	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150
Mercurio	mg/L	0,000075	< 0,00008	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	20,0
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Clorato de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	0,0044	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,0001	0,000141	200
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,00005	< 0,00005	200

Figura 38 – Resultado ensaio de lixiviado para amostra de Dry Pit.
Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Pentaclorofenol	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,9
Piridina	mg/L	2,5	< 2,5	5,0
Tetracloroto de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,2
Metiltilcetona	mg/L	2,5	< 2,5	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16 - 20
Solução de Extração		---	1	
pH Final do Lixiviado		---	7,3	

Figura 39 – Resultado ensaio de lixiviado para amostra de Dry Pit.
Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,154	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,358	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	2,5	12,1	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,0374	0,3
Fluoreto	mg/L	0,25	< 0,25	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,00008	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,5	< 0,5	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	9,63	200
Sulfato	mg/L	25	94,2	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,0283	5,0

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

NBR 10006:2004 - Solubilizado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	0-14	10,8	

Figura 40 - Resultado ensaio de solubilizado para amostra de Dry Pit.
Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
Arsênio	mg/kg	1	< 1	
Cádmio	mg/kg	0,1	< 0,1	
Chumbo	mg/kg	1	< 1	
Cromo	mg/kg	1	8,43	
Selênio	mg/kg	1	< 1	

NBR 10004:2004 - Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	10,16	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1,1	< 1,1	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	92,4	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,11	0,1	250 (c)

Figura 41 – Resultado da massa bruta para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	1,31	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	< 0,1	150
Mercurio	mg/L	0,000075	< 0,00008	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	20,0
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Cloroto de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	0,0014	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,0001	0,000721	200
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,00005	< 0,00005	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Pentaclorofenol	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,9
Piridina	mg/L	2,5	< 2,5	5,0
Tetracloroto de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,2
Metiletilcetona	mg/L	2,5	< 2,5	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16 - 20
Solução de Extração		---	1	
pH Final do Lixiviado		---	6,1	

Figura 42 – Resultado de lixiviado para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,116	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,0997	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	5	38,0	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,0203	0,3
Fluoreto	mg/L	0,05	0,77	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Mercurio	mg/L	0,000075	< 0,00008	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	< 0,1	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	11,7	200
Sulfato	mg/L	5	53,0	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,0133	5,0

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

NBR 10006:2004 - Solubilizado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	0-14	9,8	

Figura 43 – Resultado de solubilizado para amostra de Escória Granulada de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2016).

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
Arsênio	mg/kg	1	18,8	
Cádmio	mg/kg	0,1	12,1	
Chumbo	mg/kg	1	965	
Cromo	mg/kg	1	48,7	
Selênio	mg/kg	1	< 1	

NBR 10004:2004 - Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	10,48	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1,7	< 1,7	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	57,5	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,17	0,6	250 (c)

Figura 44 – Resultado da massa bruta para amostra de Lama de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2017).

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	1,28	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	2,0	150
Mercurio	mg/L	0,000075	< 0,000075	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	20,0
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	0,015	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Cloro de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	< 0,001	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,0001	0,000388	200
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,00005	0,000271	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Pentaclorofenol	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,9
Piridina	mg/L	2,5	< 2,5	5,0
Tetracloro de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,2
Metiletilcetona	mg/L	2,5	< 2,5	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16 - 20
Solução de Extração		---	2	
pH Final do Lixiviado		---	7,8	

Figura 45 – Resultado de lixiviado para amostra de Lama de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2017).

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,142	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,220	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	0,28	0,07
Cloreto	mg/L	25	121	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,301	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	5,20	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg/L	0,00008	< 0,00008	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,5	< 0,5	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	44,1	200
Sulfato	mg/L	2,5	52,3	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,0513	5,0

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002

NBR 10006:2004 - Solubilizado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	0-14	9,9	

Figura 46 – Resultado de solubilizado para amostra de Lama de Alto Forno.
 Fonte: Adaptada Meriux NutriSciences (2017).

Parâmetros analisados	Lixiviado (mg/L)		Solubilizado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004	Amostra	NBR 10004
	INORGÂNICOS		INORGÂNICOS	
Arsênio	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Bário	1,2	70	0,02	0,7
Cádmio	< 0,05	0,5	< 0,005	0,005
Chumbo	< 0,05	1,0	< 0,01	0,01
Cromo total	< 0,05	5,0	< 0,01	0,05
Fluoreto	5,2	150	1,1	1,5
Mercurio	< 0,001	0,1	< 0,001	0,001
Prata	< 0,1	5,0	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Alumínio	NA	NL	< 0,01	0,2
Cianeto	NA	NL	0,226	0,07
Cloreto	NA	NL	1120	250
Cobre	NA	NL	< 0,008	2,0
Índice de fenóis	NA	NL	< 0,01	0,01
Ferro	NA	NL	0,02	0,3
Manganês	NA	NL	0,04	0,1
Nitrato	NA	NL	< 0,05	10
Sódio	NA	NL	95	200
Sulfato	NA	NL	105	250
Surfactantes	NA	NL	0,13	0,5
Zinco	NA	NL	< 0,02	5,0
Parâmetros analisados	Lixiviado (mg/L)		Solubilizado (mg/L)	
	Amostra	NBR 10004	Amostra	NBR 10004
	OUTROS ORGÂNICOS		OUTROS ORGÂNICOS	
Benzeno	NA	0,5	NA	NL
Benzo(a) pireno	NA	0,07	NA	NL
Cloreto de vinila	NA	0,5	NA	NL
Clorobenzeno	NA	100	NA	NL
Clorofórmio	NA	6,0	NA	NL
1,4-Diclorobenzeno	NA	7,5	NA	NL
1,2 Dicloroetano	NA	1,0	NA	NL
1,1 Dicloetileno	NA	3,0	NA	NL
2,4-Dinitrotolueno	NA	0,13	NA	NL
Hexaclorobenzeno	NA	0,1	NA	NA
Hexaclorobutadieno	NA	0,5	NA	NL
Nitrobenzeno	NA	2,0	NA	NL
CCl ₄	NA	4,0	NA	NL
Tetracloroetileno	NA	4,0	NA	NL
Tricloroetileno	NA	7,0	NA	NL
Orto-Cresol	NA	200	NA	NL
(m+p)-Cresol	NA	200	NA	NL
2,4,5 - Triclorofenol	NA	400	NA	NL
2,4,6 - Triclorofenol	NA	20	NA	NL
Piridina	NA	5,0	NA	NL
Metiletilcetona	NA	200	NA	NL
Hexacloroetano	NA	3,0	NA	NL

NA = não analisado devido às características da amostra.

NL = parâmetro não legislado pela norma em referência.

Figura 47 – Resultado do lixiviado e solubilizado para amostra de Pó do Balão.
Fonte: Cetrel (2011).

ANEXO II

São apresentados neste apêndice as imagens dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

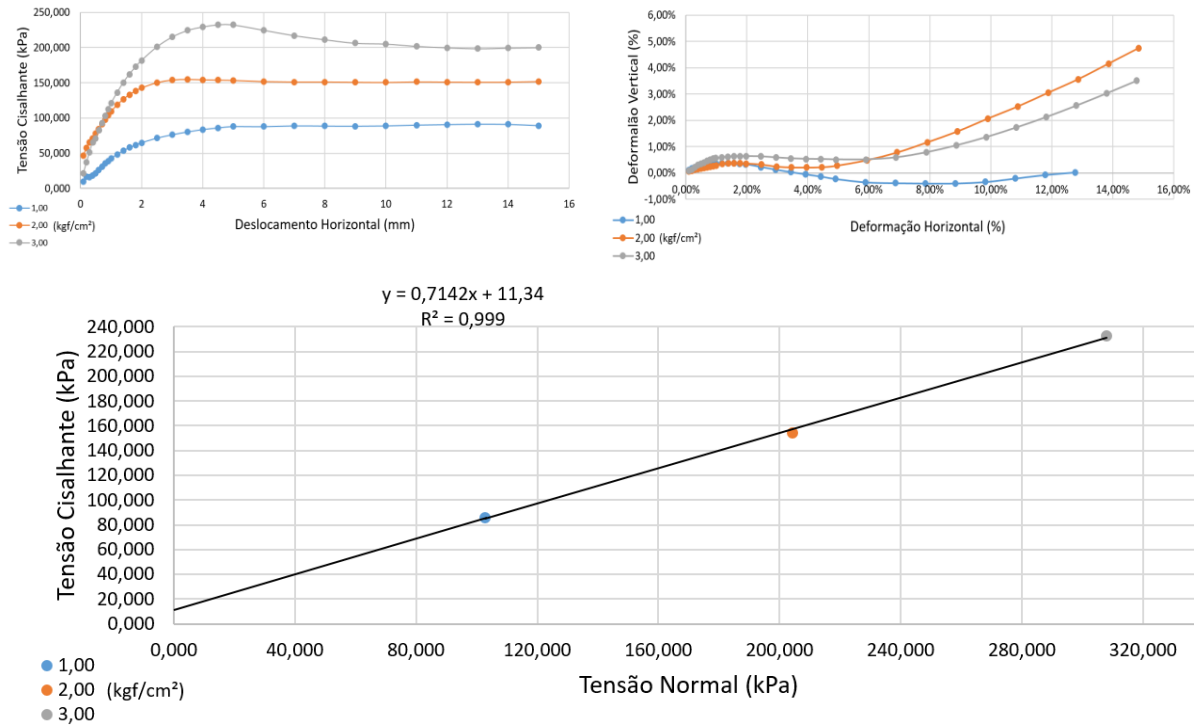


Figura 48 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 2.

Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

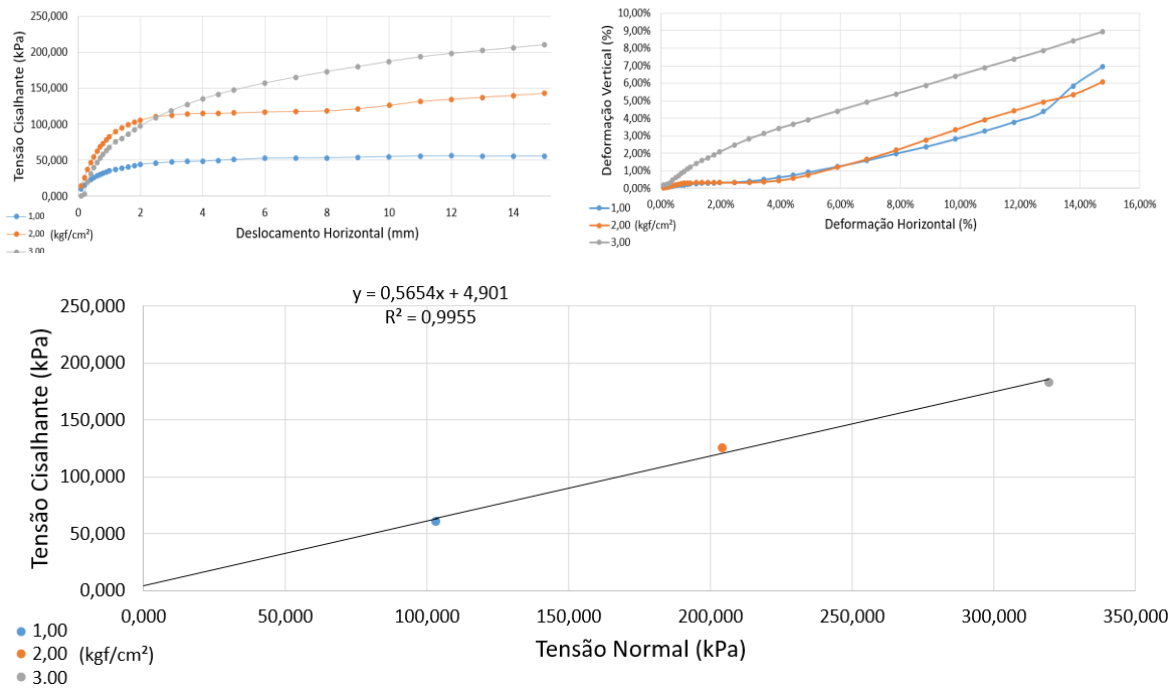


Figura 49 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 3.
 Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

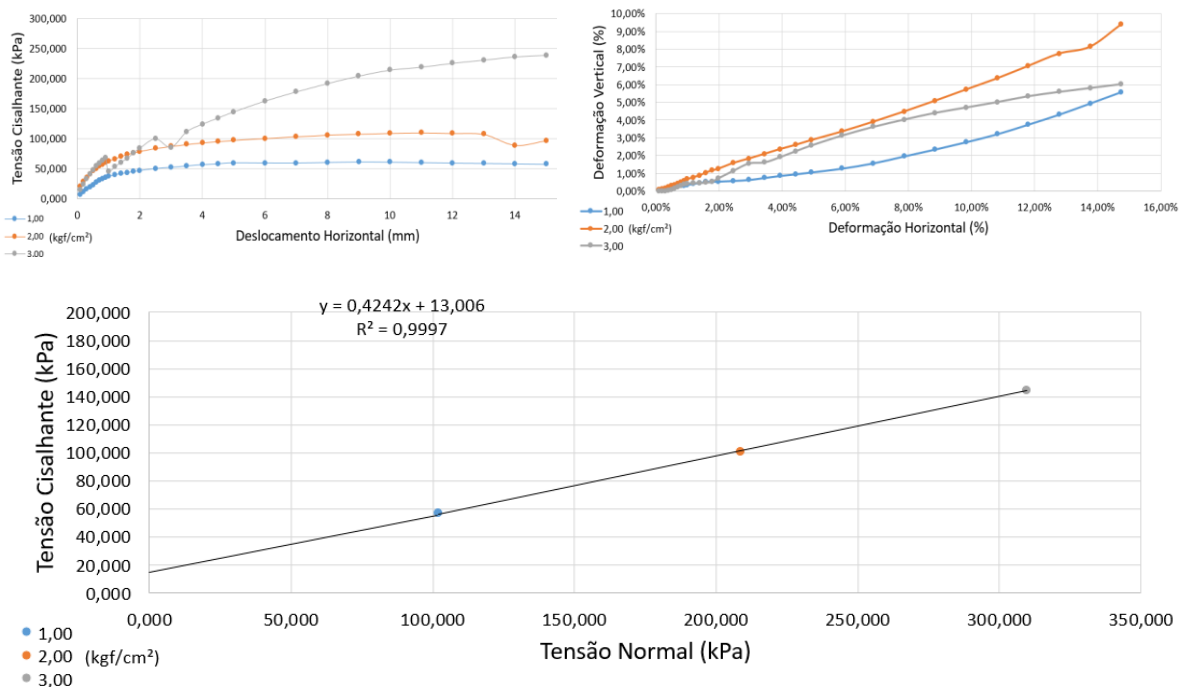


Figura 50 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 4.
 Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

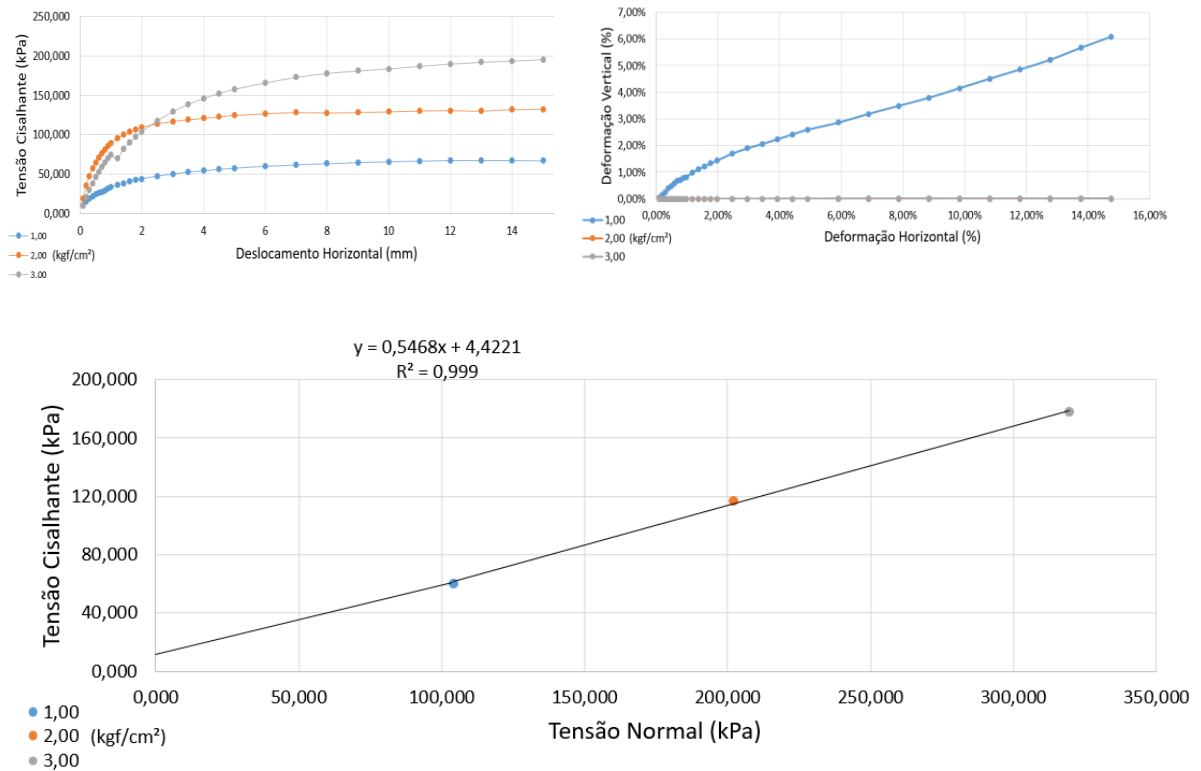


Figura 51 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 5.
 Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

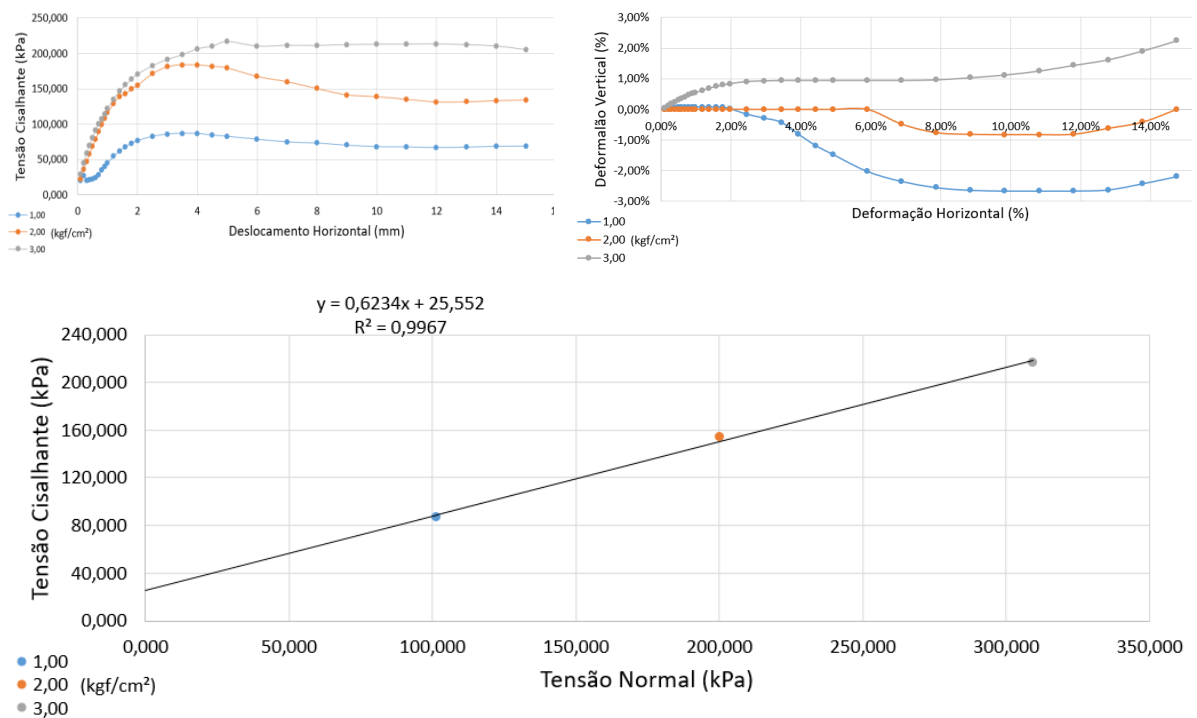


Figura 52 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto da Amostra 6.
 Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES (2019).

APÊNDICE A

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 1.

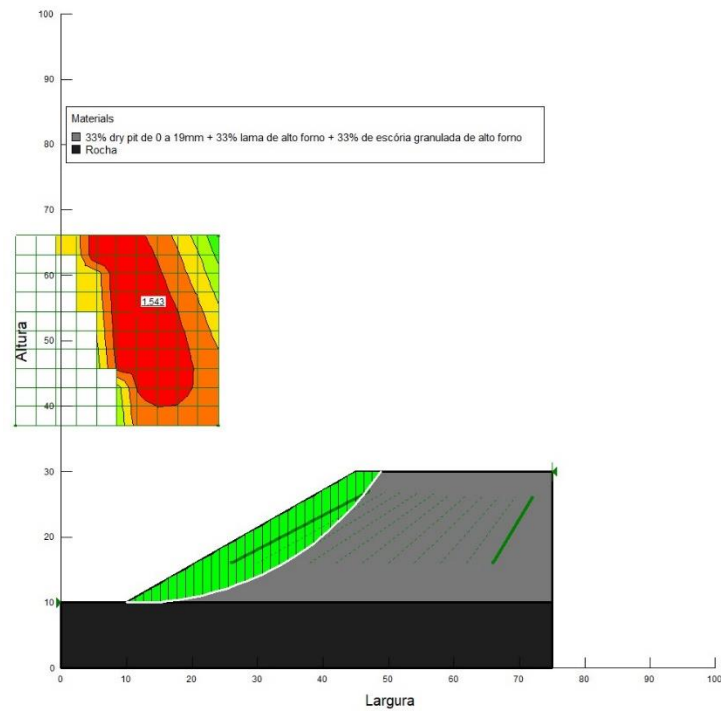


Figura 53 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 1, com fator de segurança de 1,54 e ângulo de talude de 29,74°.

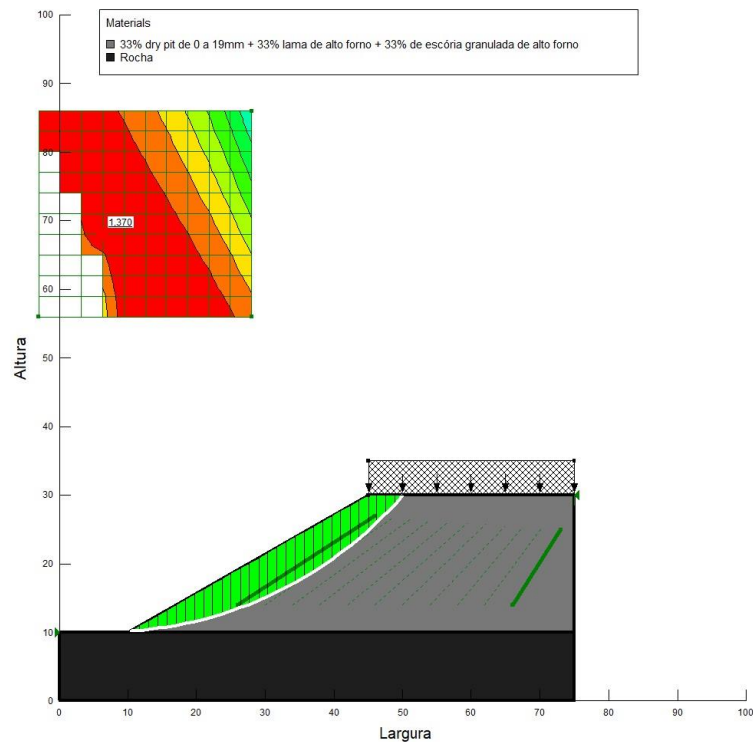


Figura 54 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 2, com fator de segurança de 1,37 e ângulo de talude de 29,74°.

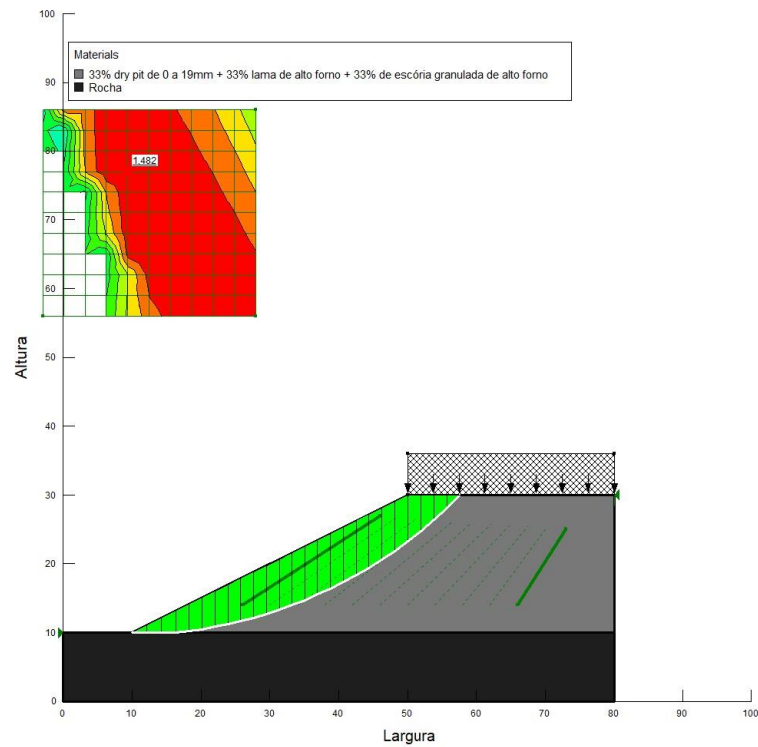


Figura 55 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 2, com fator de segurança de 1,48 e ângulo de talude de 26,57°.

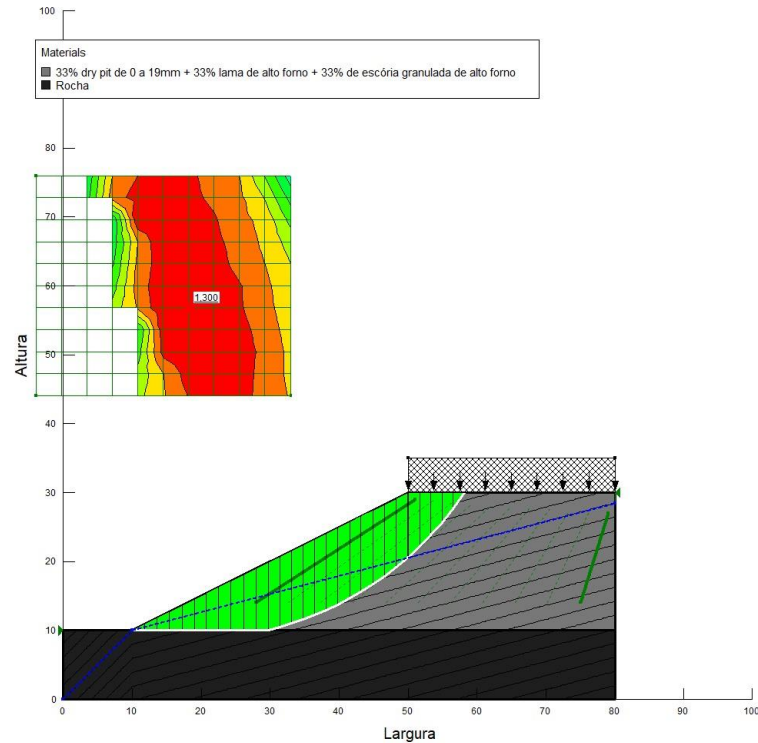


Figura 56 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20m, com fator de segurança de 1,30 e ângulo de talude de 26,57°.

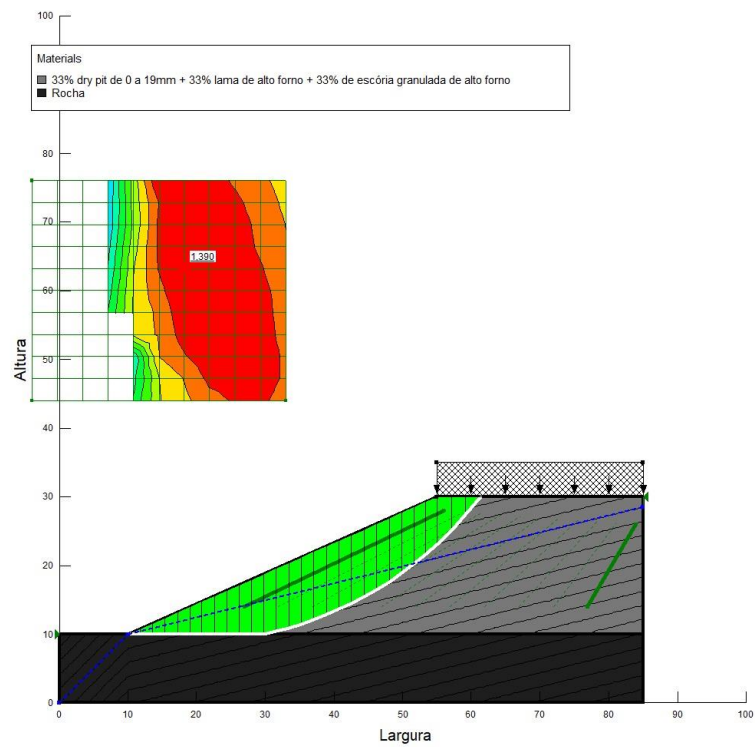


Figura 57 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20m, com fator de segurança de 1,39 e ângulo de talude de 23,96°.

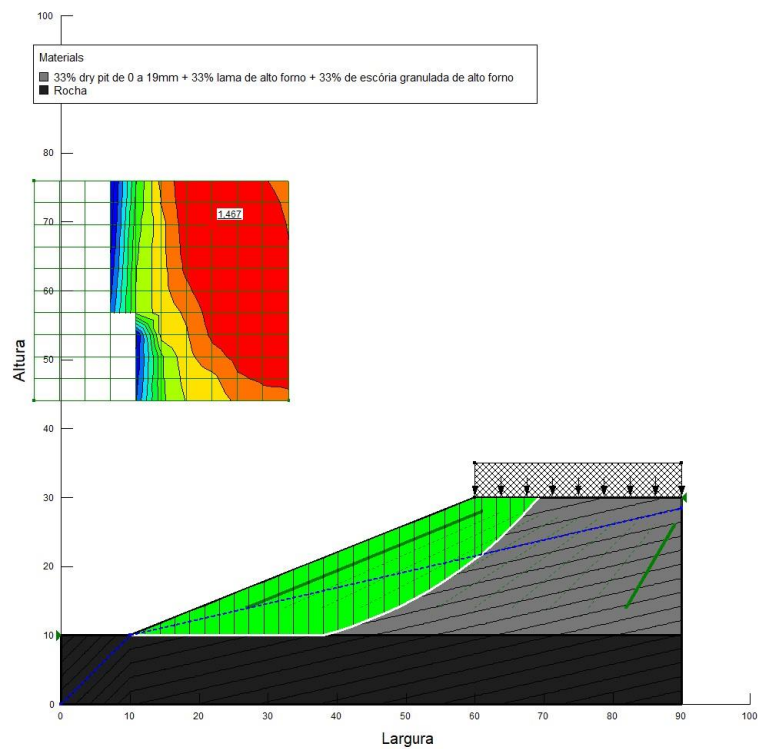


Figura 58 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,47 e ângulo de talude de 21,80°.

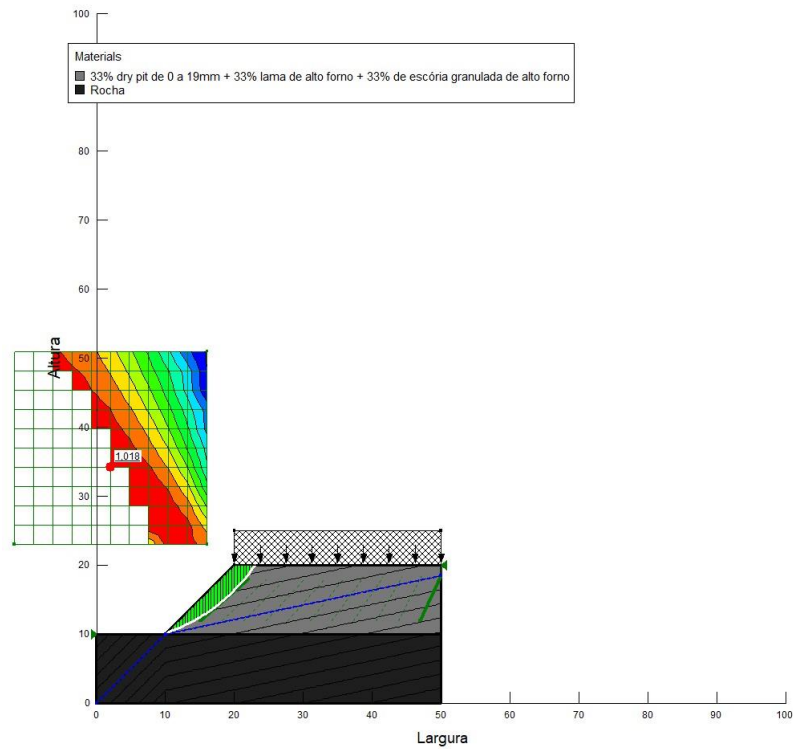


Figura 59 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 10m, com fator de segurança de 1,02 e ângulo de talude de 45°.

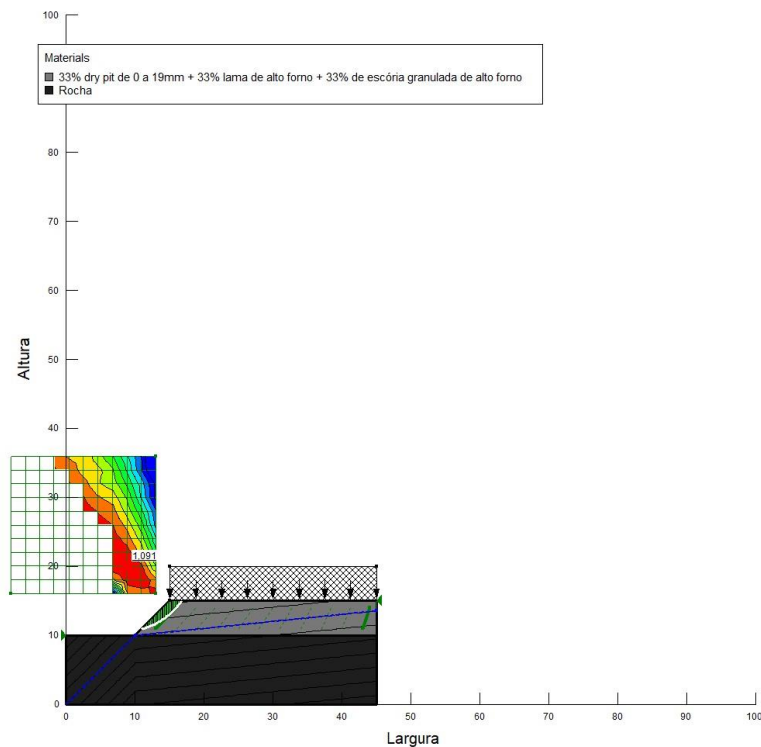


Figura 60 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 com altura de 5 m, com fator de segurança de 1,09 e ângulo de talude de 45°.

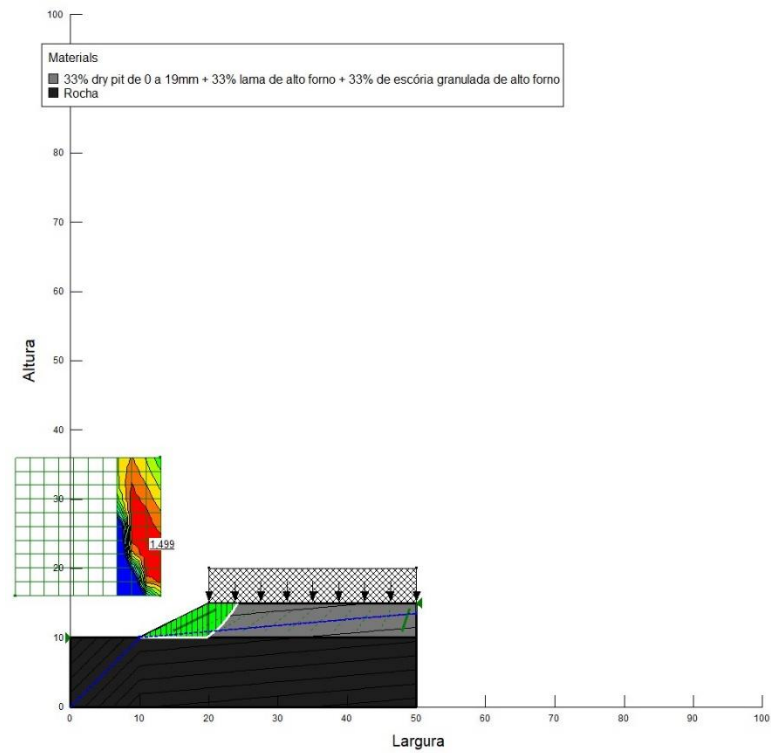


Figura 61 – Análise de estabilidade para amostra tipo 1, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,50 e ângulo de talude de 26,57°.

APÊNDICE B

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 2.

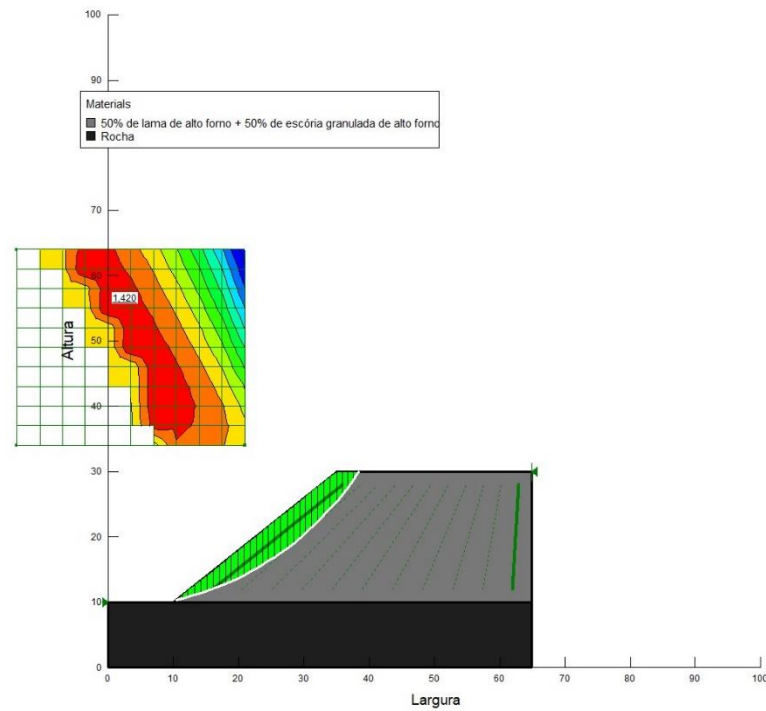


Figura 62 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 1, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 38,66°.

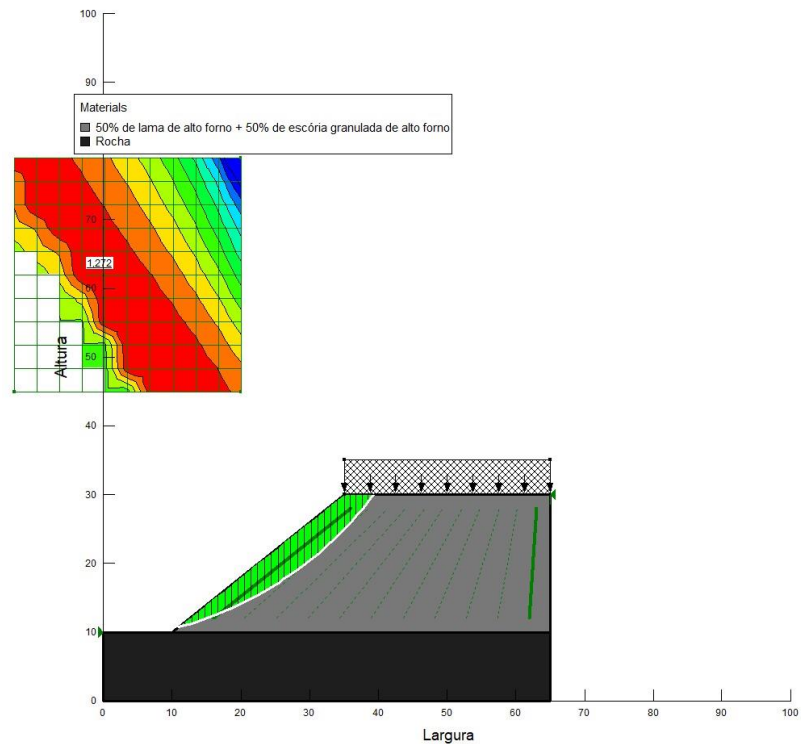


Figura 63 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 2, com fator de segurança de 1,27 e ângulo de talude de 38,66°.

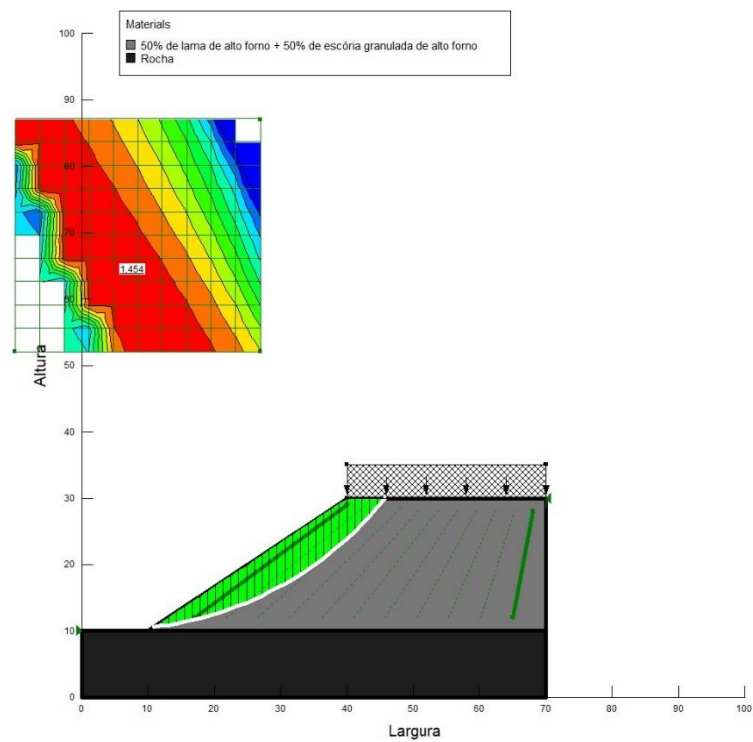


Figura 64 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 2, com fator de segurança de 1,45 e ângulo de talude de 33,69°.

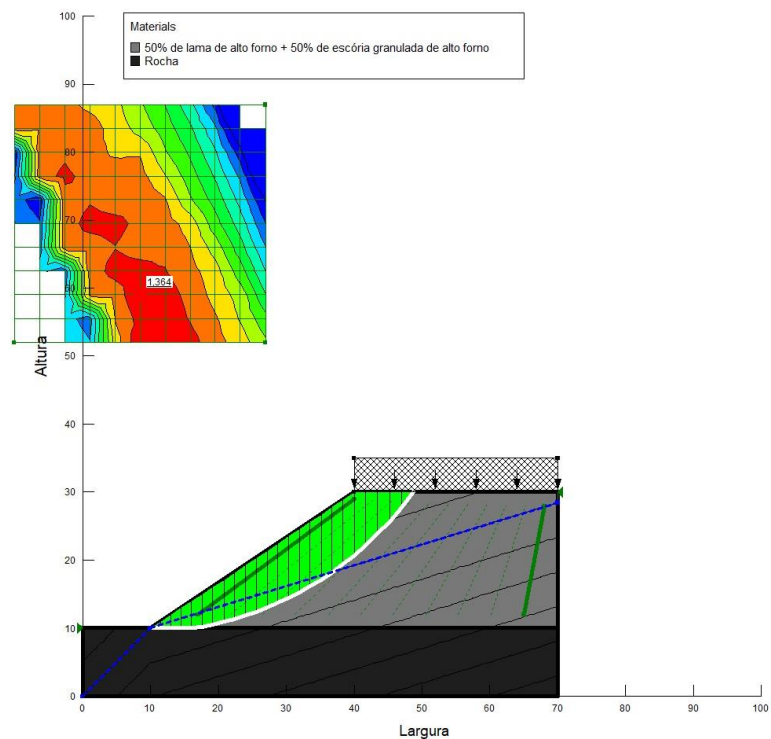


Figura 65 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,36 e ângulo de talude de 33,69°.

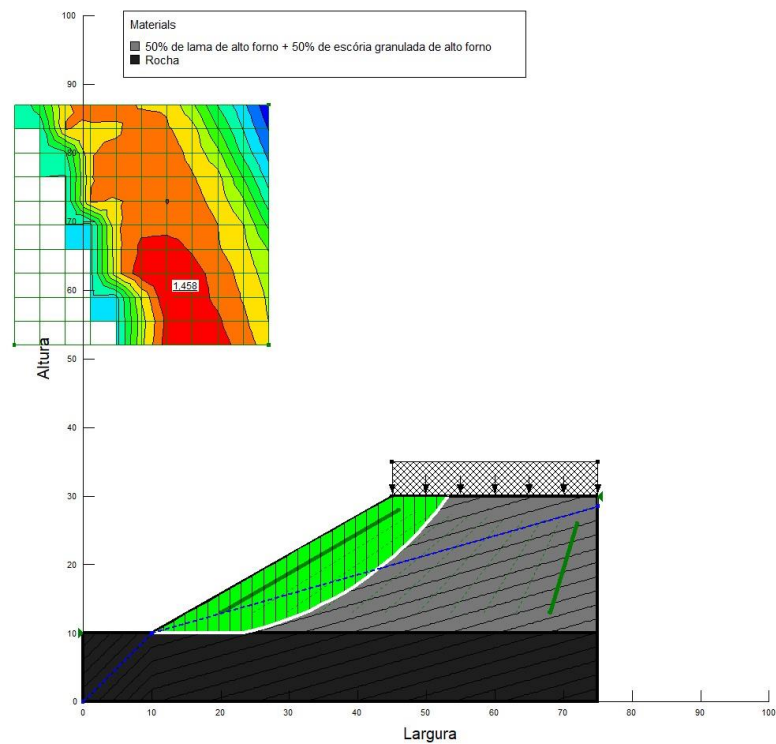


Figura 66 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,46 e ângulo de talude de 29,74°.

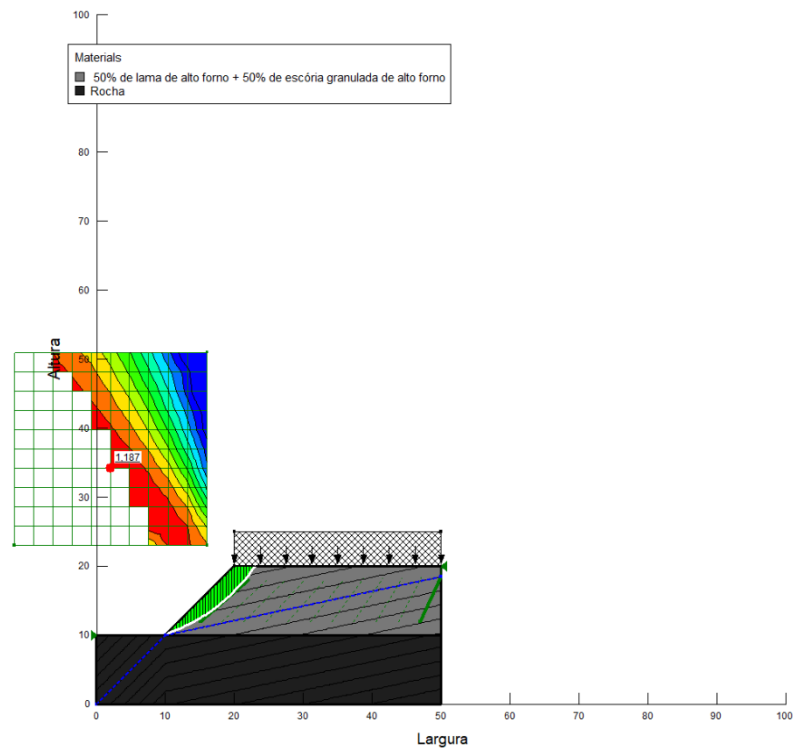


Figura 67 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,19 e ângulo de talude de 45°.

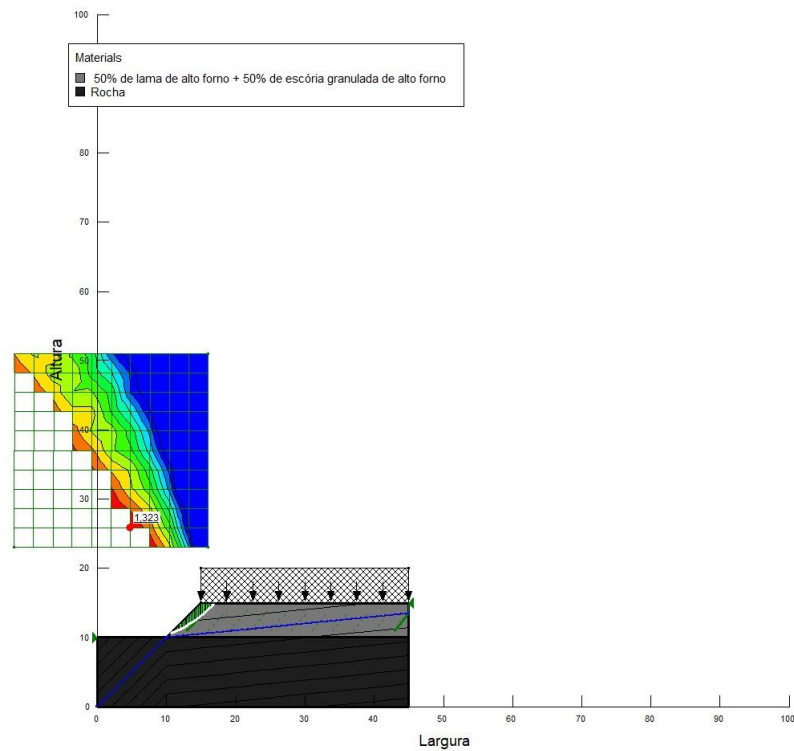


Figura 68 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,32 e ângulo de talude de 45°.

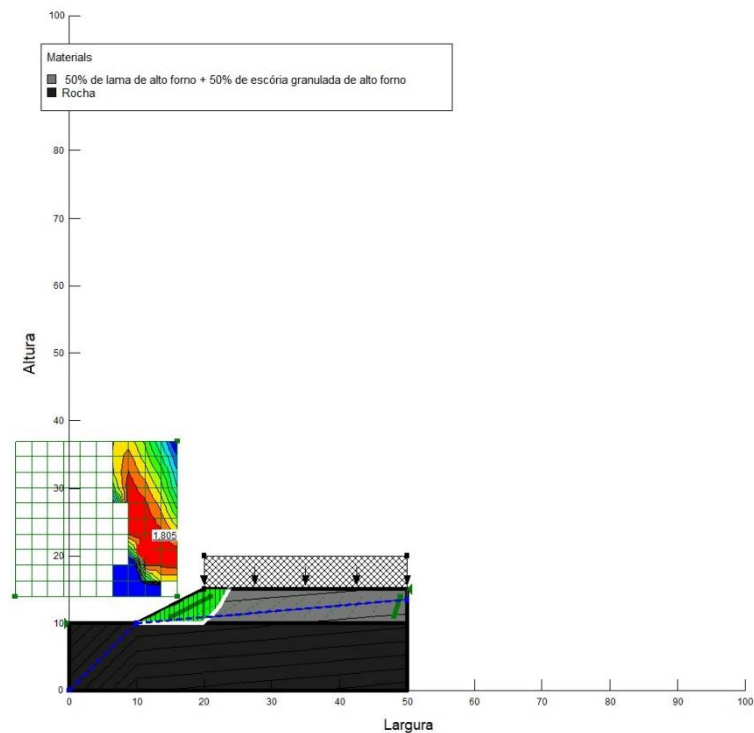


Figura 69 – Análise de estabilidade para amostra tipo 2, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,81 e ângulo de talude de 26,57°.

APÊNDICE C

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 3.

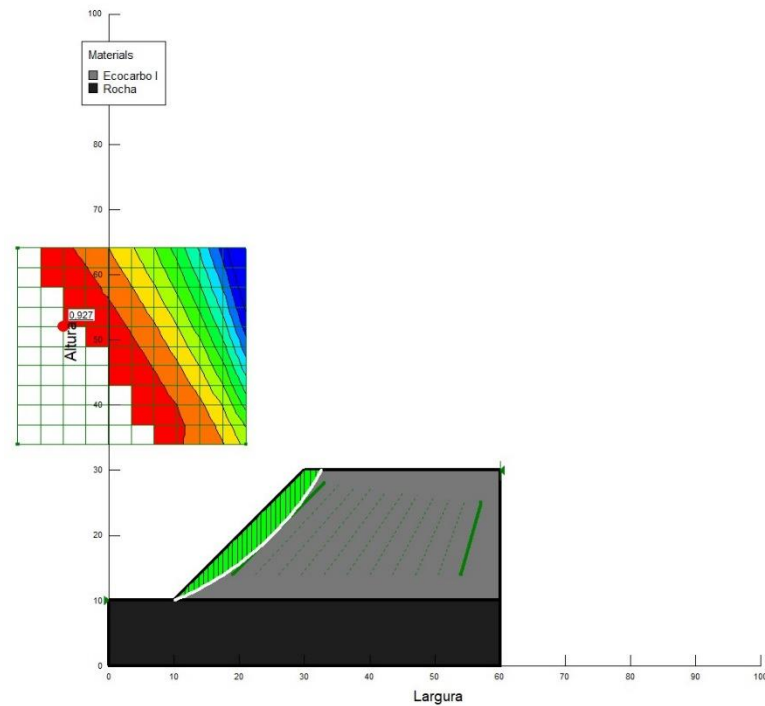


Figura 70 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 1, com fator de segurança de 0,97 e ângulo de talude de 45°.

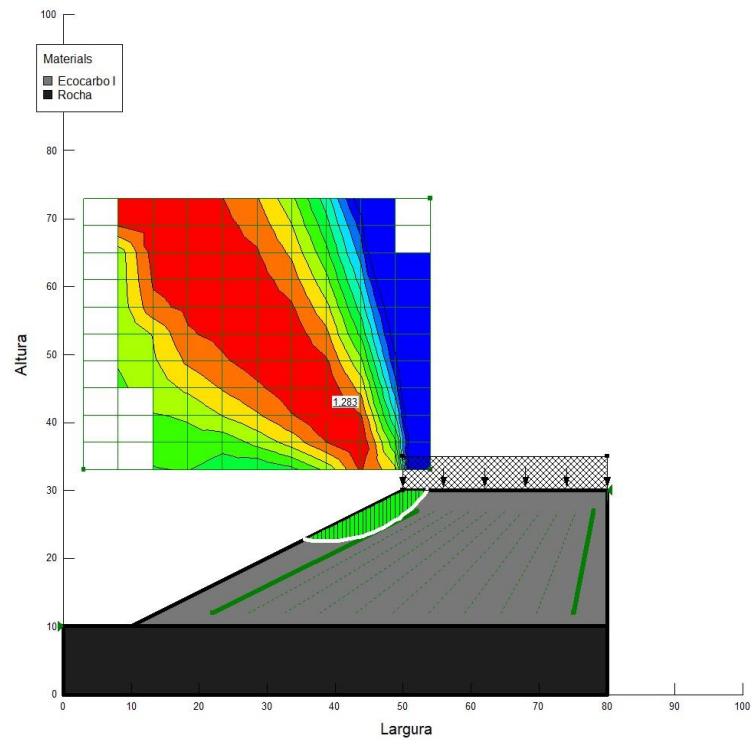


Figura 71 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 2, com fator de segurança de 1,28 e ângulo de talude de 26,57°.

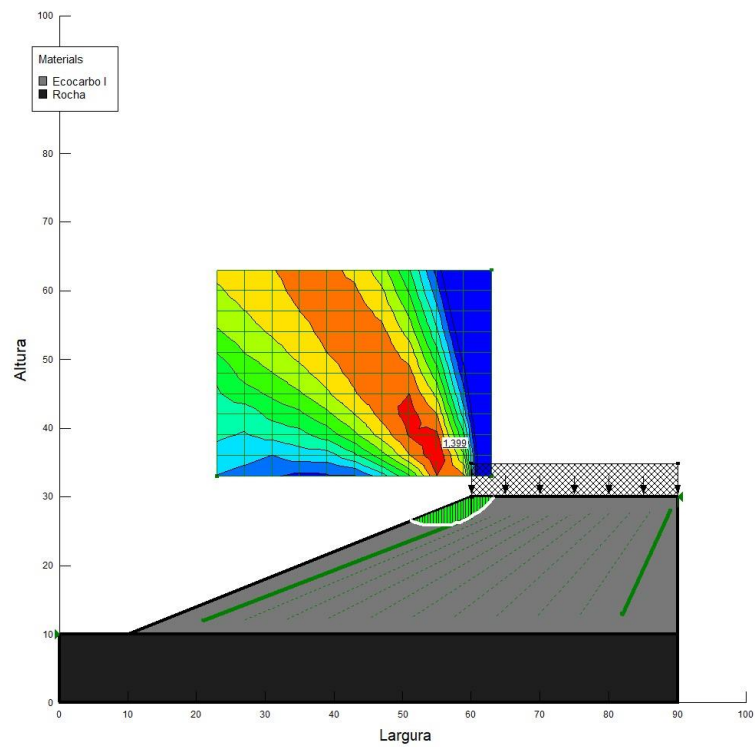


Figura 72 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 2, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 21,80°.

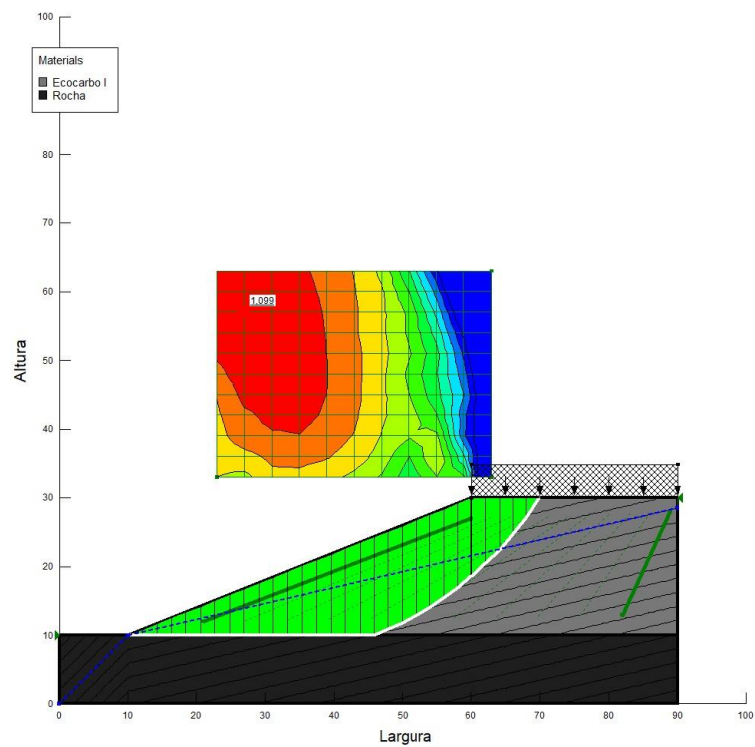


Figura 73 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,10 e ângulo de talude de 21,80°.

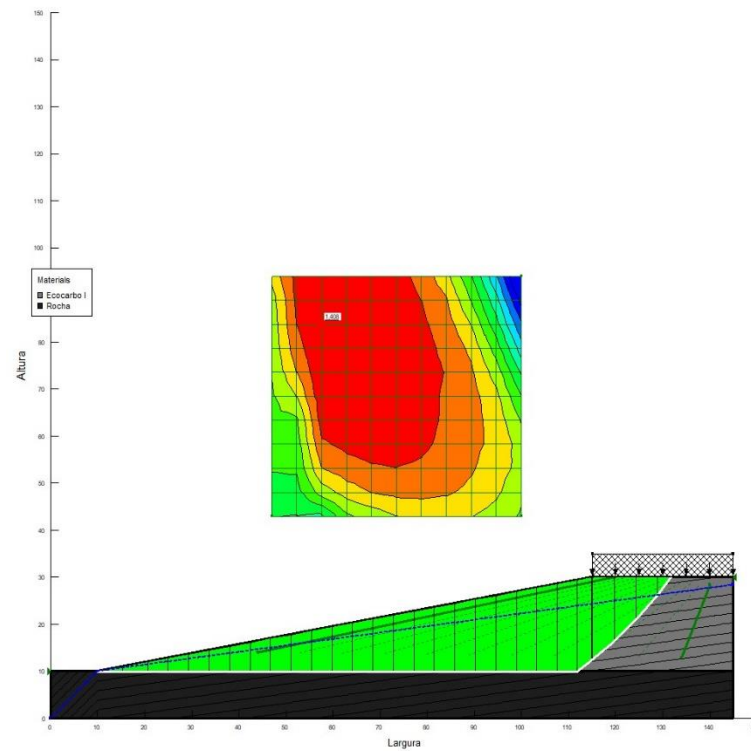


Figura 74 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,41 e ângulo de talude de 10,78°.

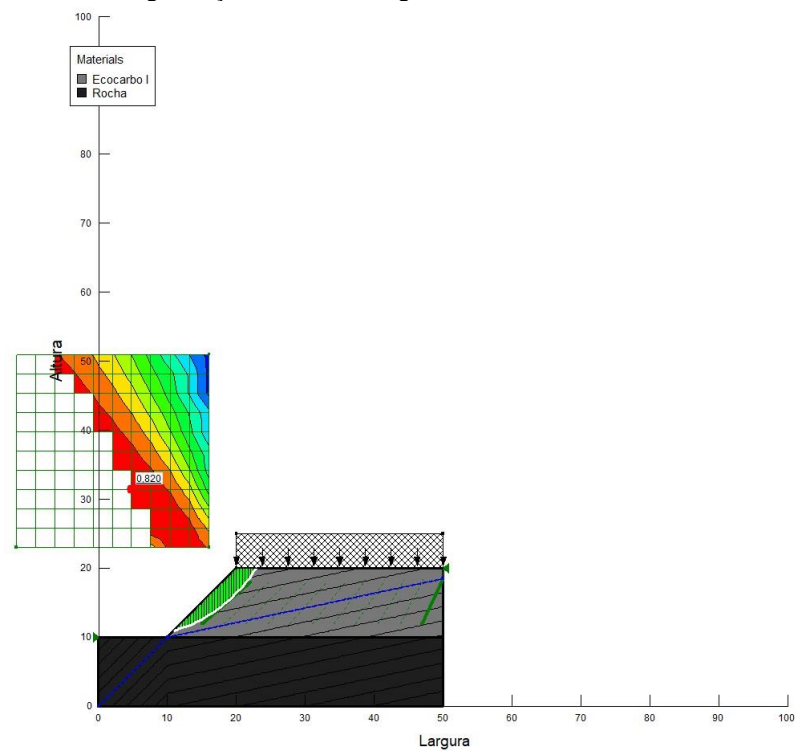


Figura 75 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 0,82 e ângulo de talude de 45°.

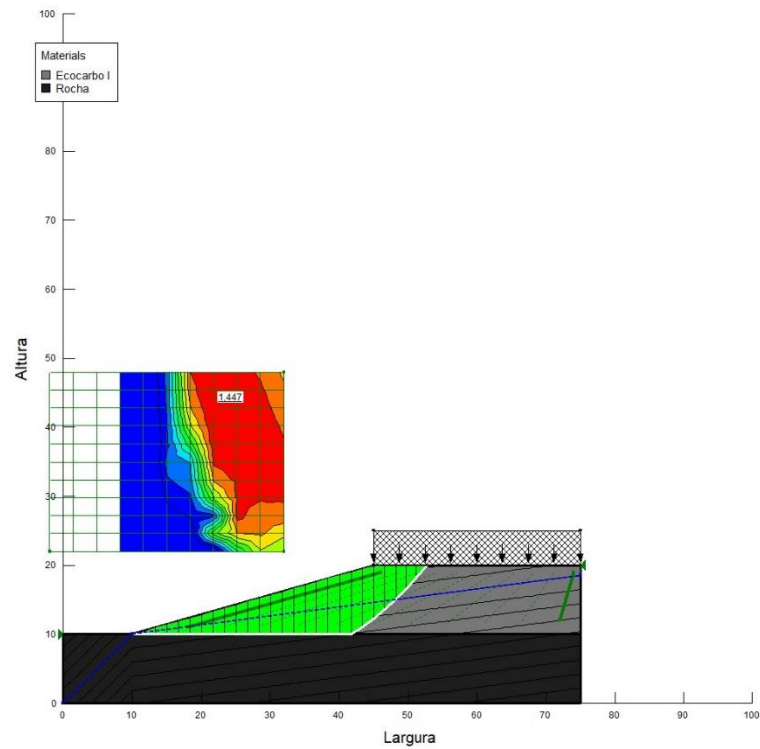


Figura 76 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,45 e ângulo de talude de 15,95°.

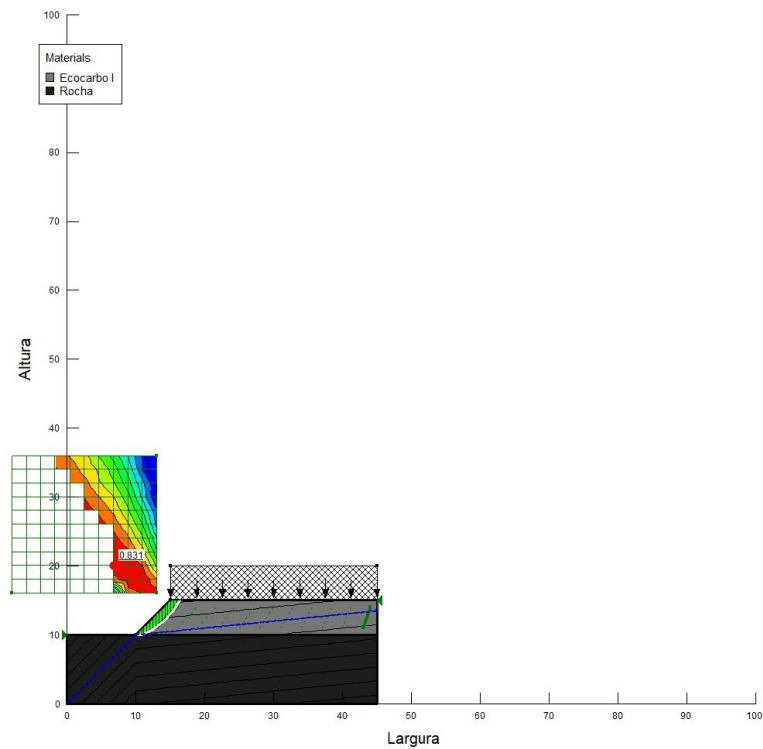


Figura 77 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,83 e ângulo de talude de 45°.

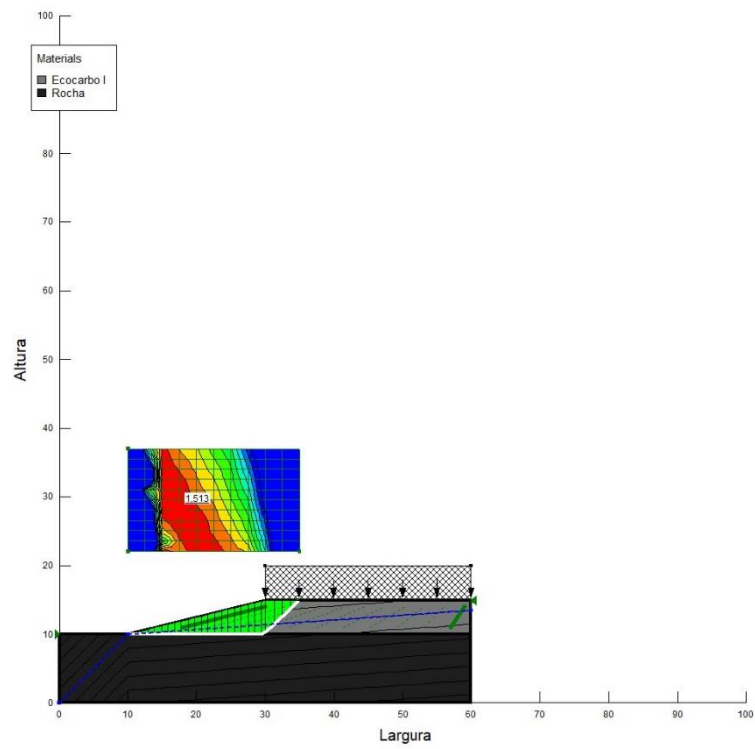


Figura 78 – Análise de estabilidade para amostra tipo 3, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,51 e ângulo de talude de 14,04°.

APÊNDICE D

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 4.

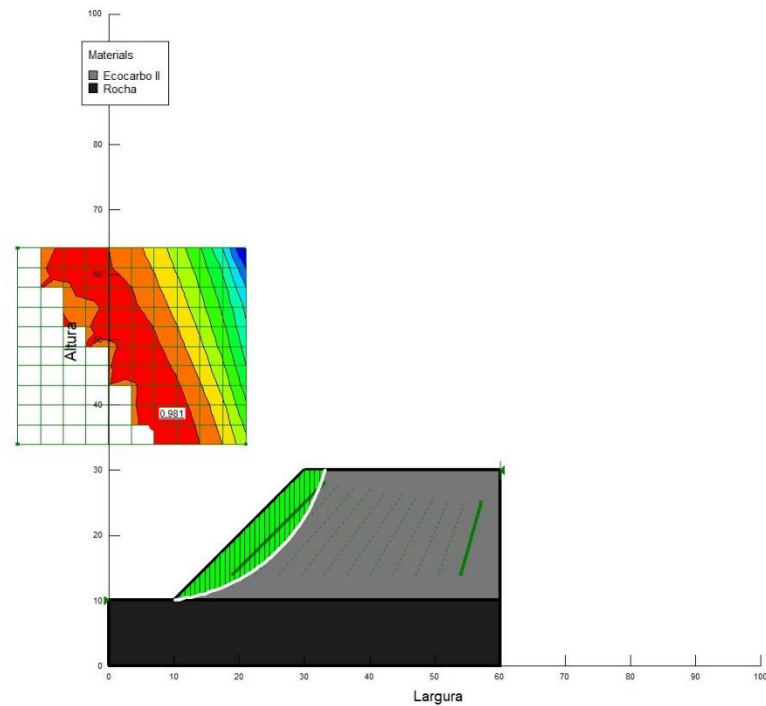


Figura 79 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 1, com fator de segurança de 0,98 e ângulo de talude de 45°.

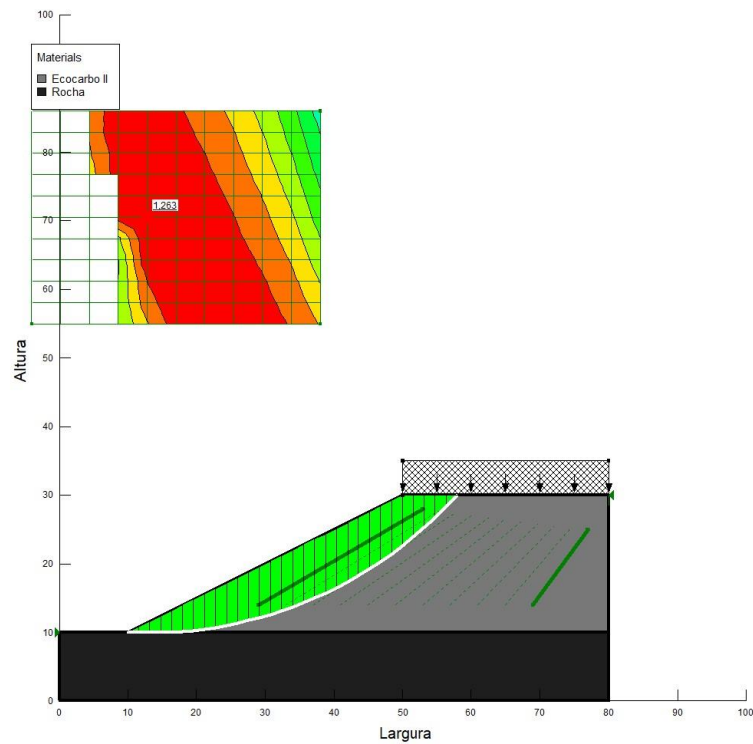


Figura 80 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,26 e ângulo de talude de 26,57°.

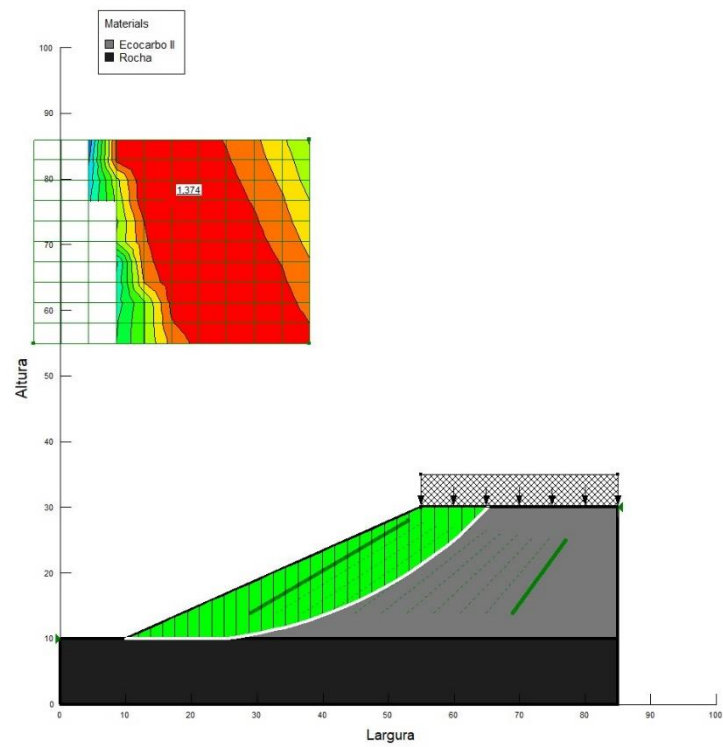


Figura 81 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,37 e ângulo de talude de 23,96°.

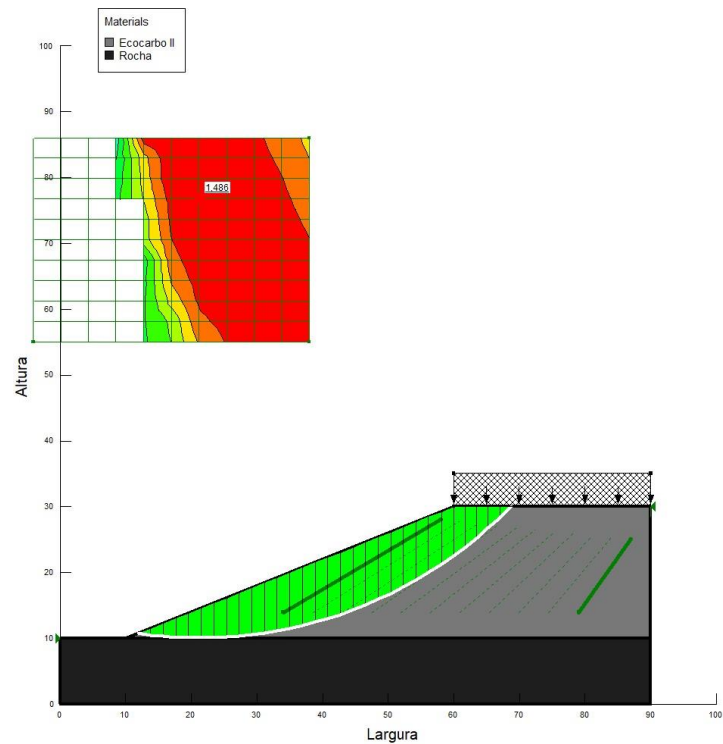


Figura 82 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 2, com fator de segurança de 1,49 e ângulo de talude de 21,80°.

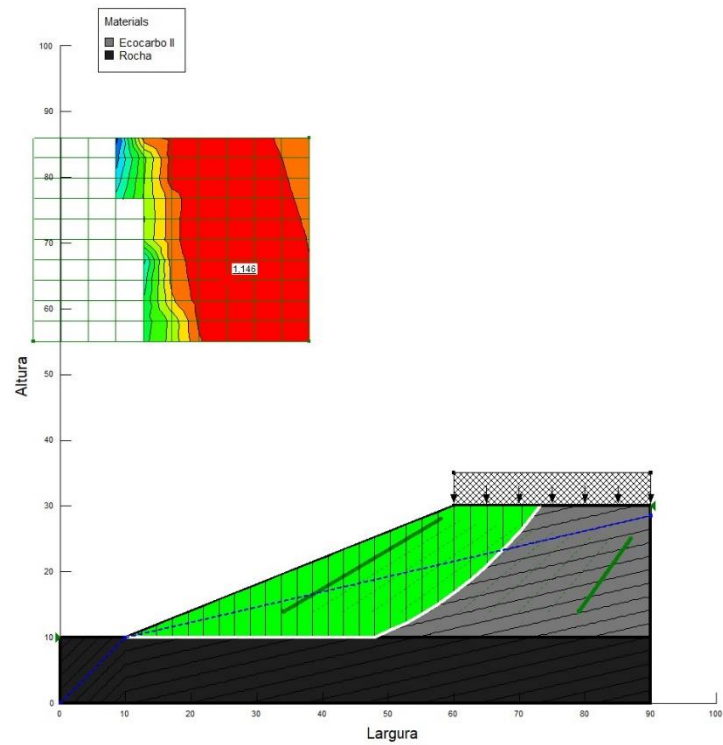


Figura 83 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,15 e ângulo de talude de 21,80°.

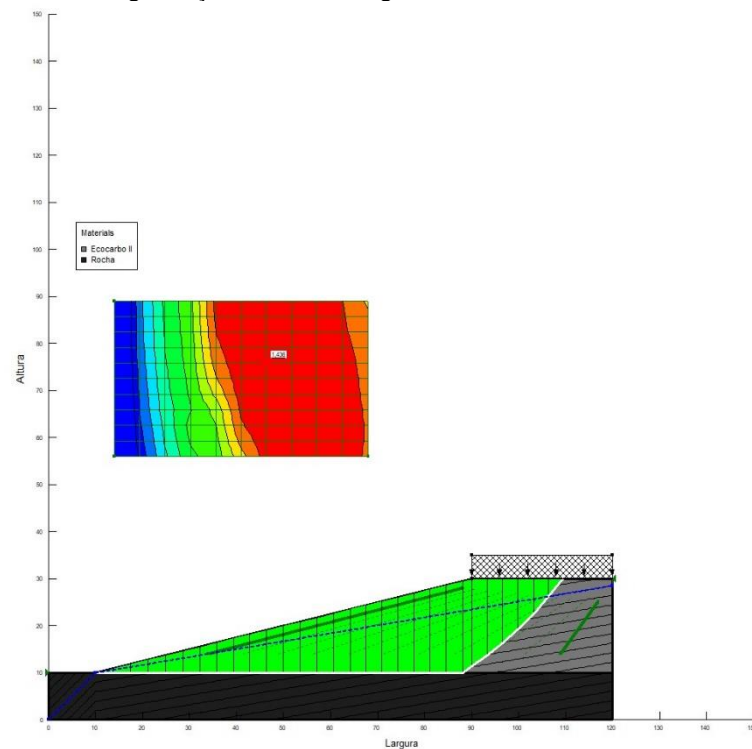


Figura 84 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,44 e ângulo de talude de 14,04°.

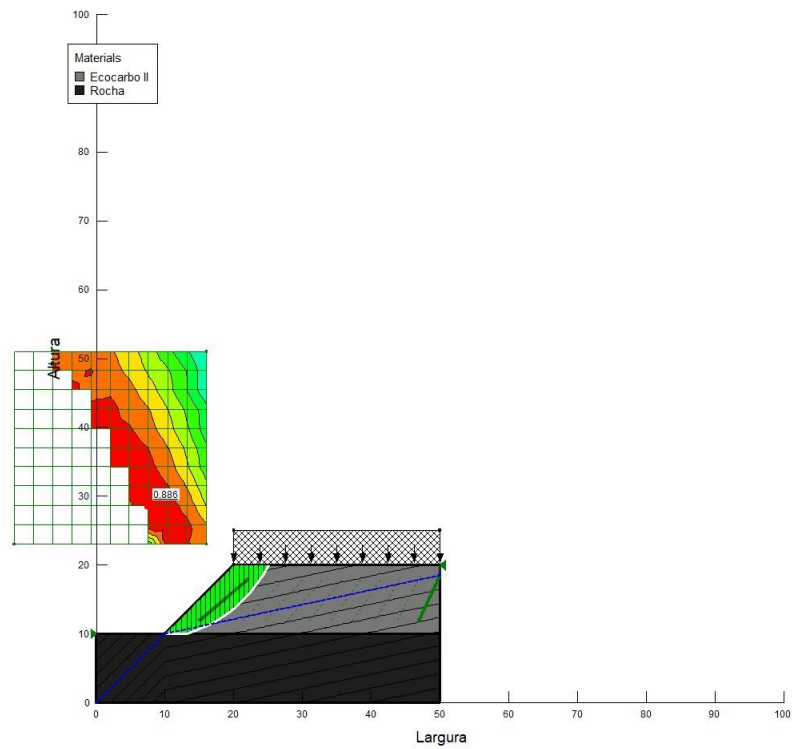


Figura 85 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 0,89 e ângulo de talude de 45°.

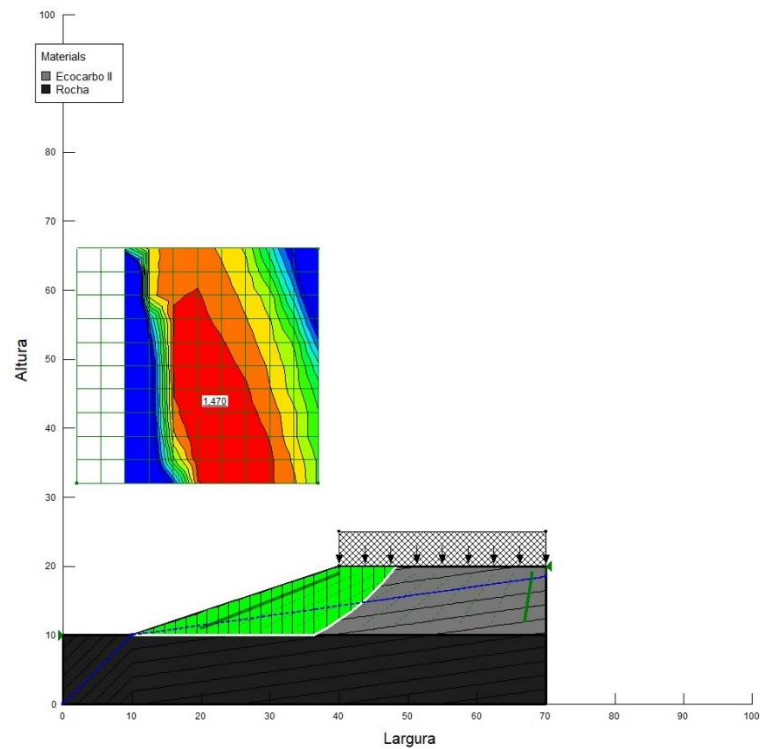


Figura 86 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,47 e ângulo de talude de 18,43°.

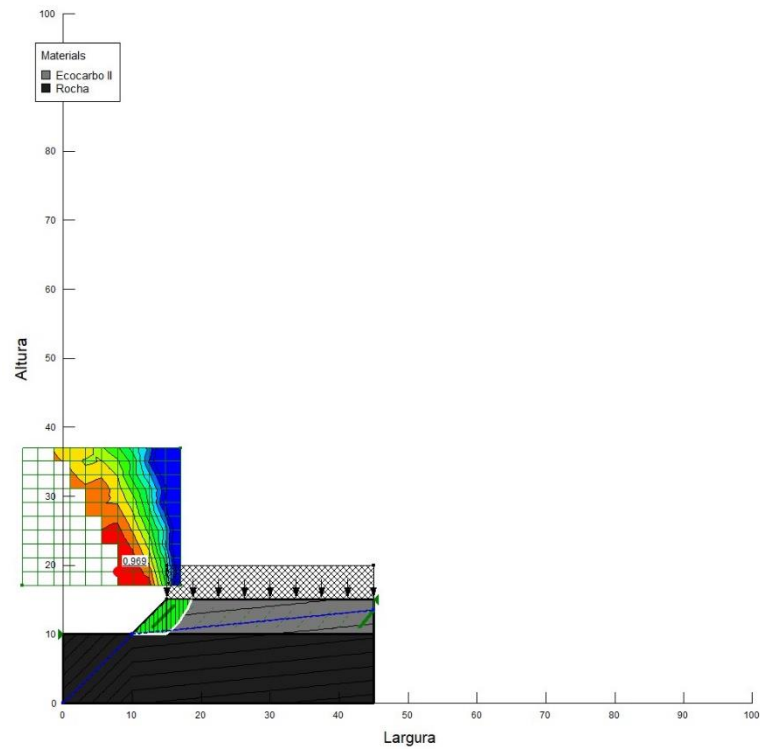


Figura 87 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,97 e ângulo de talude de 45°.

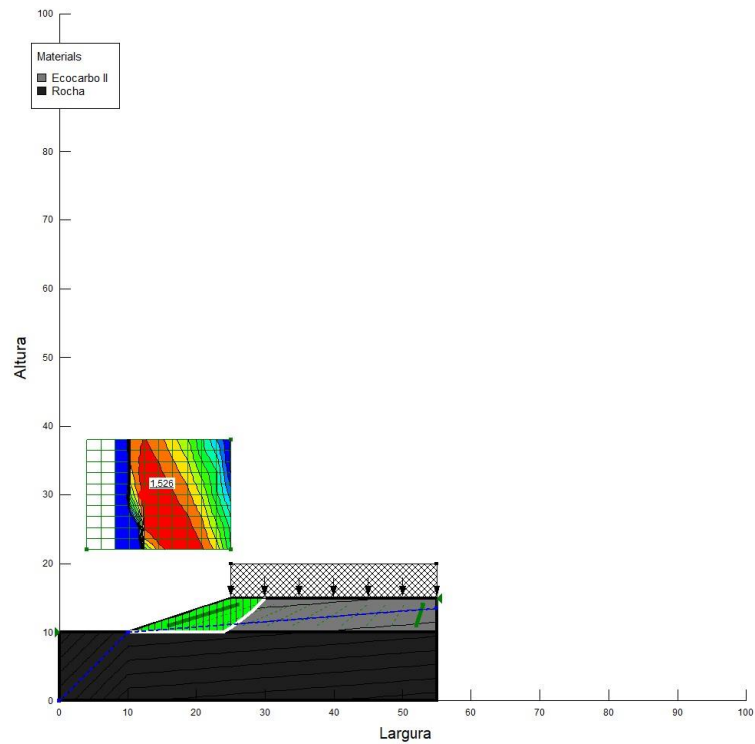


Figura 88 – Análise de estabilidade para amostra tipo 4, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,53 e ângulo de talude de 18,43°.

APÊNDICE E

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 5.

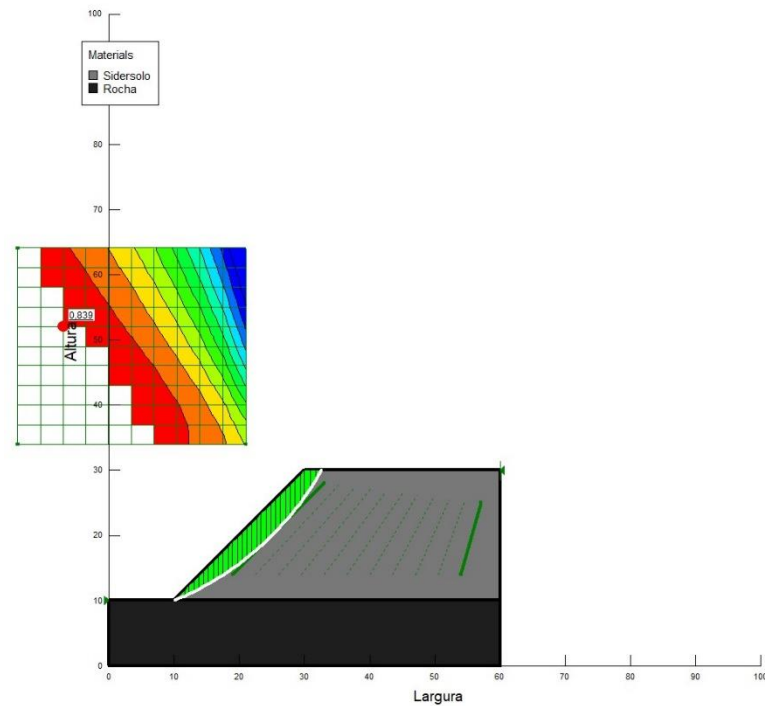


Figura 89 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 1, com fator de segurança de 1,84 e ângulo de talude de 45°.

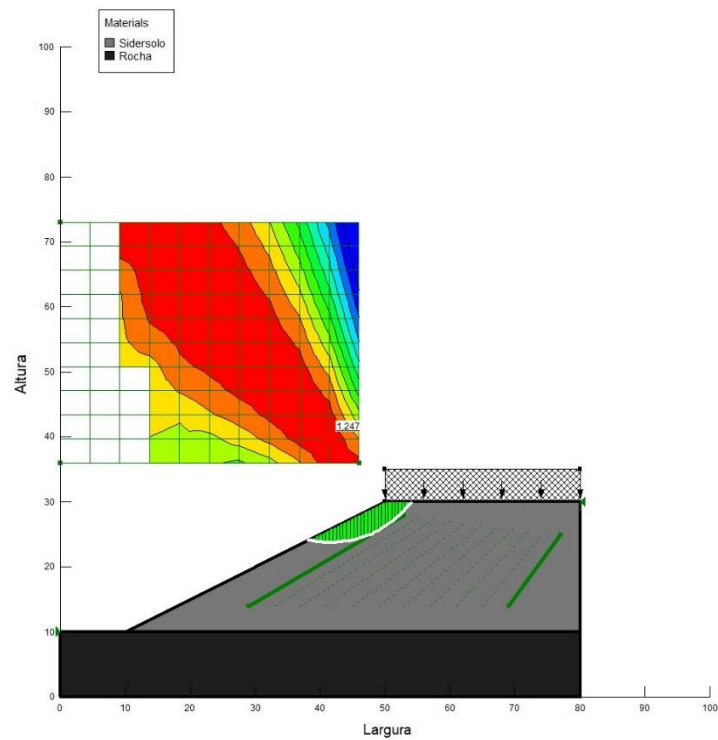


Figura 90 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,25 e ângulo de talude de 26,57°.

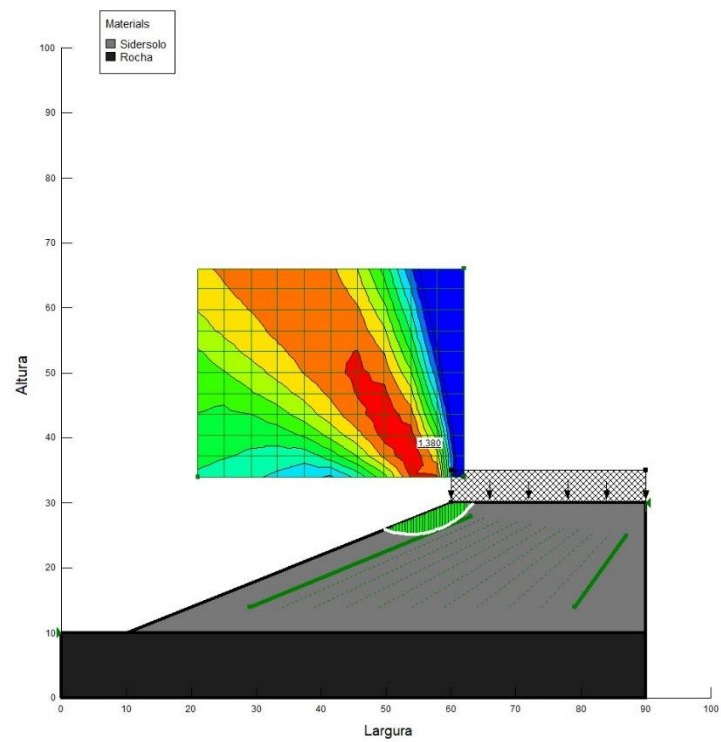


Figura 91 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,38 e ângulo de talude de 21,80°.

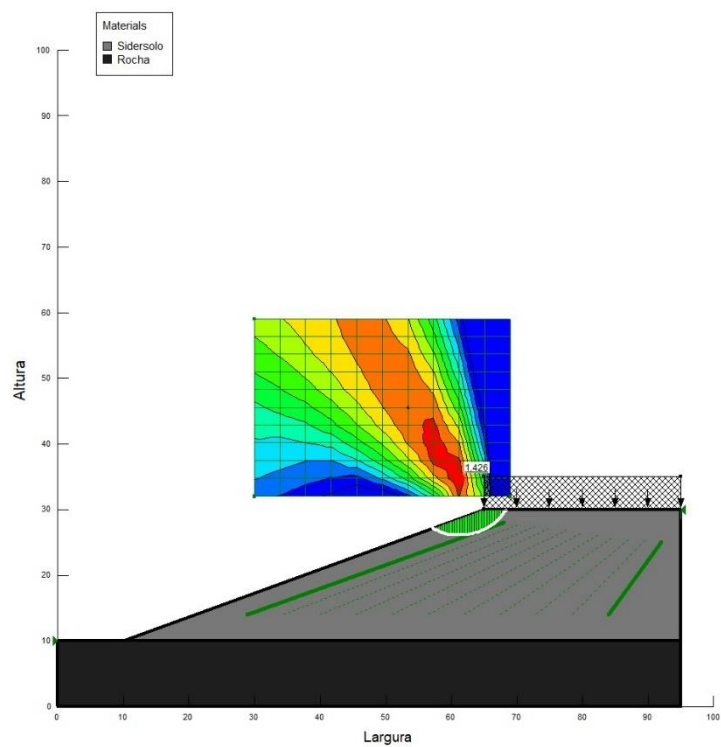


Figura 92 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 2, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 19,98°.

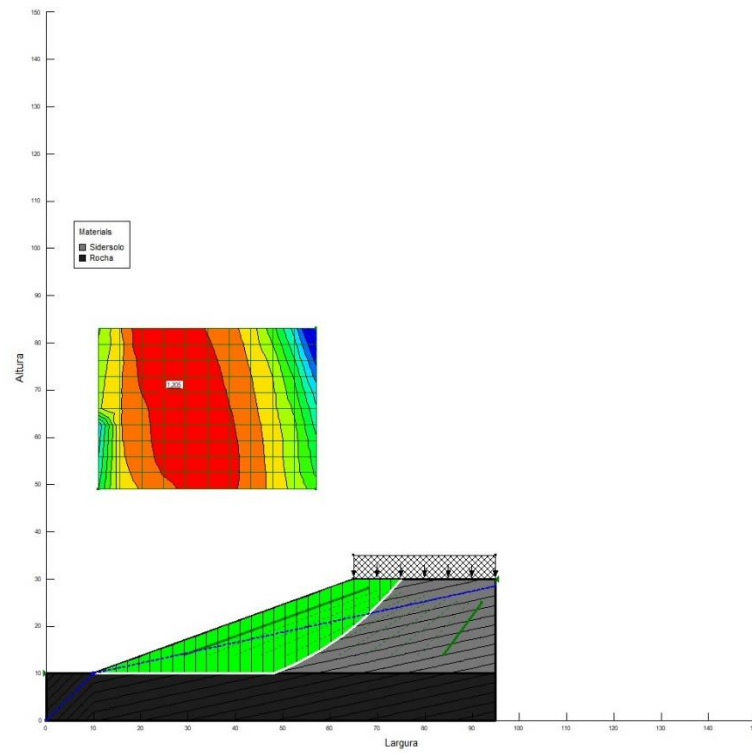


Figura 93 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,21 e ângulo de talude de 19,98°.

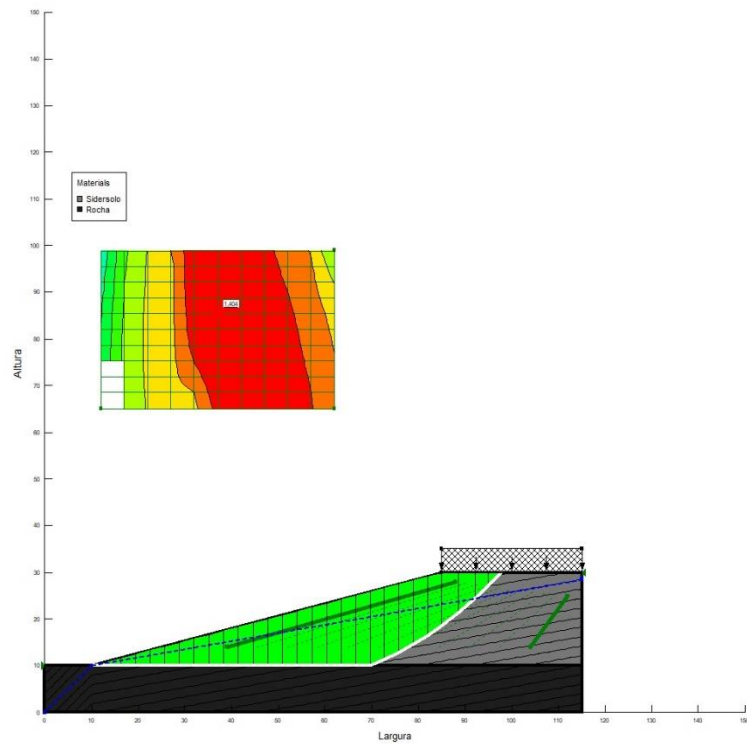


Figura 94 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 20 m, com fator de segurança de 1,40 e ângulo de talude de 14,93°.

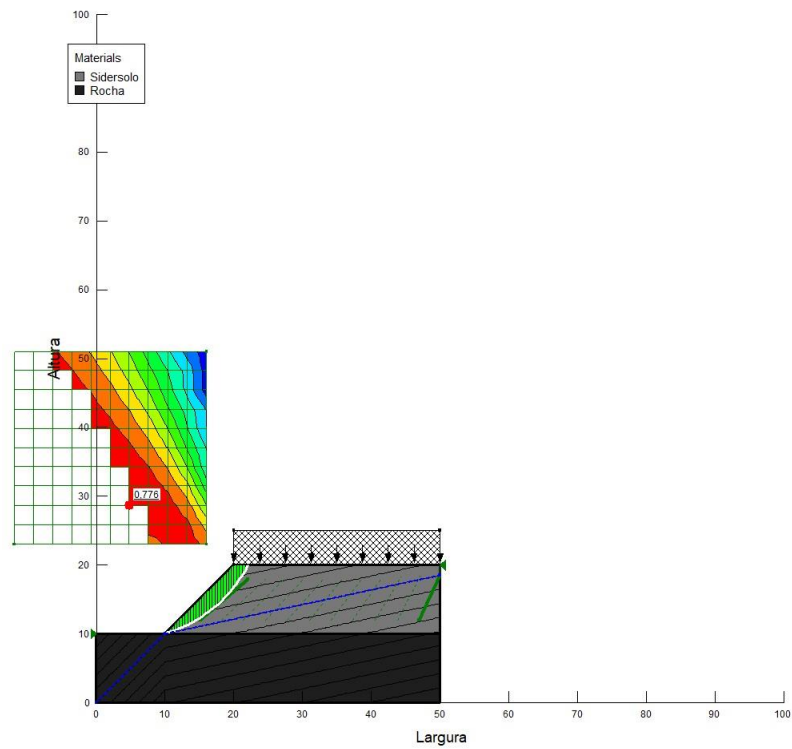


Figura 95 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura 10 m, com fator de segurança de 0,78 e ângulo de talude de 45°.

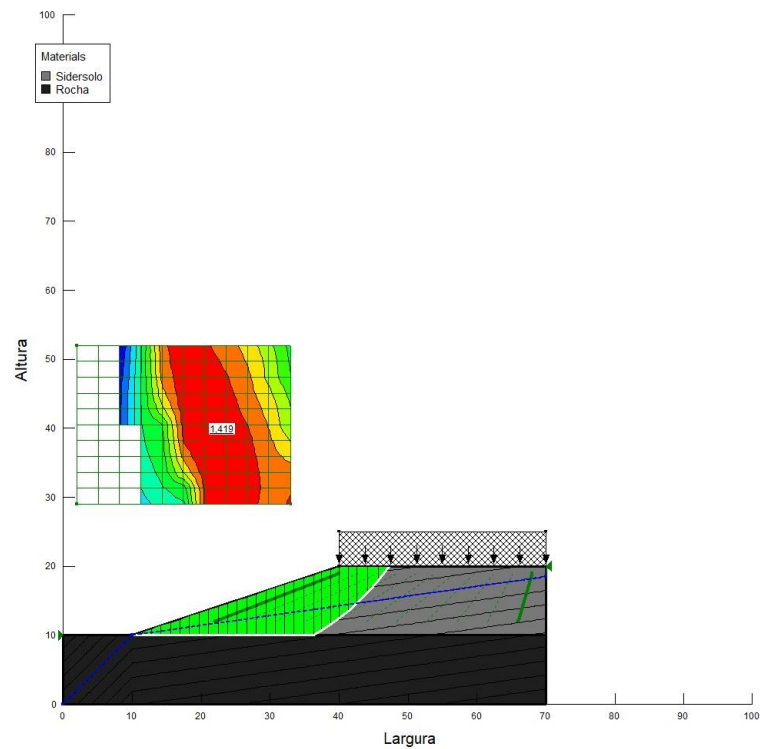


Figura 96 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 10 m, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 18,43°.

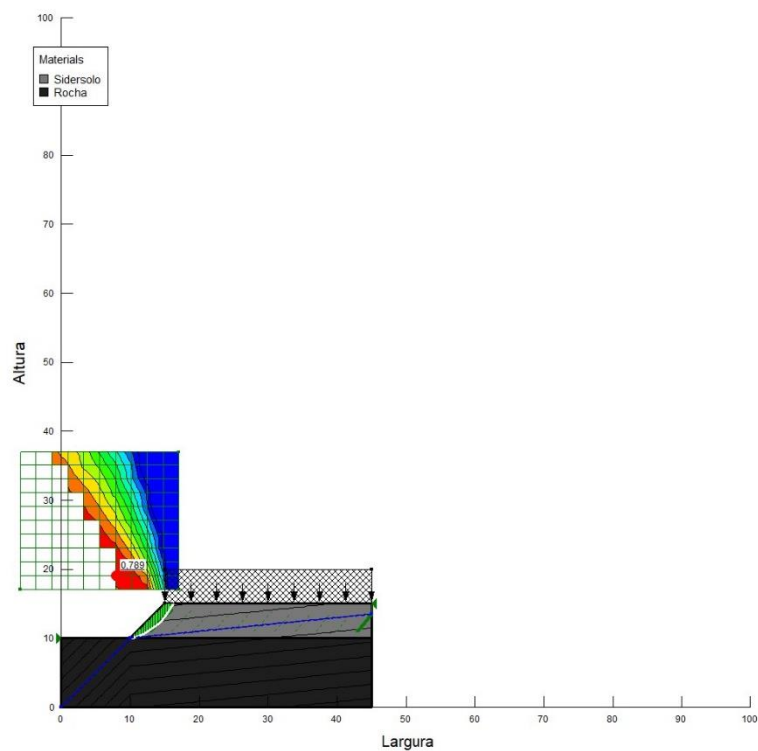


Figura 97 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 0,79 e ângulo de talude de 45°.

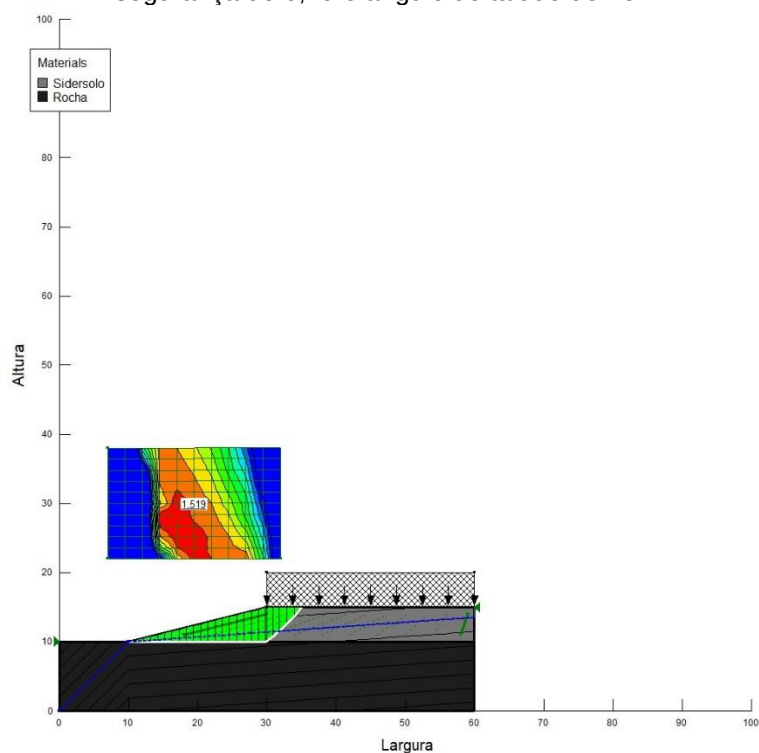


Figura 98 – Análise de estabilidade para amostra tipo 5, condição 3 e altura de 5 m, com fator de segurança de 1,52 e ângulo de talude de 14,04°.

APÊNDICE F

São apresentados neste apêndice as imagens da análise de estabilidade para a amostra 6.

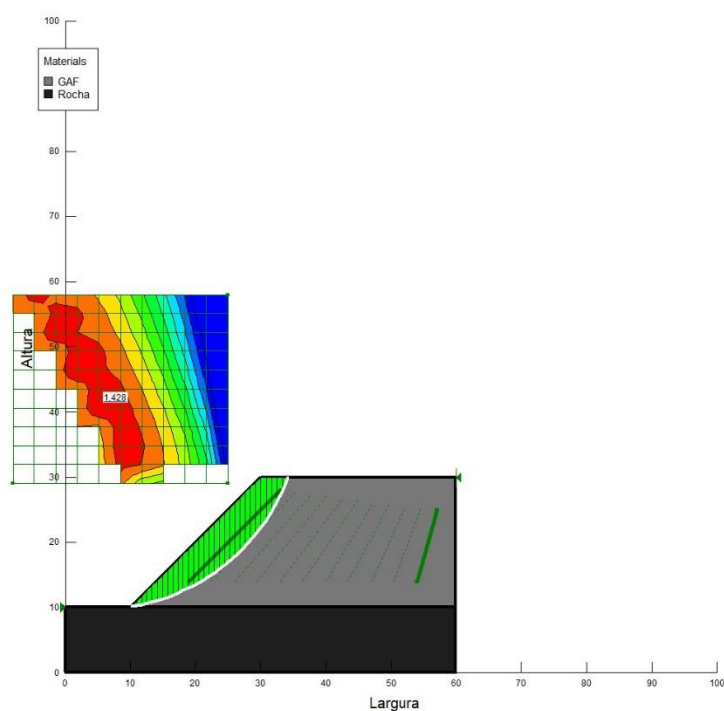


Figura 99 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 1, com fator de segurança de 1,43 e ângulo de talude de 45°.

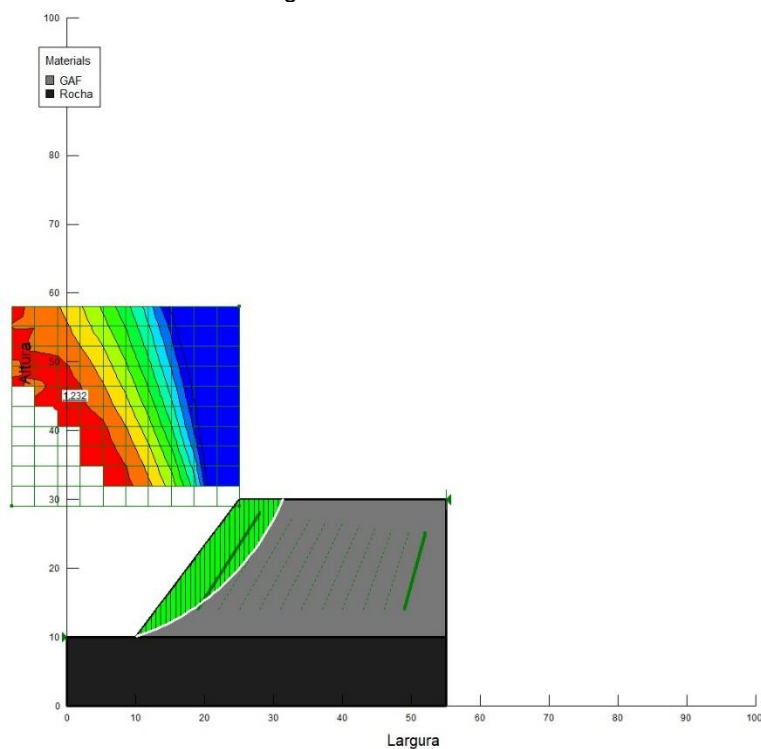


Figura 100 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 1, com fator de segurança de 1,22 e ângulo de talude de 53,13°.

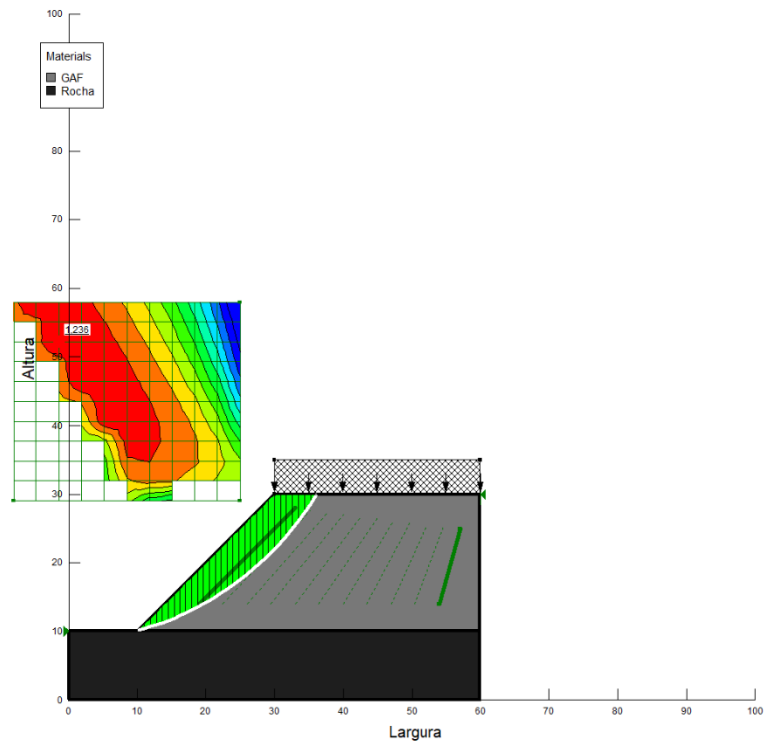


Figura 101 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 2, com fator de segurança de 1,24 e ângulo de talude de 45°.

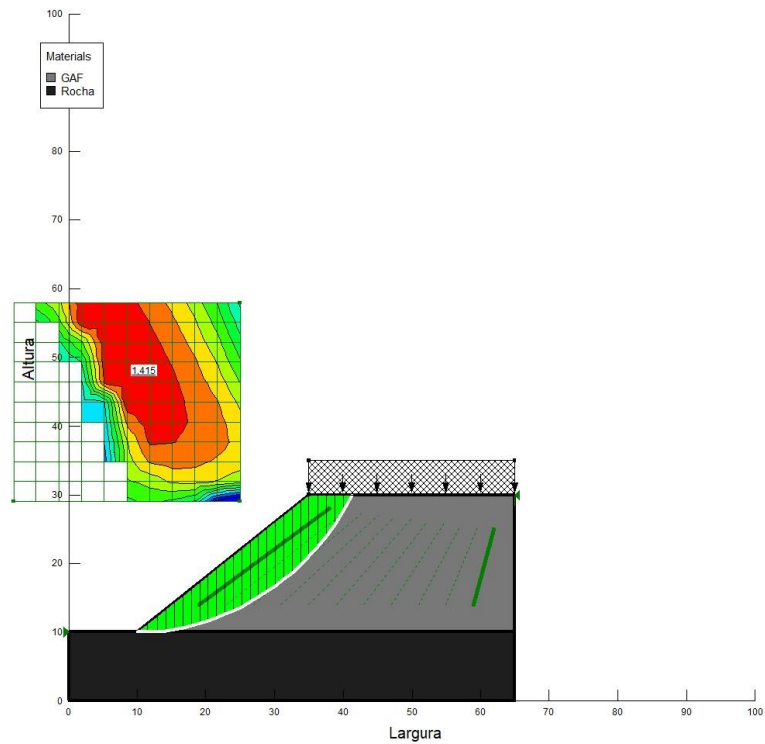


Figura 102 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 2, com fator de segurança de 1,42 e ângulo de talude de 38,66°.

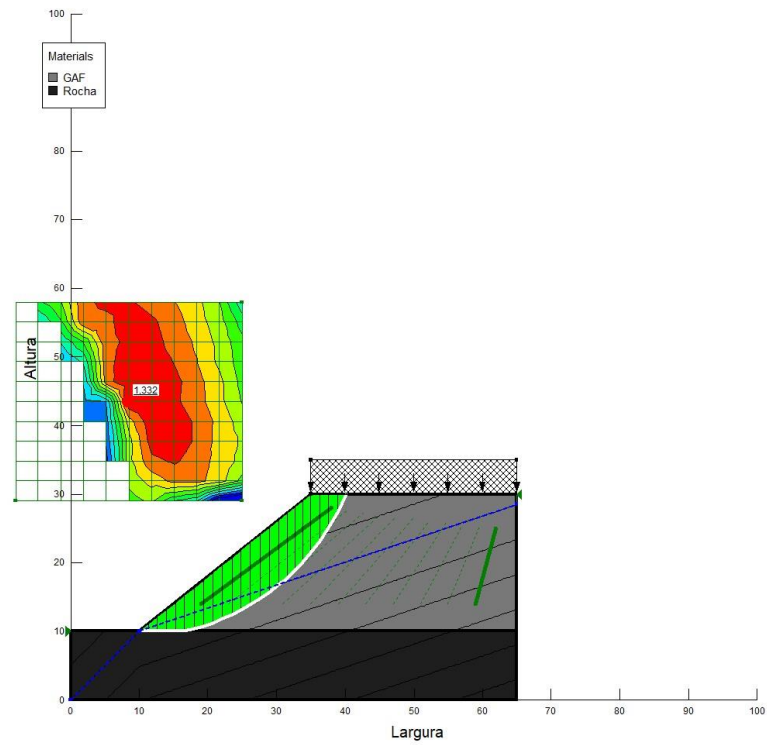


Figura 103 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 20 m, com fator de segurança de 1,33 e ângulo de talude de 38,66°.

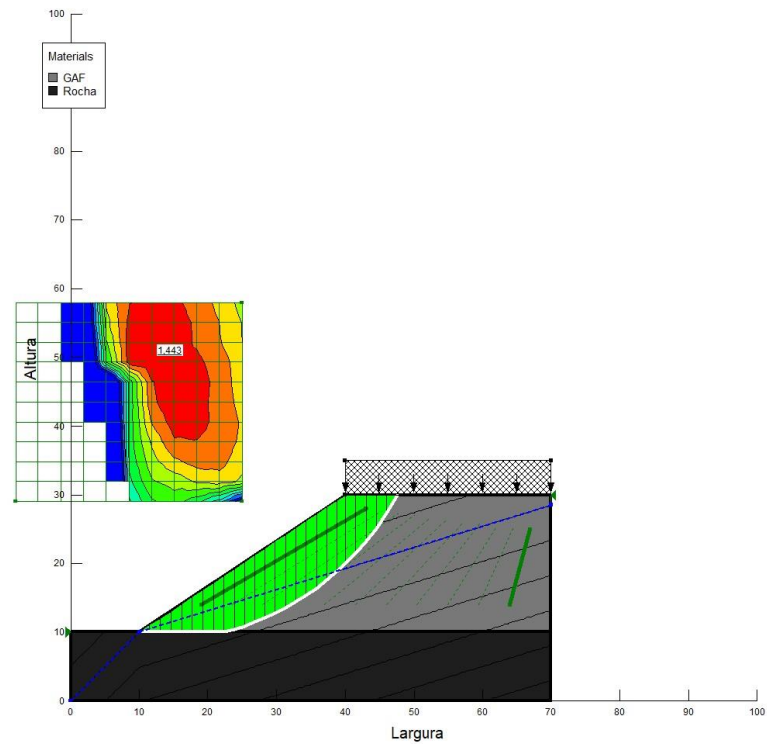


Figura 104 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 20 m, com fator de segurança de 1,44 e ângulo de talude de 33,69°.

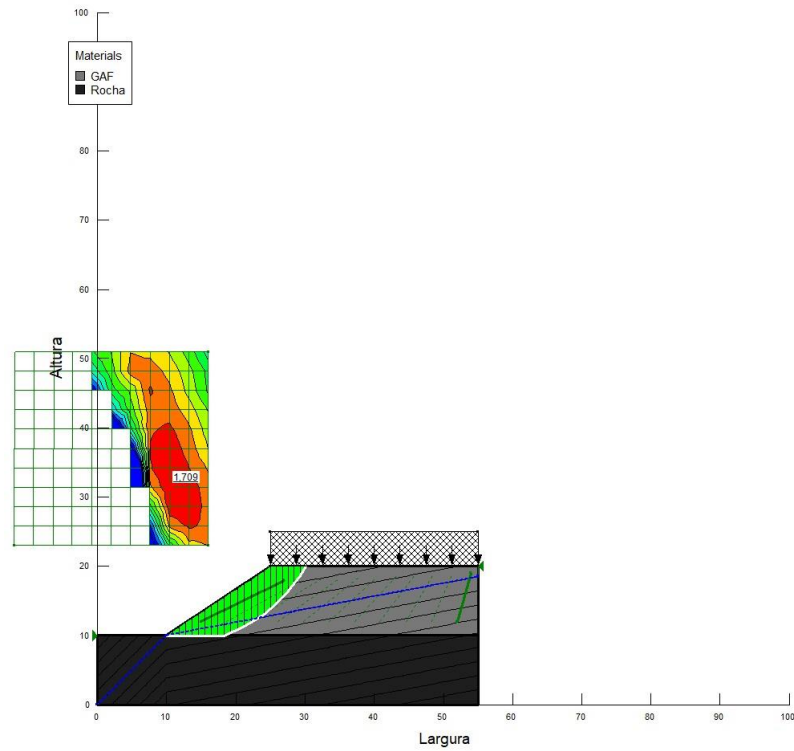


Figura 105 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 10 m, com fator de segurança de 1,71 e ângulo de talude de 33,69°.

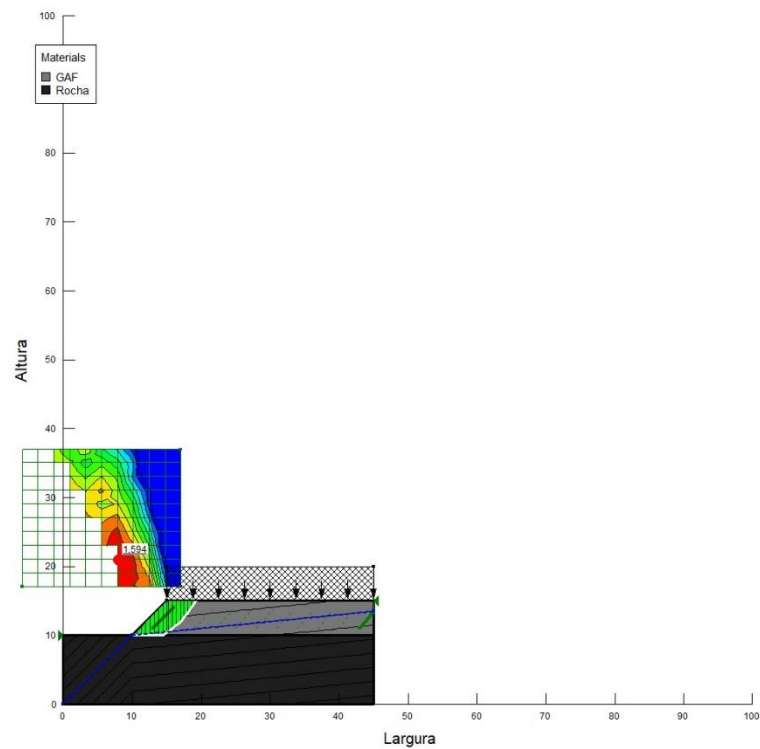


Figura 106 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 5 m, com fator de segurança de 1,59 e ângulo de talude de 45°.

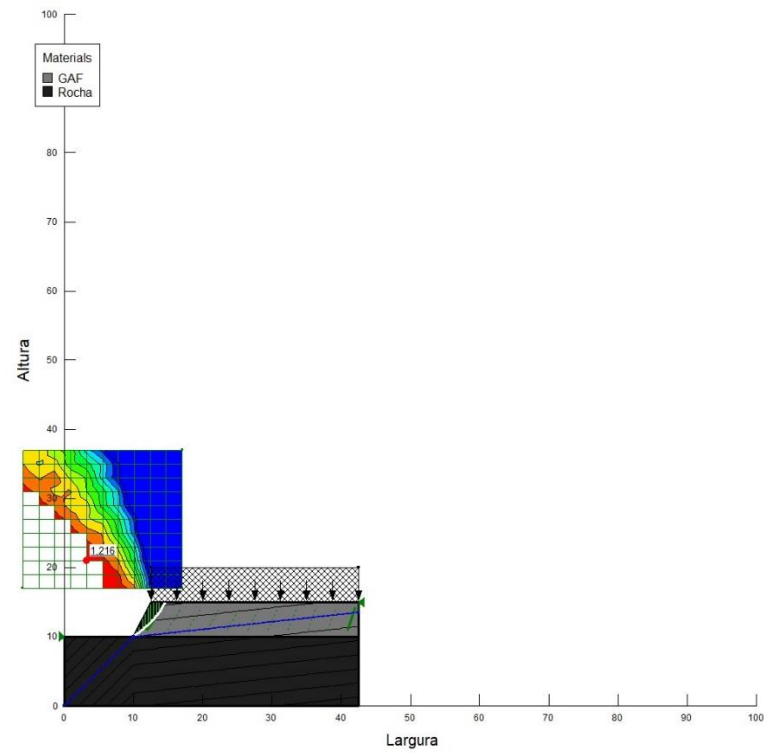


Figura 107 – Análise de estabilidade para amostra tipo 6, condição 3 e altura 5 m, com fator de segurança de 1,22 e ângulo de talude de 63,43°.