



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALISSON DOUGLAS MOTA DE LIMA

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO EM UMA BARRAGEM DE TERRA

Caruaru, julho de 2015

ALISSON DOUGLAS MOTA DE LIMA

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO EM UMA BARRAGEM DE TERRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil / Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Moura Soares

Caruaru, julho de 2015

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

L732a Lima, Alisson Douglas Mota de.
 Análise da estabilidade e fluxo em uma barragem de terra. / Alisson Douglas Mota de
 Lima. - Caruaru: O Autor, 2015.
 189f. : il. ; 30 cm.

 Orientador: José Moura Soares.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
 Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
 Inclui referências bibliográficas

 1. Barragens de terra. 2. Taludes - Estabilidade. 3. Geotecnia. 4. Rede de fluxo. I.
 Soares, José Moura. (Orientador). II. Título

620 CDD (23. ed.)
UFPE (CAA 2015-126)

Alisson Douglas Mota de Lima

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO EM UMA BARRAGEM DE TERRA

Proposta de trabalho a ser apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Geotecnia
Orientador: Prof.Dr. José Moura Soares

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Moura Soares

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof^a. Dra. Analice França Lima Amorim

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof^a. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof^a. Dra. Sylvana Melo dos Santos

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenadora da disciplina)

“Aquele que se exaltar será humilhado, e aquele que se humilhar será exaltado.”

Lucas 14:11

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida, minha vida e de todos familiares e amigos, sem Ele não haveria razão de viver e eu não teria chegado até aqui. Agradeço à todos os antigos amigos que sempre acreditaram em mim e estavam torcendo e orando por mim, pelo meu sucesso, agradeço também aos novos amigos que fiz durante a graduação que de uma forma ou de outra participaram da minha jornada acadêmica.

A todos familiares que sempre me apoiaram direta ou indiretamente nesta caminhada de cinco anos e meio. Aos meus pais Arivonaldo e Célia e minha irmã Társila que sempre estiveram comigo me dando todo suporte que necessitei e à Jayne que vivenciou comigo todos os momentos bons e ruins e esteve comigo em todos estes momentos. A todos vocês, meu muito obrigado.

Não podia deixar de lembrar e homenagear aqueles que infelizmente não estão mais ao nosso lado, mas estão ao lado do meu querido Deus. Minha querida amiga Ada Milena, meu amigo e irmão Everaldo e minha avó Edite, gostaria que estivessem aqui para poder abraça-los neste momento que é tão importante para mim.

Agradeço ao governo federal pela criação do campus do Agreste, sem dúvidas foi um facilitador, já que se deslocar para a capital não traria a facilidade que é estudar na própria cidade onde moro e também estudar numa das mais importantes e conceituadas universidades do Brasil, me proporcionando a conquista de me tornar engenheiro civil.

Por fim, agradeço a todos os professores que participaram da minha caminhada, pelos ensinamentos passados, pelas orientações, conversas, conselhos, especialmente ao meu professor orientador José Moura Soares pela oportunidade de fazer um trabalho onde me identifiquei, e na área onde pretendo seguir carreira.

RESUMO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO EM UMA BARRAGEM DE TERRA

Uma barragem tem função de represar água, porém é inevitável que barragens de terra impeçam completamente a passagem da água sobre o seu maciço, desta forma, a água percola sobre o corpo da barragem atravessando todo seu comprimento de montante à jusante. Este tipo de barragem objetiva minimizar o fluxo que a atravessa de forma que não comprometa financeira ou ambientalmente o local à jusante. A partir da análise da rede de fluxo e de posse da linha freática, é possível determinar regiões de solos saturados, e com isso, o cálculo do fator de segurança quando à estabilidade dos taludes se torna viável no objeto de assegurar que a barragem não se romperá em nenhuma das três fases de análise (final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido). Este trabalho analisa a rede de fluxo e todos seus elementos, assim como o fator de segurança da estabilidade dos taludes em uma barragem de terra homogênea, e para isso, foi utilizado o método das diferenças finitas para solução da equação de Laplace que governa o fluxo bidimensional ou tridimensional aplicando juntamente com a equação da continuidade e a Lei de Darcy para fluxo em meios porosos. Conhecendo as variáveis do problema como permeabilidades horizontal e vertical, e a geometria da barragem, com os conhecimentos necessários para definição das condições de contorno, e ferramentas computacionais apropriadas, é possível solucionar o problema de rede de fluxo numa barragem de terra em diversas situações de nível de d'água, tipos de filtro e mudança de materiais além da análise de estabilidade dos taludes nas três fases de análise. Os resultados encontrados mostraram que existe uma boa aproximação dos resultados encontrados nas planilhas elaboradas neste trabalho em comparação com os resultados obtidos no SLOPE/W.

Palavras-chave: Barragem de terra, Rede de fluxo, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SLOPE STABILITY AND FLOW ON AN EARTH DAM

Dams have the purpose of embanking water, but it is inevitable earth dams completely prevent the water flow through its structure. As a result, water percolates throughout the dam body from upstream to downstream. This type of dam has the purpose of minimising the flow that crosses so that it would not compromise the upstream sites in terms of economic and environmental matters. From the flow net analysis and with the acknowledge of the groundwater table it is possible to determine regions of saturated soils. The calculations for the factors of safety regarding to the embankments stability become feasible in order to assure the dam will not collapse in any of the stages of analysis (construction completion, full reservoir and rapid emptying). The present paper analyses the net flow and all its elements, such as the factor of safety for the embankments stability on a homogeneous earth dam and to accomplish that the Finite Difference Method had to be utilised in order to promote solutions to Laplace's equation which governs the two- or tri-dimensional flow together with the continuity equation and Darcy's law for flow in porous media. Understanding the variables of the problem as horizontal and vertical permeability as well as the dam geometry and appropriate computational tools, it is possible to solve the problem of flow nets on a earth dam in diverse situations of water level, filter types and change in materials. Furthermore, the results have shown that there is a good approximation of the results found in elaborated spreadsheets in comparison with the outputs generated on SLOPE/W

Key-words: Earth dams, Flow nets, Slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço de regularização.....	23
Figura 2 - Exemplo de barragem homogênea, Barragem Vigário, Brasil.....	24
Figura 3 - Exemplo de barragem de seção Zoneada, Barragem de São Simão, Brasil..	24
Figura 4 - Disposições dos filtros nas barragens.....	25
Figura 5 - Fatores de segurança..	29
Figura 6 - Análise de estabilidade por meio do método comum das fatias: superfície de ruptura tentativa.....	30
Figura 7 - Análise de estabilidade por meio do método comum das fatias: forças atuantes na n-ésima fatia.....	30
Figura 8 - Elementos de Fluxo numa Barragem..	33
Figura 9 - Escoamento em regime permanente.....	34
Figura 10 - Esquema de análise de um sistema físico idealizado como contínuo.....	37
Figura 11 - Molécula de diferenças finitas.....	41
Figura 12 - Molécula de diferenças finitas com impermeabilidade em uma direção.....	43
Figura 13 - Molécula de diferenças finitas com impermeabilidade em duas direções.....	44
Figura 14 – Geometria da barragem.....	45
Figura 15 - Contornos irregulares..	45
Figura 16 - Condições de contorno de uma barragem. a) Caso 1; b) Caso 2 e 4; c) Caso 3....	47
Figura 17 - Solução de Casagrande para estimativa da linha freática.....	48
Figura 18 - Barragem com as dimensões horizontais reduzidas (dimensões em metros).....	49
Figura 19 - Construção da linha freática. a) Solução da linha freática; b) condição do talude de jusante.....	50
Figura 20 - Solução para a linha freática para o primeiro caso.....	51
Figura 21 - Determinação no comprimento do filtro tipo tapete.....	51
Figura 22 – Solução para a linha freática para o segundo caso.....	52
Figura 23 - Solução para a linha freática para o terceiro caso.....	53
Figura 24 - Solução para a linha freática para o quarto caso..	53

Figura 25 – Habilitar cálculo iterativo no Excel.....	55
Figura 26 - Traçado da linha freática no Excel.....	56
Figura 27 - Superfície de ruptura superficial.....	58
Figura 28 - Superfície de ruptura profunda.....	58
Figura 29 – Nova conformação da linha freática.....	60
Figura 30 - Tabela para determinação do fator de segurança para fase final de construção pelo método de Bishop-Simplificado.....	61
Figura 31 - Tabela para determinação do fator de segurança para fase reservatório cheio pelo método de Bishop-Simplificado.....	62
Figura 32 – Tabela para determinação do fator de segurança para fase esvaziamento rápido pelo método de Bishop-Simplificado.....	64
Figura 33 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 1).....	66
Figura 34 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	66
Figura 35 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 1).....	67
Figura 36 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	67
Figura 37 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 1)....	68
Figura 38 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	68
Figura 39 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 1).....	69
Figura 40 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	69
Figura 41 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 1).....	70
Figura 42 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	70
Figura 43 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 1).....	71
Figura 44 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 1).....	71
Figura 45 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 2).....	72
Figura 46 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	72
Figura 47 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 2).....	73
Figura 48 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	73
Figura 49 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 2).....	74

Figura 50 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	74
Figura 51 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 2).....	75
Figura 52 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	75
Figura 53 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 2).....	76
Figura 54 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	76
Figura 55 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 2).....	76
Figura 56 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 2).....	77
Figura 57 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 3).....	77
Figura 58 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	78
Figura 59 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 3).....	78
Figura 60 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	79
Figura 61 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 3).....	79
Figura 62 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	80
Figura 63 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 3).....	80
Figura 64 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	80
Figura 65 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 3).....	81
Figura 66 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	81
Figura 67 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 3).....	82
Figura 68 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 3).....	82
Figura 69 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 4).....	83
Figura 70 - Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	83
Figura 71 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 4).....	84
Figura 72 - Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	84
Figura 73 - Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 4).....	85
Figura 74 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	85
Figura 75 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 4).....	86
Figura 76 - Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	86
Figura 77 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 4).....	87
Figura 78 - Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	87

Figura 79 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 4).....	88
Figura 80 - Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 4).....	88
Figura 81 - Resultado de menor FS para a fase final de construção.....	91
Figura 82 - Resultado do menor fator de segurança para fase final de construção obtido do SLOPE/W.....	92
Figura 83 - Resultado de menor FS para a fase reservatório cheio.....	93
Figura 84 – Resultado do menor fator de segurança para fase reservatório cheio obtido do SLOPE/W.....	94
Figura 85 - Resultado de menor FS para a fase esvaziamento rápido.....	94
Figura 86 - Resultado do menor fator de segurança para fase esvaziamento rápido obtido do SLOPE/W.....	95
Figura 87 - Curvas de isofatores (fase final de construção).....	97
Figura 88 - Curvas de isofatores (fase reservatório cheio)....	97
Figura 89 - Curvas de isofatores (fase esvaziamento rápido)....	98
Figura A1 – Units and Scale (Unidades e escala)....	101
Figura A2 - Set Units and Scale (Definir unidades e escala)....	101
Figura A3 - Grid (Grade)....	102
Figura A4 – Draw Lines (Desenhar linhas)....	102
Figura A5 - Desenho da barragem... ..	103
Figura A6 - Materials (Materiais)....	103
Figura A7 – KeyIn Materials (Gerenciar Materiais).....	103
Figura A8 - Saturated/Unsaturated (Saturado/Insaturado).....	104
Figura A9 - Hydraulic Properties (Propriedades Hidráulicas)....	104
Figura A10 –KeyIn Hydraulic Conductivity Functions (Gerenciar Funções de Propriedades Hidráulicas).....	104
Figura A11 - Estimate (Estimativa).....	105
Figura A12 - Estimate Hydraulic Conductivity Functions (Estimar Funções de Propriedades Hidráulicas)....	105
Figura A13 –Vol. Water Content Fn.....	106

Figura A14 - Estimate 2 (Estimativa 2).....	106
Figura A15 - Estimate Vol. Water Content Function.....	106
Figura A16 –Anisotropy (Anisotropia).....	106
Figura A17 - Draw Regions (Desenhar Regiões).....	107
Figura A18 - Região desenhada....	107
Figura A19 –Draw Materials (“Desenhar” Materiais)....	107
Figura A20 - Materiais “desenhados”....	108
Figura A21 - Draw points (Desenhar pontos)....	108
Figura A22 –Desenho de pontos....	109
Figura A23 - Draw Boundary Conditions (Desenhar condições de contorno).....	109
Figura A24 - Draw Boundary Conditions 2 (Desenhar condições de contorno 2).....	109
Figura A25 –KeyIn Boundary Conditions (Gerenciar condições de contorno).....	110
Figura A26 - Condições de contorno impostas....	110
Figura A27 - Axes (Eixos)....	111
Figura A28 - Sketch Axes (Esboçar eixos)....	111
Figura A29 - Solve Manager (Gerenciador de soluções)....	112
Figura B1 - Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase final de construção obtidas pelo autor. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i)B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.....	114 - 133
Figura B2 – Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase final de construção obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i)B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.....	134 - 137
Figura C1 - Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase reservatório cheio obtidas pelo autor. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i)B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.....	139 - 158
Figura C2 - Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase reservatório cheio obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i)B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.....	159 - 162

Figura D1 - Superfícies de ruptura do talude de montante para fase esvaziamento rápido obtidas pelo autor. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5..... 164 - 183

Figura D2 - Superfícies de ruptura do talude de montante para fase esvaziamento rápido obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5..... 184 - 187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios triaxiais do tipo UU e CD.....	38
Tabela 2 - Resultados de vazão..	88
Tabela 3 - Resultados de FS nas três fases de análise da barragem.....	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Fator de segurança X parâmetro de poro-pressão.....	89
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

m	metro
T_n	Força Tangencial na n-ésima fatia
ΔT	Diferença das formas tangenciais nas laterais de uma fatia
P_n	Força horizontal atuante na n-ésima fatia
N_r	Força Normal
c	Coesão do solo
ϕ	Ângulo de atrito do solo
W_n	Peso da n-ésima fatia
α_n	Ângulo da n-ésima fatia
b	Base da fatia
K_h	Permeabilidade horizontal
K_v	Permeabilidade vertical
i	Gradiente hidráulico
A	Área da seção transversal do solo por onde a água percola
Q	Vazão
v	velocidade
dx, dy, dz	Elementos infinitesimais de comprimento
ϕ_p	Potencial/Carga hidráulica
∇^2	Operador de Laplace
H	Altura da barragem
Bc	Largura do coroamento
Δx	Espaçamento horizontal entre pontos da malha de diferenças finitas
Δy	Espaçamento vertical entre pontos da malha de diferenças finitas
y	Cota do nó da malha em relação ao nível de referência
u	Poro-pressão
γ_w	Peso específico da água
2L	Comprimento da barragem
B	Parâmetro de poro-pressão
γ_{sub}	Peso específico do solo submerso
γ_{sat}	Peso específico do solo saturado
km	quilômetro
A.C.	Antes de Cristo
CIGC	Comissão Internacional de Grandes Barragens
U.S.	<i>United States</i> (Estados Unidos)
FS	Fator de segurança
NBR	Norma Brasileira

N.A.	Nível d'água
MEF	Método dos elementos finitos
MDF	Método das diferenças finitas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Relevância do tema	20
1.2. Objetivos	21
1.2.1. Objetivo geral.....	21
1.2.2. Objetivos específicos.	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1. Método do equilíbrio limite para estabilidade.....	28
2.2. Conceito de superfície de falha	28
2.3. Análise de fluxo	32
2.3.1. Lei de Darcy	33
2.3.2. Equação de Laplace	34
2.4. Dimensionamento de filtros	36
2.4.1. Prevenção contra o <i>piping</i>	36
2.5. Método dos elementos finitos.....	37
2.6. Método do equilíbrio limite no SLOPE/W.....	38
2.7 Método das diferenças finitas.....	39
3. CASO DE ESTUDO.....	39
3.1. Barragem de estudo.....	39
3.2. Rede de fluxo	39
3.2.1.1. Solução da equação de Laplace pelo MDF	41
3.2.2. Condições de contorno	46
3.2.3. Definição do traçado da linha freática.....	48
3.2.4. Poro-pressão	54
3.2.5. Gradientes hidráulicos	54
3.2.6. Velocidades	54
3.2.7 Procedimentos para elaboração da planilha.....	55

3.3. Análise de estabilidade de dos taludes	57
3.3.1 O significado de ruptura de um talude.....	57
3.3.2 Análise de estabilidade dos taludes de uma barragem de terra	58
3.3.2.1 Fase final de construção	58
3.3.2.2 Fase reservatório cheio	59
3.3.2.3 Fase Esvaziamento rápido	59
3.3.3 Procedimentos para determinação do fator de segurança.....	60
3.3.3.1 Fase final de construção	60
3.3.3.2 Fase reservatório cheio	62
3.3.3.3 Fase esvaziamento rápido.....	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1. Barragem com reservatório cheio, sem filtro	65
4.2. Barragem com reservatório cheio, com filtro tapete	72
4.3. Barragem com reservatório cheio, com filtro chaminé	77
4.4. Barragem com reservatório no nível mínimo, com filtro tapete.....	83
4.5. Vazão.....	88
4.6. Estabilidade do talude de jusante – Fase final de construção.....	89
4.7. Estabilidade do talude de jusante – Fase reservatório cheio	93
4.8. Estabilidade do talude de montante – Fase esvaziamento rápido.....	94
4.9. Curvas de isofatores no SLOPE/W.....	96
5. CONCLUSÕES	98
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXO A	101
ANEXO B.....	113
ANEXO C	138
ANEXO D	163

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento das cidades, algumas necessidades foram aparecendo decorrentes de demandas para seu completo funcionamento. Dentre estas demandas surgiram necessidades tais como: reserva e tratamento de água para abastecimento, geração de energia elétrica (para distribuição para residências, fábricas e agricultura) e redes de esgoto, dentre outras. Para isto, houve grande desenvolvimento da área de projeto e construção de usinas hidroelétricas, redes de abastecimento de água, etc.

Para armazenamento de água em reservatórios, normalmente se utiliza uma estrutura denominada barragem, esta pode ser de diversos tipos e formas. Diversos fatores condicionantes têm influência direta na sua concepção, em sua maioria são de natureza ambiental. Vários fatores como a topografia, aproveitamento e utilização de materiais, incidência de chuvas, dentre outros, são fatores que podem influenciar na elaboração do projeto e execução da obra. Uma obra deste tipo é multidisciplinar, assim sendo, do ponto de vista de projeto e execução, torna-se necessário o conhecimento detalhado da topografia, da hidrologia, da composição geológica e das características geotécnicas de onde a obra será implantada, fornecendo os subsídios necessários para desenvolvimento do projeto de possíveis estruturas de barramento.

A barragem é uma estrutura que pode ser de terra (material obtido na região) ou concreto, e tem a função de represar um volume de água proveniente de um curso d'água. A construção desta, porém, traz alguns danos (modificações no ecossistema existente no local de implantação) ao meio ambiente, então se tornam indispensáveis um bom planejamento e uma boa investigação dos materiais encontrados na região, de forma a utilizá-los adequadamente como material de construção buscando minimizar os possíveis danos.

O planejamento adequado de barragens requer uma maior consciência de nosso ambiente natural e humano. A preocupação com a qualidade ambiental inclui a preocupação tanto do ar como da água, dos nossos sistemas ecológicos naturais e dos recursos culturais. Muitas leis e regulamentos agora refletem essa preocupação e exigem a consideração de fatores ambientais no planejamento (U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1987).

Neste trabalho será feito um estudo de uma barragem de terra. As barragens de terra têm sido usadas desde os primórdios da civilização para armazenar água para irrigação. Isto

pode ser comprovado tanto pela história quanto pelas estruturas antigas que ainda existem. Algumas das estruturas na antiguidade eram muito grandes. Foi construída, por exemplo, uma barragem na Sri Lanka em 504 a.C. que tinha aproximadamente 18 km de extensão, 21 m de altura e continha aproximadamente 13.000.000m³ de aterro. Hoje, assim como no passado, a barragem de terra continua sendo o tipo de barragem mais comum, principalmente porque esta construção envolve a utilização de materiais em seu estado natural com pouco processamento (U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1987).

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

É de grande importância o estudo da estabilidade dos taludes e do fluxo numa barragem de terra, pois a ruptura desta devido ao mau dimensionamento e falta de análises pode acarretar em perdas de vidas em grande número assim como grande destruição a jusante desta barragem comprometendo inclusive o abastecimento de cidades que dependem da água represada nesta barragem.

Um caso real de ruptura de barragem foi a barragem de Camará. Segundo o consultor em geologia, geotecnia e mecânica das rochas Prof. Dr. Milton Assis Kanji “O histórico da barragem apresenta uma sucessão de julgamentos inadequados, que superpostos uns aos outros causaram a ruptura da barragem. Não se pode imputar o lamentável evento da ruptura a uma só causa... A ruptura da laje de rocha a jusante aumentou o gradiente hidráulico (pela diminuição da distância de percolação) intensificando a erosão interna (“piping”) que o solo de preenchimento da falha sob a barragem vinha sofrendo, acabando por remove-lo completamente.”

Desta forma, nota-se que o estudo de fluxo é de grande importância pois este interfere de forma direta na estabilidade da barragem.

A água é o recurso vital para sustentar todas as formas de vida na Terra. Ela é essencial ao bem-estar de nossa civilização e é o elemento essencial ao crescimento e desenvolvimento do meio ambiente do planeta, assim como requisito básico para a saúde. À medida que as civilizações se desenvolveram, cresceram as necessidades de fornecimento de água, irrigação, controle de enchentes, navegação, controle de qualidade da água, controle de sedimentos e energia (CIGB, 2007).

A barragem tem função de regularizar vazão, isso significa que nos períodos de chuvas ela armazena água que será fornecida a uma população quando esta estiver passando por período de estiagem. Desta forma, são de grande importância o estudo da estabilidade e o comportamento da barragem quando está submetida às tensões provenientes do seu peso próprio e da água que será represada para que possa desempenhar o papel para o qual foi projetada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o estudo da estabilidade e fluxo d'água numa barragem de terra, considerando as três fases (fase final de construção, fase reservatório cheio e fase esvaziamento rápido) e com diferentes disposições de filtros, sendo utilizado para isto, um programa baseado em elementos finitos como comparativo com os resultados obtidos com os cálculos para solução da rede de fluxo através do método das diferenças finitas aplicado à equação de Laplace e a utilização da lei de Darcy e a equação da continuidade.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento da rede de fluxo quando a barragem é provida e desprovida de filtro;
- Obter os parâmetros advindos da análise de rede de fluxo (gradientes hidráulicos, velocidades, vazão);
- Obter os fatores de segurança para cada fase da barragem considerando esta com filtro tipo tapete;
- Verificar a estabilidade ou não da barragem;
- Comparar os resultados obtidos na análise de fluxo e estabilidade de taludes com os resultados obtidos a partir dos programas SLOPE/W e SEEP/W.
- Dar soluções caso algum problema de segurança venha a ocorrer.

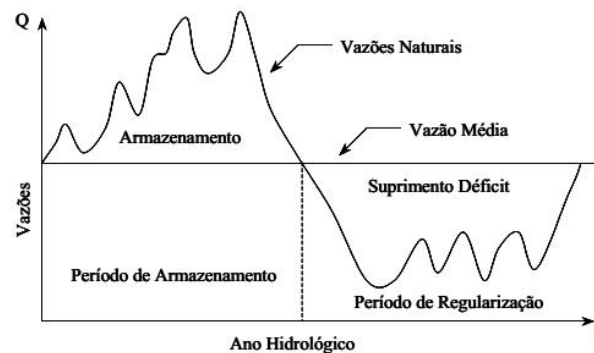
2 REFERENCIAL TEÓRICO

As barragens são estruturas que tem finalidade de acumular água, atrás desta finalidade pode haver motivos mais relevantes para a concepção de uma barragem, tais como:

1. **Controle de cheias** – devido à ocupação humana e à degradação da bacia às vezes há necessidade de reter temporariamente grandes volumes de água para evitar inundações;
2. **Rejeitos de minerações** – estas barragens servem para conter as águas provenientes das minerações, a fim de evitar que as substâncias químicas invadam os mananciais;
3. **Correção torrencial** – embora de pequeno porte destinam-se a mudar o regime do rio, diminuindo sua velocidade que é causadora de erosões;
4. **Conservação de água** – destinam-se a armazenar as águas pluviais ficando com uma reserva apta para qualquer período de carência de água;
5. **Controle de poluição** – para captação de resíduos, geralmente anexadas na barragem principal, com a finalidade de desviar uma parcela e estabelecer uma qualidade melhor ao final do curso;
6. **Navegação** – proporcionando navegabilidade em uma região para facilitar o transporte;

A finalidade da regularização ou conservação de água é controlar o regime hidrológico de um rio, ou seja, armazenar água no período de afluência conforme desejada demanda (Figura 1). Assim, a amplitude de variação das vazões naturais é minimizada, desta forma, se garante vazões efluentes nos períodos de estiagem.

Figura 1 - Balanço de regularização.



Fonte: Assis, A. P. (2003).

As barragens de regularização possuem, em geral, uma ou mais das seguintes finalidades específicas.

- **Aproveitamento Hidrelétrico** – É considerado como benefício adicional à regularização. A formação do desnível entre os níveis d'água a montante e a jusante propicia a formação de energia potencial hidráulica, que é convertida em energia elétrica.
- **Navegação** – Também é um benefício duplo: a) Para jusante, através da regularização da vazão no período de estiagem. b) Para montante, através do afogamento de eventuais corredeiras e cachoeiras.
- **Abastecimento d'água** – Para fins industriais, de irrigação ou domésticos, entre outros.

A barragem de terra é o tipo de barragem mais comum no Brasil, devido às condições topográficas (vales muito abertos) e da disponibilidade de material terroso. Suporta fundações mais deformáveis, podendo-se construir barragens de terra apoiadas sobre solos moles, como no caso da barragem do rio Verde, próxima a Curitiba, com 15 m de altura (MASSAD, 2010).

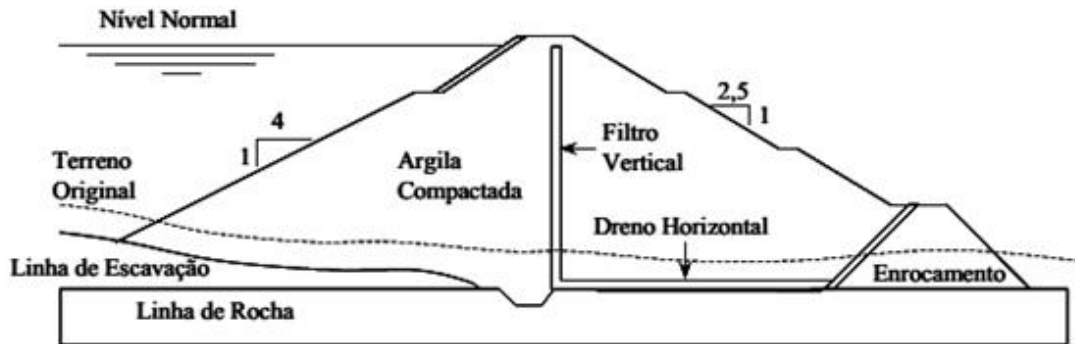
A inclinação dos taludes de montante e de jusante é fixada de modo a garantir a estabilidade durante a vida útil da barragem. Estas inclinações são geralmente em torno de 1:2,5 ou 1:3 (relação entre distância vertical e distância horizontal).

As barragens de terra podem ser classificadas quanto ao tipo de seção:

- **Barragem homogênea** – Designação simplificada quando há predominância de um único material, pois não existe uma barragem homogênea de fato. De alguma forma, algum

outro material faz parte da barragem, como materiais usados para drenagem interna e proteção externa de taludes por exemplo.

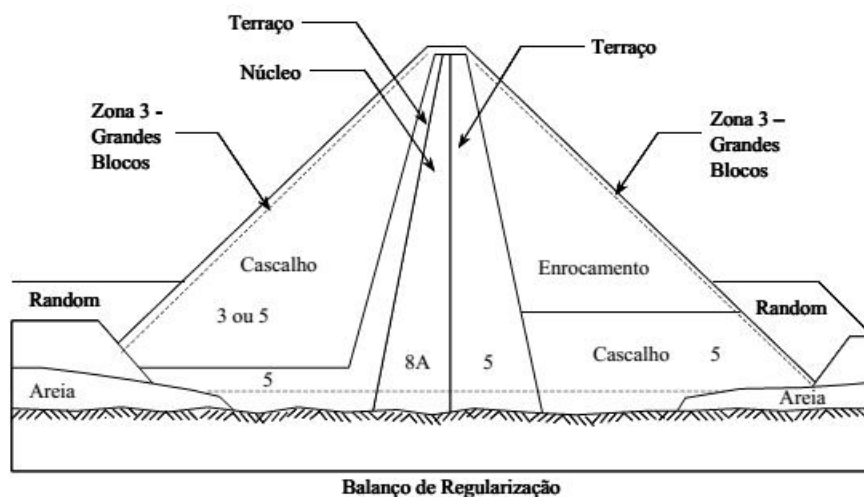
Figura 2 - Exemplo de barragem homogênea, Barragem Vigário, Brasil.



Fonte: Assis. A. P. (2003).

- Barragem zoneada – Denominação quando não há um único material predominante. A utilização deste tipo de seção depende dos materiais de construção disponíveis e seus respectivos custos.

Figura 3 - Exemplo de barragem de seção Zoneada, Barragem de São Simão, Brasil.



Fonte: Assis. A. P. (2003).

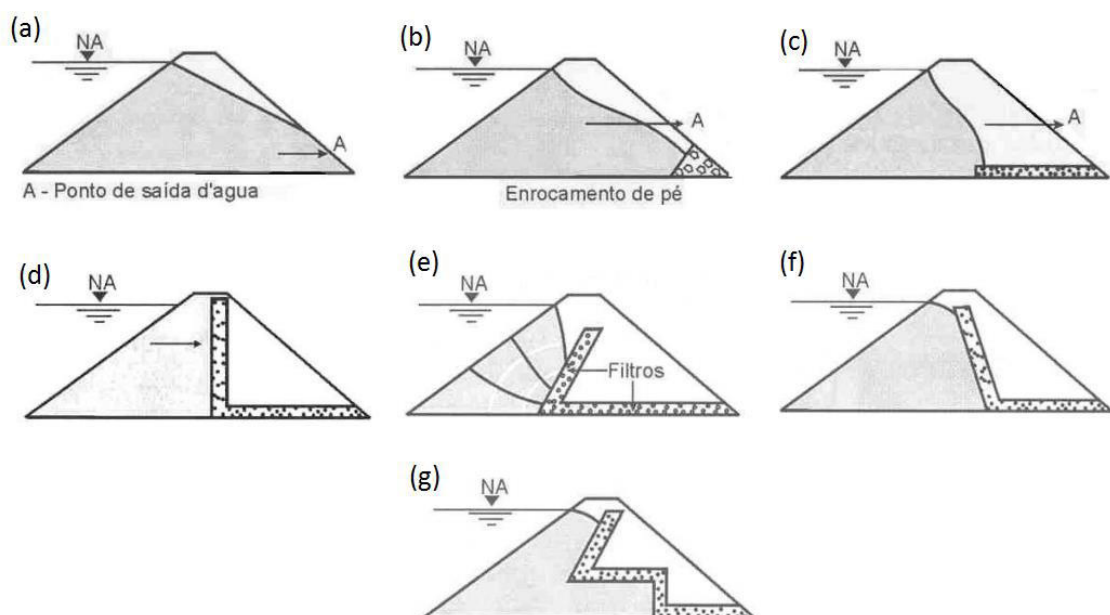
Com o que diz respeito ao fluxo d'água pelo corpo da barragem, um problema que deve ser evitado é o *piping*, que é uma erosão tubular regressiva que se origina no talude de

montante carreando as partículas de solo e avança até o talude de jusante. Esta erosão pode evoluir ao ponto de criar cavidades relativamente grandes no corpo da barragem, podendo levar ao seu colapso.

Quanto à drenagem interna da barragem, visando evitar o *piping*, foram desenvolvidos filtros. As formas de disposição dos filtros mudaram com o passar dos anos como mostra a Figura 4.

A Figura 4.a ilustra como eram as barragens de terra inicialmente (sem filtro). A ausência de filtro ocasionava o *piping* devido à emergência de água no talude de jusante. As Figuras 4.b e 4.c ilustram uma evolução com a adição de um filtro, teoricamente o problema seria resolvido se o solo compactado fosse isotrópico, o que não acontece na realidade, assim, ainda existe a possibilidade de ocorrência do *piping*. A Figura 4.d ilustra a solução encontrada por Terzagui, esta consiste na adoção de um filtro vertical (chaminé) combinado com um filtro horizontal, interceptando o fluxo d'água antes que ele saia pelo talude de jusante. As demais Figuras correspondem a ideias mais recentes, de se inclinar um dos filtros para montante (o que melhora as condições de estabilidade de montante quando do rebaixamento rápido do N.A.do reservatório), ou para jusante (mais favorável quando as fundações são permeáveis, pois aumenta o caminho de percolação) ou a combinação das duas ideias.

Figura 4 - Disposições dos filtros nas barragens.



Fonte: Massad, F.(2010).

Os filtros têm função de desviar o fluxo interno da água com a finalidade de evitar a erosão.

Quanto aos fatores predominantes para a escolha do tipo de barragem, são levados em consideração:

- Materiais de construção – A principal vantagem das barragens de terra é que os principais materiais de construção já foram “fabricados” pela própria natureza.
- Características geotécnicas da fundação – O projeto do maciço de uma barragem está ligado às características geotécnicas da fundação como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e a resistência a erodibilidade. No geral, o tipo de fundação para uma barragem de terra não necessita ter alta resistência para suportar o peso da barragem que é bem inferior se comparado com a barragem de concreto, portanto, sua fundação pode ser em rocha, areia e pedregulho ou argila e silte,
- Tempo disponível para construção e clima da região – Quando o tempo de construção é limitado, muitas vezes é necessária a elaboração de um projeto que não seria o mais econômico.
- Sequência de construção de desvio do rio – De um modo geral a sequência de construção de uma barragem envolve duas grandes fases. Na primeira fase, o rio continua passando pela calha natural (total ou parcial). Durante esta fase são construídas as estruturas de desvio (canal lateral, túnel, galeria, etc.), por onde será desviado o rio na segunda etapa. Na segunda fase é feito o fechamento do canal por onde passava o rio na primeira fase, e completada a barragem neste trecho. Quanto à ensecadeira de segunda fase, a sua cota é definida em função de considerações hidrológicas e hidráulicas, de tal modo que seja segura para uma determinada cheia (em geral, com tempo de recorrência de 25 a 100 anos). Como o volume desta ensecadeira é considerável, é prática corrente a incorporação da mesma ao maciço definitivo da barragem, resultando em diminuição de volume e em tempo de construção.
- Finalidade do reservatório – Quando a quantidade de água disponível no reservatório é da mesma ordem de grandeza da demanda, a perda de água por infiltração deve ser minimizada para evitar que parte da população fique sem receber água.

Este trabalho tem como finalidade fazer a análise da estabilidade dos taludes de uma barragem de terra nas três fases da barragem citadas anteriormente e a análise da rede de fluxo nesta mesma barragem, para isto, serão comparados os resultados obtidos dos cálculos

baseados no método do equilíbrio limite proposto por Bishop com os resultados obtidos a partir do SLOPE/W, da mesma forma, serão comparados os resultados obtidos da solução da rede de fluxo a partir do MDF com os resultados do SEEP/W.

Antes de se iniciar qualquer obra, é necessário ter o conhecimento das características geotécnicas do local onde será realizada a mesma. Para barragens não é diferente. Alguns ensaios devem ser realizados com finalidade de conhecer alguns parâmetros necessários para obtenção de resultados relativos às tensões e deformação em maciços de terra. Os tipos de ensaios e os parâmetros obtidos pelos mesmos são importantes para a caracterização do solo/rocha (terreno) dependendo de qual fase de construção a barragem se encontra (CARVALHO, 2012):

- Fase final de construção: Determinar o estado de tensões atuantes devido ao peso próprio do maciço, coesão e ângulo de atrito do solo através do ensaio triaxial UU (Não consolidado e não drenado), tensões totais.
- Fase do reservatório cheio – Estado de tensões influenciado pelo fluxo d'água através do maciço. Ensaio triaxial CU (consolidado e não drenado) em termos de tensões totais e tensões efetivas.
- Fase de esvaziamento rápido – Deve ser feito ensaio CU ou CD (consolidado e drenado) para determinar coesão e ângulo de atrito do solo.

Segundo Carvalho (2012), quando não se dispõe dos parâmetros do ensaio CU, (C e ϕ), pode-se utilizar os mesmos parâmetros do ensaio CD, já que são os mesmos.

Quanto aos princípios para projeto de uma barragem de terra, estes devem atender a dois requisitos básicos: Economia e segurança. Quanto à economia, este inclui os custos de manutenção da obra, durante a sua vida útil. Segundo Massad (2010), a segurança da barragem é obviamente o princípio predominante. Dela dependem vidas humanas, bens comunitários e individuais e deve ser garantida quanto:

- a) Ao transbordamento, que pode abrir brechas no corpo de barragens de terra e de enrocamento;
- b) Ao *piping* e ao fenômeno de areia movediça;
- c) À ruptura dos taludes artificiais, de montante e de jusante, e aos taludes naturais, das ombreiras adjacentes ao reservatório;

- d) Ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos, atuantes na superfície dos reservatórios, e que vão se quebrar no talude de montante, podendo provocar sulcos de erosão;
- e) Ao efeito erosivo das águas das chuvas sobre o talude de jusante.

2.1 MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE PARA ESTABILIDADE

O método consiste no estudo do equilíbrio de forças entre fatias/cunhas que surgem quando se estabelece a discretização da região do talude submetida aos esforços solicitantes de cisalhamento. Este equilíbrio permite que sejam traçadas diversas superfícies de ruptura (normalmente consideradas circulares) as quais são refletidas nas análises através de um fator de segurança, este permite verificar as condições de estabilidade do talude de acordo com as propriedades de resistência ao cisalhamento da rocha/solo, as discontinuidades, a poro-pressão e outras propriedades do maciço.

Dentre os métodos de equilíbrio limite mais usados, destacam-se o de Fellenius e o de Bishop-Simplificado. Segundo Fellenius (1922), o fator de segurança é uma relação entre a resistência ao corte real do talude e a tensão de corte crítica que tentam provocar a falha, ao longo de uma suposta superfície.

$$FS = \frac{\text{Resistência de cisalhamento disponível}}{\text{Tensões de cisalhamento atuantes}} \quad (1)$$

2.2 CONCEITO DE SUPERFÍCIE DE FALHA

Este conceito é utilizado para indicar aquela superfície assumida ao longo da qual possa ocorrer o deslizamento ou a ruptura do talude.

Geralmente se determina uma série de superfícies de falha para determinar a superfície que apresenta o menor valor de fator de segurança, esta superfície é denominada superfície crítica de falha.

Existe uma série de fatores primários que devem ser considerados devido a sua influência da estabilidade como a geometria do talude, a geologia estrutural, presença de trinca de tração, cargas dinâmicas ou não drenagem, propriedades de resistência, etc.

Os métodos de equilíbrio limite supõem que no caso de falha, as forças atuantes e resistentes são iguais ao longo de uma superfície de falha e equivalentes a um fator de segurança de 1,0. Segundo a NBR 11682/06 – Estabilidade de encostas, o fator de segurança quando se considera um alto grau de segurança para perdas de vidas e perdas materiais e ambientais é de 1,5, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Fatores de segurança.

Grau de segurança Perdas de vidas Grau de segurança Perdas materiais e ambientais	Alto	Média	Baixo
	Alto	Média	Baixo
Alto	1,5	1,4	1,3
Médio	1,4	1,3	1,2 ^(*)
Baixo	1,4	1,3	1,10 ^(*)

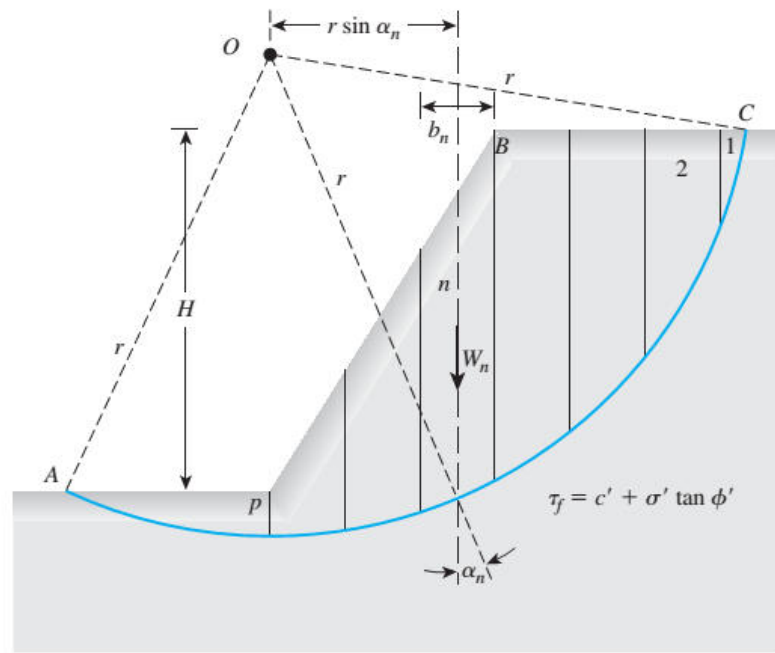
(*) A adoção de fatores de segurança iguais ou inferiores a 1,2 só será permitida quando os parâmetros de resistência do solo puderem ser confirmados por retroanálise, para as condições mais desfavoráveis de poro-pressões.

No caso de estabilidade de blocos rochosos os fatores de segurança podem ser parciais, incidindo sobre γ , ϕ , C' , em função da incerteza sobre estes parâmetros, devendo ser justificado pelo projetista. Deve-se também adotar um fator de segurança mínimo sobre o método de cálculo empregado, igual a 1,1

Fonte: NBR 11682:2006 Estabilidade de encostas.

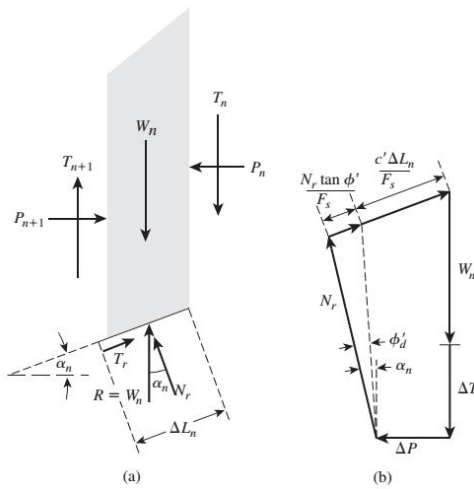
Em 1955, Bishop propôs uma solução para o método das fatias. Nesse método, o efeito das forças nas faces de cada fatia é levado em conta até certo ponto. As Figuras 6 e 7 apresentam a análise de talude proposto por Bishop.

Figura 6 - Análise de estabilidade por meio do método comum das fatias: superfície de ruptura.



Fonte: Das, B.M. (2010).

Figura 7 - Análise de estabilidade por meio do método comum das fatias: forças atuantes na n-ésima fatia.



Fonte: Das, B.M. (2010).

Fazendo $P_n - P_{n+1} = \Delta P$ e $T_n - T_{n+1} = \Delta T$ e escrevendo

$$T_r = N_r(\tan \phi'_d) + c'_d \Delta L_n = N_r \left(\frac{\tan \phi'}{FS} \right) + \frac{c' \Delta L_n}{FS} \quad (2)$$

Onde:

P_n é a força horizontal atuante na n-ésima fatia;

T_n é a força tangencial atuante na n-ésima fatia;

N_r e T_r são as componentes normal e tangencial, respectivamente, da reação R;

c' e ϕ' são, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito do solo;

ΔL_n é o comprimento inclinado (com ângulo α_n) da base da n-ésima fatia;

W_n é o peso da n-ésima fatia.

A Figura 7 mostra o polígono de forças para o equilíbrio da n-ésima fatia. Somando as forças na direção vertical, temos.

$$W_n + \Delta T = N_r \cos \alpha_n + \left[\left(\frac{N_r \tan \phi'}{FS} \right) + \frac{c' \Delta L_n}{FS} \right] \sin \alpha_n \quad (3)$$

ou

$$N_r = \frac{W_n + \Delta T - \frac{c' \Delta L_n}{FS} \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS}} \quad (4)$$

Para o equilíbrio da cunha ABC, calculando os momentos em relação a O, temos

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} T_r r \quad (5)$$

Onde

$$T_r = \frac{1}{FS} (c' + \sigma' \tan \phi') \Delta L_n = \frac{1}{FS} (c' \Delta L_n + N_r \tan \phi') \quad (6)$$

Substituindo as Equações 2 e 4 na Equação 5 tem-se

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (7)$$

Onde

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS} \quad (8)$$

Ou, se considerarmos $\Delta T = 0$, temos

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (9)$$

Como o termo FS (fator de segurança) está presente dos dois lados da Equação, deve-se adotar um procedimento iterativo. Como é comum no método das fatias, várias superfícies de ruptura devem ser investigadas, de modo a podermos encontrar a superfície crítica de ruptura (a que fornece o menor fator de segurança).

O método simplificado de Bishop é provavelmente o mais utilizado. Ele apresenta resultados satisfatórios na maioria das vezes quando incorporado a programas de computador.

2.3 ANÁLISE DE FLUXO

A quantidade de água que percola através ou sob uma barragem e a distribuição das pressões de água (equipotenciais) podem ser estimadas usando a teoria de fluxo através de meios porosos, que se constitui desta forma, numa ferramenta importante para as análises de engenharia.

No primeiro caso, pode-se estimar as perdas d'água no reservatório. No segundo caso pode-se avaliar a distribuição de pressões neutras para análise de estabilidade, análise dos gradientes hidráulicos de saída e variação do potencial ao "*piping*".

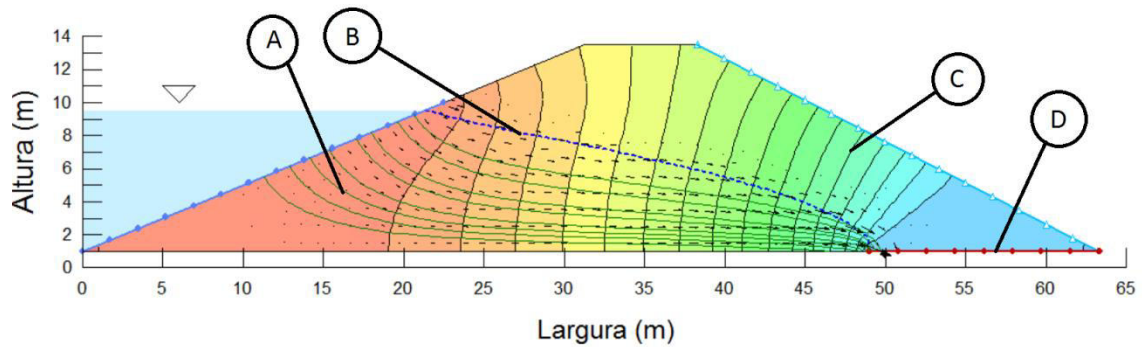
Em análises de percolação o projetista deve ter em mente sempre as hipóteses da teoria que são:

- a) Os solos do maciço e fundação são meios incompressíveis não havendo variações nas dimensões dos poros.
- b) A percolação se processa sob gradientes hidráulicos que são função das perdas de carga gravitacionais.
- c) Não há mudanças do grau de saturação na zona onde o fluxo ocorre, de tal forma que a quantidade de fluxo que entra no elemento de volume é igual à quantidade de fluxo que sai dele, num mesmo espaço de tempo.
- d) As condições de contorno de fluxo são conhecidas.

A Figura 8 mostra os elementos principais da análise de fluxo d'água através de uma barragem de terra fictícia. O elemento "A" representa as linhas de fluxo, ou seja, o caminho que uma partícula de água percorre até encontrar o filtro "D" (tipo tapete drenante). O elemento "B" representa a linha freática, ou seja, a linha de fluxo superior, limite entre o

estado saturado e não saturado, e que também indica os níveis d'água a montante e a jusante da barragem. O elemento “C” representa as linhas de equipotenciais, ou seja, linhas que unem pontos com mesma carga hidráulica (energia). Estas linhas são sempre perpendiculares às linhas de fluxo. O elemento “D” representa o filtro tipo tapete onde se anula a energia potencial hidráulica.

Figura 8 - Elementos de Fluxo numa Barragem.



FONTE: O autor (2014)

2.3.1 LEI DE DARCY

A lei de Darcy (1856) estabelecida para fluxo laminar para a percolação de água através dos solos pode ser escrita matematicamente pela Equação:

$$V = k \times i = k \times \frac{dh}{dl} \quad (10)$$

$$Q = k \times i \times A \quad (11)$$

Onde

V = Velocidade de descarga (em cm/s);

K = Coeficiente de permeabilidade (em cm/s);

i = Gradiente hidráulico (em cm/cm);

h = Carga de pressão (em cm);

l = Comprimento do caminho de percolação (em cm);

A = Área de seção transversal do solo onde a água percola (em cm^2);

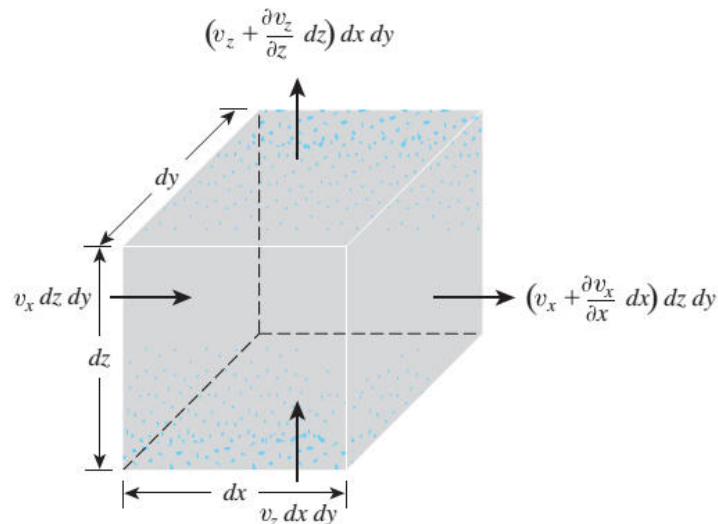
Q = Vazão de percolação em (em cm^3/s).

2.3.2 EQUAÇÃO DE LAPLACE

Em muitos casos, a água não percola através do solo em apenas uma direção, nem é uniforme ao longo de toda área perpendicular ao fluxo. Nessas situações, a percolação da água do lençol freático geralmente é calculada por meio da utilização de gráficos denominados redes de fluxo, cujo conceito tem como base a Equação da continuidade de Laplace, que define a condição de percolação em regime permanente em determinado ponto na massa de solo. (DAS, 2010)

A Figura 9 mostra o escoamento em regime permanente da água do lado de montante para o lado de jusante. Um bloco de dimensões dx , dy e dz é usado para o melhor entendimento deste fenômeno, considerando um fluxo bidimensional.

Figura 9 - Escoamento em regime permanente



Fonte: Das, B.M. (2010)

Presumindo que a água seja incompressível, ou seja, sua densidade não varia, a vazão de entrada (Equações 12 e 13) deve ser igual à vazão de saída do bloco (Equações 14 e 15).

$$Q_{\text{entrada}x} = v_x dz dy \quad (12)$$

$$Q_{\text{entrada}z} = v_z dx dy \quad (13)$$

$$Q_{\text{saída}x} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz dy \quad (14)$$

$$Q_{\text{saída}z} = \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (15)$$

Utilizando as Equações 12, 13, 14 e 15 e utilizando a Equação da continuidade tem-se

$$Q_{\text{entrada}x} + Q_{\text{entrada}z} - Q_{\text{saída}x} - Q_{\text{saída}z} = 0 \quad (16)$$

que resulta na Equação 17.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Fazendo uso da lei de Darcy, substituem-se as velocidades da Equação 17 pela expressão da Equação 10. Desta forma, a Equação 17 pode ser escrita da forma

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

Se o solo for isotrópico, ou seja, os coeficientes de permeabilidades são iguais nas três direções, considerando o fluxo nas três direções então a equação 18 pode ser escrita da forma

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \text{ ou } \nabla^2 \Phi = 0 \quad (19)$$

que é a Equação de Laplace e é a Equação geral da hidrodinâmica para fluxo permanente.

Segundo Barends & Uffink, uma linha de fluxo pode ser definida como o caminho de uma partícula hipotética no tempo. Um padrão de fluxo pode ser caracterizado por um conjunto de linhas de corrente ou por um conjunto de isoípsa ou linhas equipotenciais. Uma linha equipotencial é uma linha ao longo da qual a carga piezométrica é constante.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE FILTROS

Desde as primeiras barragens até as barragens dos dias atuais, houve grandes avanços quando à disposição do sistema de drenagem no interior da barragem, o problema a ser superado era a possibilidade de ocorrência do *piping*.

Para o dimensionamento do filtro, deve-se:

- a) Determina-se a vazão a ser captada pelos filtros, com base no traçado de redes de fluxo e em estimativas dos coeficientes de permeabilidade do maciço compactado e dos maciços de fundação.
- b) Em função dos materiais granulares disponíveis, fixam-se valores para dos coeficientes de permeabilidade dos filtros e calculam-se as suas respectivas espessuras com base na Lei de Darcy, ou na Equação de Dupuit.
- c) Verifica-se se os materiais dos filtros e os solos que os envolvem satisfazem o Critério de Filtro de Terzaghi, para se ter uma garantia segura contra o *piping*.

2.4.1 PREVENÇÃO CONTRA O PIPING

Para evitar a ocorrência do *piping*, deve-se cuidar para que na passagem do fluxo de um meio para outro mais poroso (solo a ser protegido para o filtro), não haja o carreamento de partícula de solo. A permeabilidade do filtro deve ser, pelo menos, de 10 a 20 vezes a do solo a ser protegido.

O Critério de Filtro de Terzaghi é baseado nessa linha de raciocínio, que estabelece as seguintes condições a serem satisfeitas pelo filtro e pelo solo a ser protegido:

$$\frac{D_{15}(\text{Filtro})}{D_{85}(\text{Solo})} < 4 \text{ ou } 5$$

para garantir a proteção contra o *piping*, e

$$\frac{D_{15}(\text{Filtro})}{D_{15}(\text{Solo})} > 4 \text{ ou } 5$$

para garantir a passagem de água. Os índices 15 e 85 referem-se às porcentagens de material, em peso, com partículas menores do que o diâmetro D , a eles associados.

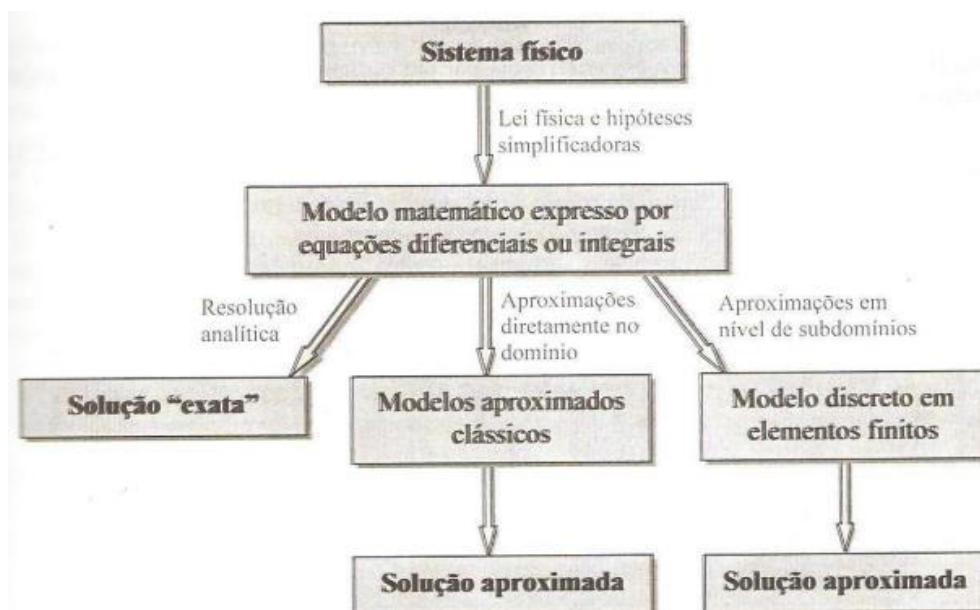
2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O programa computacional que será utilizado neste estudo é o pacote GeoStudio versão estudante. Este pacote baseia-se no método dos elementos finitos para realização das diversas análises, dentre deste contexto descreve-se a seguir o referido método de forma sucinta com vista a fornecer subsídios para as análises que serão realizadas.

“O método dos elementos finitos, de sigla MEF, com seus atuais programas automáticos é possível praticamente analisar o comportamento de qualquer sistema físico regido por equações diferenciais ou integrais, como da mecânica dos sólidos deformáveis, da condução de calor e de massa, e do eletromagnetismo.” (SORIANO, 2009)

O método dos elementos finitos é um método numérico utilizado para solução de equações diferenciais (que já possuem hipóteses simplificadoras do fenômeno) que refletem o comportamento de um determinado sistema físico. É um modelo matemático, portanto é um método de resolução aproximado dos fenômenos físicos. A Figura 10 apresenta uma ideia da aplicabilidade do método.

Figura 10 - Esquema de análise de um sistema físico idealizado como contínuo.



Fonte: Soriano, H. L.(2009)

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínio de geometria simples (de volume V_i). Em outras palavras, o domínio do problema em estudo é discretizado (dividido) em partes menores para possibilitar a obtenção da solução da equação em estudo em qualquer local do domínio. (AZEVEDO, 2003)

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (20)$$

Na Equação 20, o lado esquerdo representa uma integral única onde uma função “ f ” está no presente num domínio “ V ”, esta função pode não ser simples de resolver analiticamente ou mesmo impossível, mas com o recurso de um computador, este domínio pode ser discretizado em vários elementos menores (o quanto o operador desejar), assim, gera-se uma malha de pontos discretos onde cada ponto desse domínio corresponde a um valor (de acordo com a função f), possibilitando uma análise do comportamento da função no seu domínio através de um gráfico. O lado direito da Equação mostra a soma dos finitos elementos (divisões do domínio total V) integrados.

2.6 MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE NO SLOPE/W

Um dos programas do pacote GeoStudio é o equilíbrio limite, cuja vertente remete para o cálculo do fator de segurança calculado na estabilidade de taludes. O programa permite ainda analisar, ao mesmo tempo, problemas simples e complexos para uma variedade de formas de superfície, condições de poro-pressão, propriedades do solo, métodos de análise de estabilidade e condições de carregamento.

Usando o método do equilíbrio limite, o programa permite modelar diversos tipos de solo considerando também a heterogeneidade do mesmo, condições complexas de carregamento e geometrias de superfícies deslizantes, e variáveis na poro-pressão da água, usando uma grande variedade de modelos de solo.

2.7 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

O método das diferenças finitas (MDF) consiste em reduzir a equação diferencial parcial (Elíptica) nas proximidades de um ponto a uma equação algébrica. Não se procura determinar uma expressão fechada para a função que atende à equação e às condições de contorno. O problema é substituído pela solução de um sistema de equações algébricas.

3. CASO DE ESTUDO

3.1 BARRAGEM EM ESTUDO

A barragem que deu origem a este estudo é a barragem de terra homogênea localizada no município de Campina Grande (Projeto Multi-Lagos) (CARVALHO 1998), assente sobre rocha, que tem uma altura de 32m. O nível d'água máximo atinge 28m e o nível d'água mínimo 8m. O solo do maciço tem um coeficiente de permeabilidade horizontal $K_h = 1 \times 10^{-5}$ m/s e um coeficiente de permeabilidade vertical $K_v = 1 \times 10^{-6}$ m/s. O peso específico do solo no estado compactado é de $18,2 \text{ kN/m}^3$, e o peso específico do solo saturado é igual a 20 kN/m^3 . O peso específico da areia que compõe o filtro é de $17,51 \text{ kN/m}^3$, ângulo de atrito igual a 30° sem coesão. Ensaios triaxiais do tipo UU e do tipo CD forneceram os seguintes resultados:

Tabela 1 - Resultados dos ensaios triaxiais do tipo UU e CD

Tipo de Ensaio Triaxial	Coesão, kPa	Ângulo de Atrito, (graus)
UU	105	7
CD	50	12

Fonte: Carvalho (1998).

3.2 REDE DE FLUXO

O solos tem a propriedade de permitir que a água percole através dos seus vazios, os quais, estando interligados entre si, formam um “espaço contínuo”. É esse espaço contínuo que permite o fluxo da água de um ponto de energia alta para outro de energia menor.

Para os primeiros passos da análise de fluxo foi estudado o método das diferenças finitas para a solução da equação de Laplace que é largamente utilizada em problemas de fluxo, e em seguida aplicando-se a Lei de Darcy obteve-se os valores dos gradientes hidráulicos, velocidades de percolação e vazão total da água através do corpo da barragem.

O objetivo desta fase do trabalho é determinar as cargas potenciais, poro-pressão, gradientes hidráulicos vertical e horizontal, velocidades de percolação da água através do maciço nas direções vertical e horizontal, e vazão total através da barragem.

Os parâmetros citados acima serão comparados em 3 (três) situações:

- 1 – Barragem sem filtro;
- 2 - Barragem com filtro tipo tapete;
- 3 – Barragem com filtro tipo chaminé.

Serão descritas a seguir as características geométricas da Barragem em análise.

Altura da barragem: 32m;

Comprimentos horizontais do taludes: Geralmente os taludes têm inclinação em torno de 1:2,5 (relação entre a distância vertical e a distância horizontal) para o talude de montante e 1:3 para o talude de jusante, porém para que não houvesse problema de contorno, optou-se por manter fixas as inclinações de 1:2,5, dessa forma, todo o contorno da barragem passa por pontos da malha de diferenças finitas.

Largura do coroamento: *Bureau of Reclamation* (Equações 21 e 22), *Knappen* (Equação 23) e *Preece* (Equação 24) recomendam expressões empíricas para a largura do coroamento, sendo que por razões construtivas, a largura do coroamento não deve ser inferior a 5m.

$$B = 0,2H + 3m = 9,4m \quad (21)$$

$$B = 3,63m^{2/3}\sqrt[3]{H} - 1,5m = 10m \quad (22)$$

$$B = 1,65m^{1/2} \sqrt{H} = 9,33m \quad (23)$$

$$B = 1,1m^{1/2} \sqrt{H + 1m} = 6,32m \quad (24)$$

O valor adotado para a largura do coroamento foi de 10m.

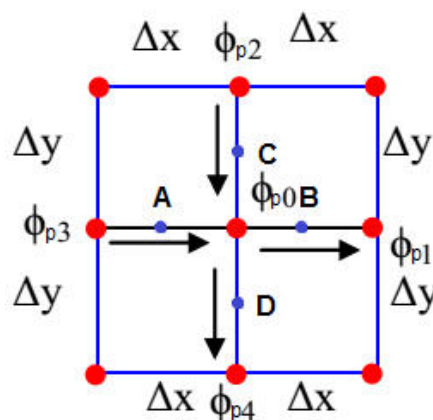
3.2.1 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE LAPLACE PELO MDF

A equação de Laplace rege o fluxo bidimensional num meio poroso, isotrópico, homogêneo, saturado e sujeito à lei de Darcy. No problema existe anisotropia no meio em relação à permeabilidade, por isso, a equação de Laplace se torna a equação 25.

$$k_h \left[\frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x^2} \right]_0 + k_y \left[\frac{\partial^2 \phi_p}{\partial y^2} \right]_0 = 0 \quad (25)$$

Analisando-se o que acontece com a solução num ponto da malha onde acontece o fluxo livre no maciço da barragem apresentada na Figura 11, verifica-se o ponto em análise e os pontos em suas vizinhanças (representando pelos cinco pontos mostrados) nos fornecem resposta no interior da região de fluxo. Normalmente, se refere-se a estes pontos como uma molécula.

Figura 11 – Molécula de diferenças finitas.



Fonte: O autor (2015).

Para valores suficientemente pequenos de Δx e Δy , pode-se aproximar a primeira derivada (centrada) de ϕ nos pontos A, B, C e D por

$$\left[\frac{\partial\phi_p}{\partial x}\right]_A = \frac{\phi_{p3} - \phi_{p0}}{\Delta x}; \left[\frac{\partial\phi_p}{\partial x}\right]_B = \frac{\phi_{p0} - \phi_{p1}}{\Delta x}; \left[\frac{\partial\phi_p}{\partial y}\right]_C = \frac{\phi_{p2} - \phi_{p0}}{\Delta y}; \left[\frac{\partial\phi_p}{\partial y}\right]_D = \frac{\phi_{p0} - \phi_{p4}}{\Delta y}$$

Desta forma, a segunda derivada no ponto central O pode ser dada por

$$\left[\frac{\partial^2\phi_p}{\partial x^2}\right]_O = \frac{\left[\frac{\partial\phi_p}{\partial x}\right]_A - \left[\frac{\partial\phi_p}{\partial x}\right]_B}{\Delta x} = \frac{\frac{\phi_{p3} - \phi_{p0}}{\Delta x} - \frac{\phi_{p0} - \phi_{p1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{\phi_{p1} + \phi_{p3} - 2\phi_{p0}}{\Delta x^2}$$

e

$$\left[\frac{\partial^2\phi_p}{\partial y^2}\right]_O = \frac{\left[\frac{\partial\phi_p}{\partial y}\right]_C - \left[\frac{\partial\phi_p}{\partial y}\right]_D}{\Delta y} = \frac{\frac{\phi_{p2} - \phi_{p0}}{\Delta y} - \frac{\phi_{p0} - \phi_{p4}}{\Delta y}}{\Delta y} = \frac{\phi_{p4} + \phi_{p2} - 2\phi_{p0}}{\Delta y^2}$$

Substituindo na equação de Laplace tem-se

$$k_h \left(\frac{\phi_{p1} + \phi_{p3} - 2\phi_{p0}}{\Delta x^2} \right) + k_v \left(\frac{\phi_{p4} + \phi_{p2} - 2\phi_{p0}}{\Delta y^2} \right) = 0$$

a solução de ϕ_{p0} para equação acima é

$$\phi_{p0} = \frac{\frac{k_h}{\Delta x^2}(\phi_{p1} + \phi_{p3}) + \frac{k_v}{\Delta y^2}(\phi_{p2} + \phi_{p4})}{2\left(\frac{k_h}{\Delta x^2} + \frac{k_v}{\Delta y^2}\right)} \quad (26)$$

Outra forma de verificar a equação (26) seria aplicando a equação da continuidade.

$$q_{3 \rightarrow 0} + q_{2 \rightarrow 0} = q_{0 \rightarrow 4} + q_{0 \rightarrow 1} \quad (27)$$

Sendo

$$q_x = k_h \frac{\partial\phi_p}{\partial x} A_x; \quad q_y = k_v \frac{\partial\phi_p}{\partial y} A_y \quad (28)$$

Então

$$k_h \left[\frac{\phi_{p3} - \phi_{p0}}{\Delta x} \right] 2\Delta y + k_v \left[\frac{\phi_{p2} - \phi_{p0}}{\Delta y} \right] 2\Delta x = k_v \left[\frac{\phi_{p0} - \phi_{p4}}{\Delta y} \right] 2\Delta x + k_h \left[\frac{\phi_{p0} - \phi_{p1}}{\Delta x} \right] 2\Delta y$$

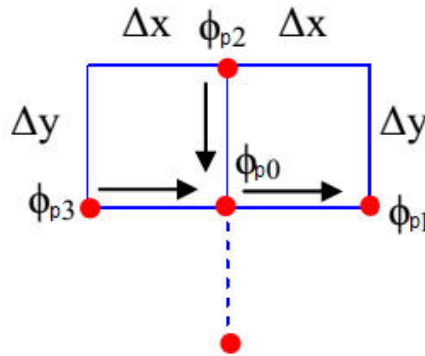
Logo

$$\phi_0 = \frac{\frac{k_h}{\Delta x^2}(\phi_{p1} + \phi_{p3}) + \frac{k_v}{\Delta y^2}(\phi_{p2} + \phi_{p4})}{2\left(\frac{k_h}{\Delta x^2} + \frac{k_v}{\Delta y^2}\right)}$$

Utilizando-se a equação da continuidade para determinar como proceder no que diz respeito as condições de contorno, verifica-se que a definição desta é de fundamental importância quando bem estabelecida. No caso estudado, a barragem de terra está sobre uma camada de material impermeável (rocha). Assim existem dois casos possíveis de ser analisados no que diz respeito as configuração das moléculas de diferenças na fundação da barragem em análise:

- 1- A impermeabilidade é dada em apenas uma direção.

Figura 12 – Molécula de diferenças finitas com impermeabilidade em uma direção.



Fonte: O autor (2015).

Aplicando a equação da continuidade, de acordo com a Figura 12, tem-se

$$q_{3 \rightarrow 0} + q_{2 \rightarrow 0} = q_{0 \rightarrow 1} \quad (28)$$

Então

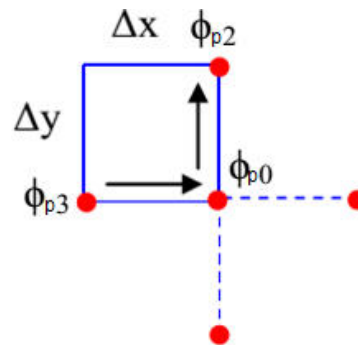
$$k_h \left[\frac{\phi_{p3} - \phi_{p0}}{\Delta x} \right] \Delta y + k_v \left[\frac{\phi_{p2} - \phi_{p0}}{\Delta y} \right] 2\Delta x = k_h \left[\frac{\phi_{p0} - \phi_{p1}}{\Delta x} \right] \Delta y \quad (29)$$

E portanto

$$\phi_0 = \frac{\frac{k_h}{\Delta x^2} (\phi_{p1} + \phi_{p3}) + \frac{k_v}{\Delta y^2} (2\phi_{p2})}{2 \left(\frac{k_h}{\Delta x^2} + \frac{k_v}{\Delta y^2} \right)} \quad (30)$$

2- A impermeabilidade é dada em duas direções.

Figura 13 – Molécula de diferenças finitas com impermeabilidade em duas direções.



Fonte: O autor (2015)

Aplicando a equação da continuidade, de acordo com a Figura 13 tem-se

$$q_{3 \rightarrow 0} = q_{0 \rightarrow 2} \quad (31)$$

Então

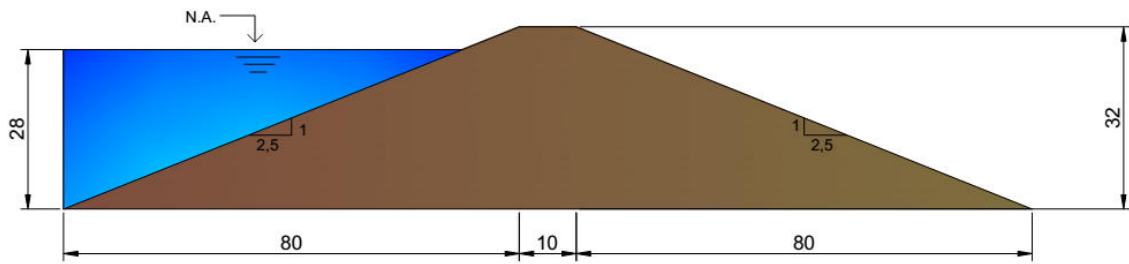
$$k_h \left[\frac{\phi_{p3} - \phi_{p0}}{\Delta x} \right] \Delta y = k_v \left[\frac{\phi_{p0} - \phi_{p2}}{\Delta y} \right] \Delta x \quad (32)$$

E portanto

$$\phi_0 = \frac{\frac{k_h}{\Delta x^2} \phi_{p3} + \frac{k_v}{\Delta y^2} \phi_{p2}}{\left(\frac{k_h}{\Delta x^2} + \frac{k_v}{\Delta y^2} \right)} \quad (33)$$

São apresentadas a seguir as dimensões da barragem em estudo na Figura 14

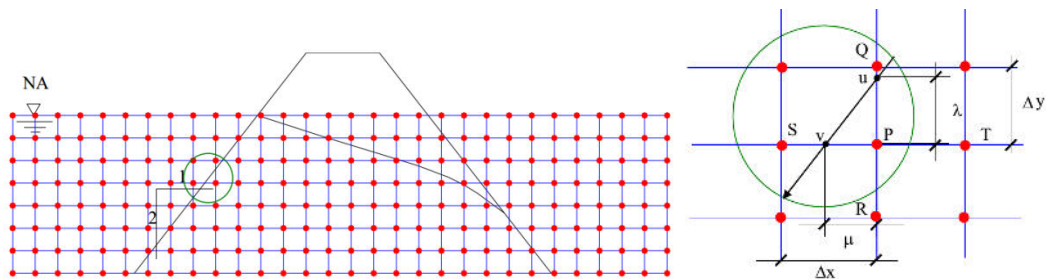
Figura 14 – Geometria da barragem (Dimensões em metro).



Fonte: O autor (2015)

Para que não houvesse problemas de contornos irregulares nos taludes da barragem, foi necessário manter os taludes de montante e de jusante com a mesma inclinação. Foi criada uma malha de pontos discretos onde a distância horizontal entre dois pontos da malha é igual a 0,5m e a distância vertical entre dois pontos é igual a 0,2 m. Desta forma, todos os pontos do contorno da malha passam pelo contorno da barragem. A Figura 15 mostra o problema citado.

Figura 15 – Contornos irregulares.



Fonte: Desconhecido

$$\frac{\overline{Pu}}{\overline{PQ}} = \lambda \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

$$\frac{\overline{Pv}}{\overline{PQ}} = \mu \quad 0 \leq \mu \leq 1$$

Para a solução das equações algébricas (equação 26), foi utilizada uma planilha eletrônica que possibilita o cálculo iterativo já que a informação contida em um nó depende da informação do nó vizinho, e a informação deste depende da informação do nó anterior.

3.2.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a solução do problema, além de aplicar a equação 26 é importante definir as condições do contorno. As condições de contorno dependem de cada caso estudado e estes são apresentados a seguir. A Figura 16 mostra em cada caso analisado os principais elementos que constituem um problema de uma barragem de terra referente a uma rede de fluxo, mostrando uma descrição numerada sucinta de cada elemento.

1 - Superfície equipotencial: Este potencial é a carga hidráulica que nesta superfície é constante e igual ao nível d'água. O potencial em qualquer ponto no interior da barragem é dada por

$$\phi = y + \frac{u}{\gamma_w} \quad (34)$$

Onde

y = cota do elemento em relação a um eixo de referência (tomado como a base inferior da barragem);

u = poro-pressão (pressão devido à água);

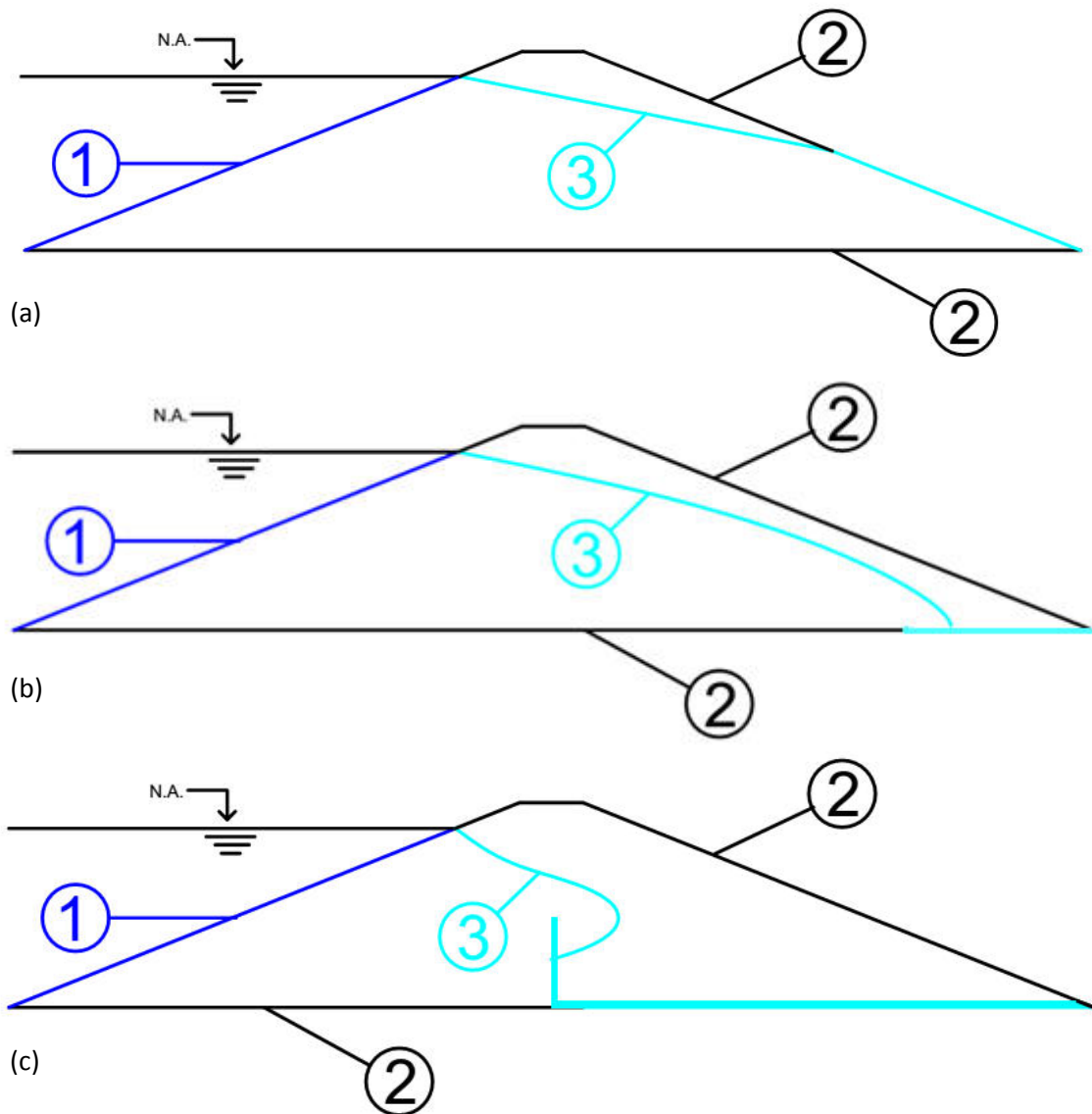
γ_w = Peso específico da água.

Assim, o valor da equipotencial é de 28m de carga hidráulica.

2 – Superfícies impermeáveis: A definição é simples. A base da barragem está assente sobre rocha (material impermeável), as demais superfícies estão em contato com o ar atmosférico, logo, da mesma forma que a água não penetra na rocha, a água também não percola através do ar, tornando assim o ar, um meio impermeável.

3 – Linha freática: É a linha que define a linha de fluxo superior. Os valores de poro-pressão abaixo desta linha são positivos, enquanto os valores de poro-pressão acima desta linha são negativos, desta forma, os valores de poro-pressão na linha freática são iguais a zero.

Figura 16 – Condições de contorno de uma barragem. a) Caso 1; b) Caso 2 e 4; c) Caso 3.



Fonte: O autor (2015)

Conhecendo agora os potenciais em (1) e (3) e as condições de (2) tem-se informações suficientes para modelar o problema aplicando o MDF na planilha eletrônica que está sendo desenvolvida (Excel).

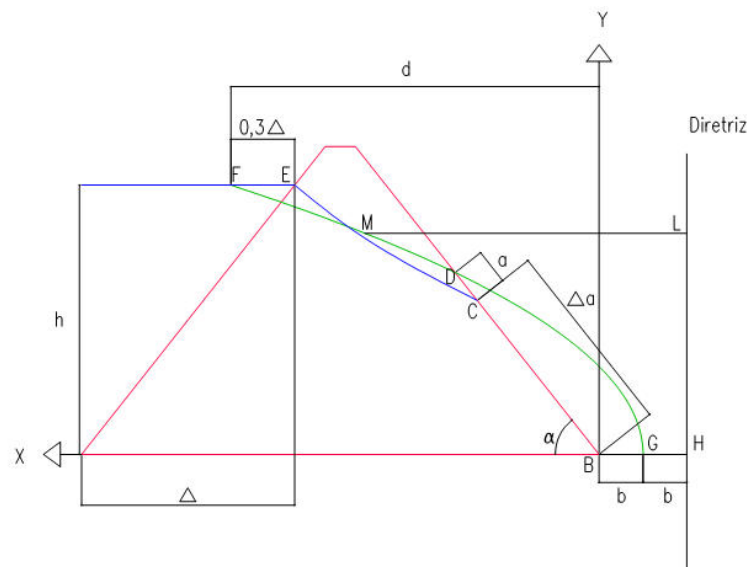
3.2.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇADO DA LINHA FREÁTICA

O traçado da linha freática depende do caso estudado, logo, para cada tipo de filtro e para cada nível d'água (máximo/mínimo). Assim, torna-se necessário o estabelecimento da linha freática da barragem. Para isto é necessário fazer a determinação da parábola de Casagrande que ajudará na análise de cada caso em análise.

Caso 1: Barragem sem filtro

Para estimar a forma da linha freática, foi utilizado o método da parábola básica de Casagrande. Este método consiste em determinar a parábola que se assemelha ao traçado da linha freática e em seguida fazer os devidos ajustes à curva no que diz respeito a ortogonalidade das linhas de fluxo.

Figura 17 – Solução de Casagrande para estimativa da linha freática



Fonte: O autor (2015).

A solução (linha freática) para o caso em análise via Método de Casagrande é mostrada na Figura 17.

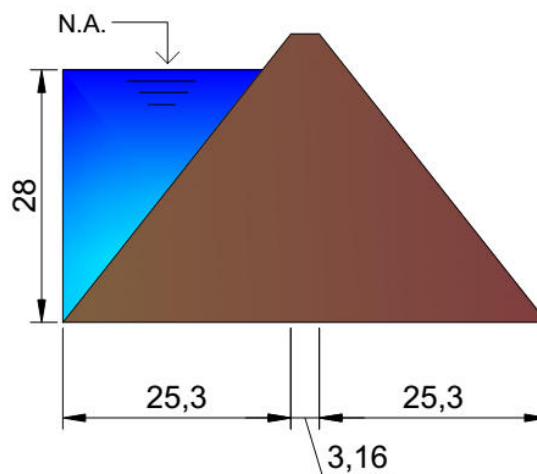
Como o solo é anisotrópico, ou seja, as permeabilidades horizontal e vertical são diferentes, torna-se necessário transformar a seção da barragem (Barragem transformada). Desta forma as dimensões horizontais devem ser reduzidas em

$$\sqrt{\frac{K_v}{K_h}} = \sqrt{\frac{1}{10}} = 0,31622776601683794 \quad (35)$$

Após a determinação da parábola de Casagrande e da linha freática, e traçado da rede de fluxo as dimensões horizontais retornam aos comprimentos originais.

As dimensões da seção reduzida da barragem são mostradas na Figura 18.

Figura 18 – Barragem com as dimensões horizontais reduzidas (dimensões em metros).



Fonte: O autor (2015).

A parábola é uma curva em que qualquer ponto é equidistante de um ponto chamado foco e de uma reta denominada diretriz. Assim, $MB=ML$ como pode ser observado na Figura 17, nos triângulos retângulo MIB e MHL, tem-se respectivamente

$$MB = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (36)$$

e

$$ML = 2b + x \quad (37)$$

portanto igualamos as equações 34 e 35 e tendo as coordenadas do ponto F, tem-se $x=d$ e $y=h$, assim

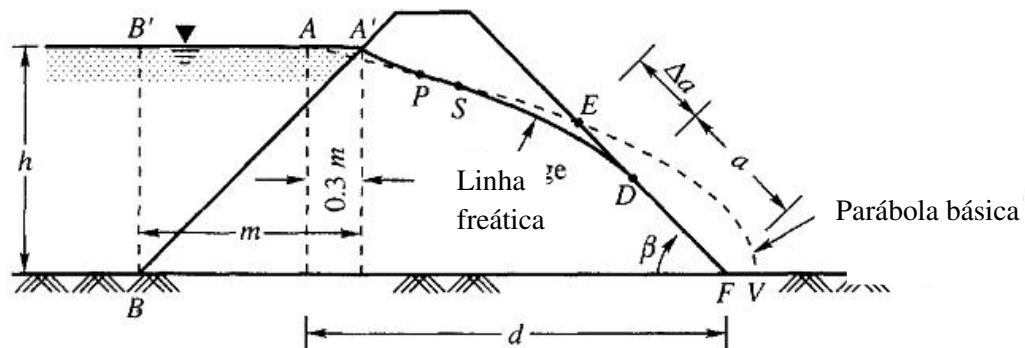
$$b = \frac{1}{2} \left[(d^2 + h^2)^{1/2} - d \right] \quad (38)$$

Como os valores de d e h são conhecidos, determina-se b . Com o valor de b conhecido, atribui-se valores à y e calcula-se x .

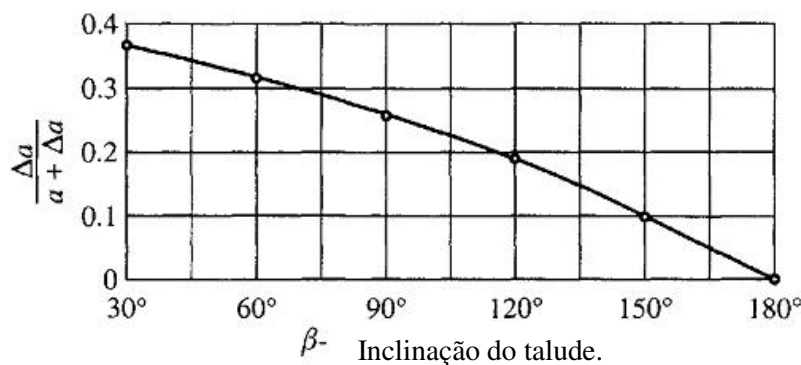
$$x = \frac{y^2 - 4b^2}{4b} \quad (39)$$

Após a determinação da parábola, ajusta-se a curva à montante e à jusante. À montante, sabe-se que a linha 1 da Figura 16 é uma equipotencial, assim, as linhas de fluxos são sempre perpendiculares às linhas de equipotencial. À jusante, foi utilizado o método da correção da parábola de Casagrande, que apresentou resultado satisfatório no ponto onde a linha freática coincide com o talude de jusante.

Figura 19 – Construção da linha freática. a) Solução da linha freática; b) condição do talude de jusante



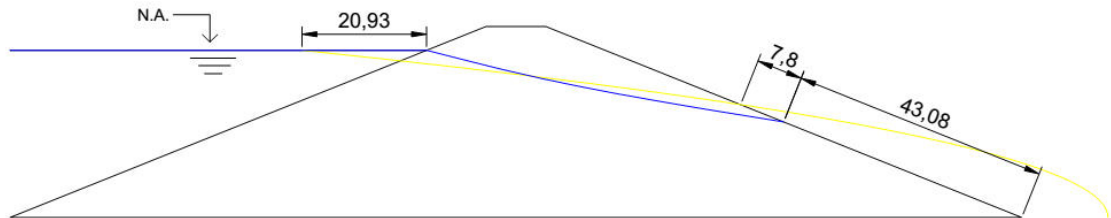
(a)



(b)

Os resultados após as dimensões horizontais terem voltado ao normal são mostrados na Figura 20.

Figura 20 – Solução para a linha freática para o primeiro caso.



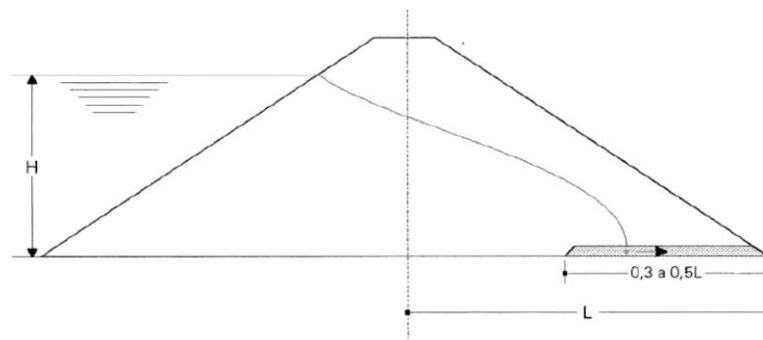
Fonte: O autor (2015)

Caso 2: Barragem com filtro tapete

O filtro tem como finalidades o deslocamento da linha freática (afastando do talude de jusante), a redução das poro-pressões à jusante, eliminação de possível erosão interna (*piping*) e o escoamento da água de modo seguro para a barragem.

Seja $2L$ o comprimento total da barragem, o comprimento do filtro depende da posição que se queira dar a linha freática. A distância do eixo da barragem ($L = B/2 + B_{\text{jusante}}$) com o comprimento do tapete drenante deve estar entre $0,3L \leq L_{\text{tapete}} \leq 0,5L$. Adota-se um valor para projeto.

Figura 21 – Determinação no comprimento do filtro tipo tapete.



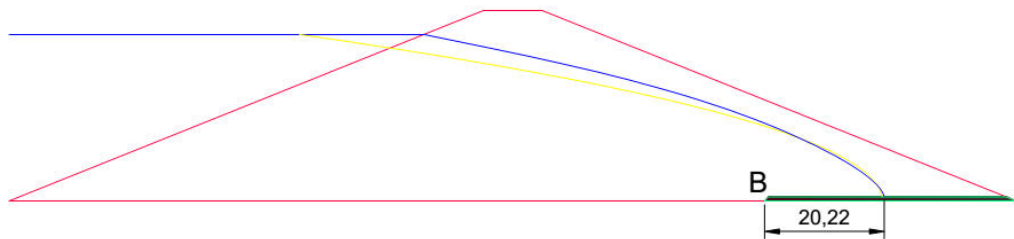
Fonte: Autor desconhecido

Foi adotado o valor de $0,5L$ para o comprimento do filtro tipo tapete.

$$L_{\text{tapete}} = \frac{170\text{m}}{4} = 42,5\text{m} \quad (40)$$

O procedimento da determinação da linha freática é semelhante ao caso 1, porém a única diferença é que o ponto B é deslocado para o início do filtro (Figura 22).

Figura 22 – Solução para a linha freática para o segundo caso.



Fonte: O autor (2015).

Caso 3: Barragem com filtro chaminé

As informações com relação a geometria de filtros não se encontra com facilidade na bibliografia sobre barragem. É muito comum informações com relação a granulometria do filtro a ser utilizado. Assim por exemplo, o estabelecimento do comprimento do filtro horizontal é estabelecido segundo recomendações práticas de engenheiros experientes que trabalham em projetos e execução de barragens.

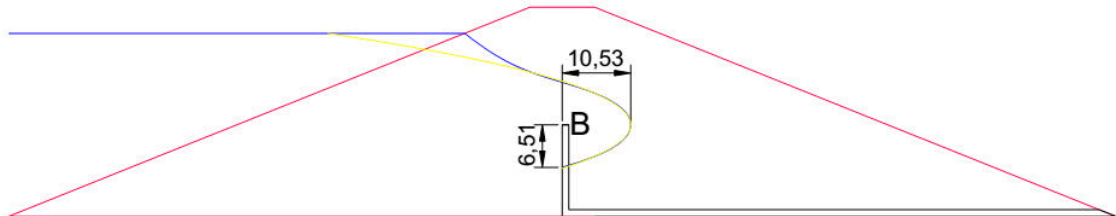
“Até o meio da barragem faço tudo para a água não chegar. A partir daí faço tudo para a água sair da maneira que quero”

“Arthur Casagrande”

Para este tipo de filtro (composto por um tapete horizontal com outro vertical/inclinado) o ideal (segundo a literatura) é que a altura do filtro seja igual ao nível d'água, porém, desta forma, não seria possível a construção da parábola básica de Casagrande, isto devido à condição de que o ponto E da Figura 17 estaria alinhados ao vértice e ao foco da parábola descaracterizando assim, a parábola. Optou-se por determinar a altura de 14 metros para a altura do filtro.

O mesmo procedimento para determinação da parábola de Casagrande adotado nos dois primeiros casos é adotado quando o filtro agora é tipo chaminé, o que diferencia é a posição do ponto B.

Figura 23 – Solução para a linha freática para o terceiro caso.

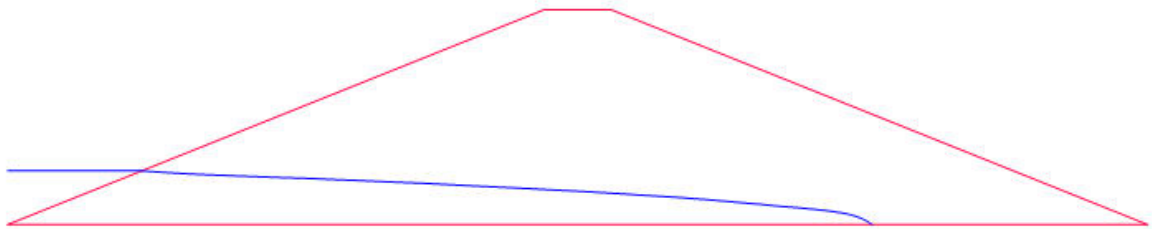


Fonte: O autor (2015).

Caso 4: Nível mínimo d'água, barragem com filtro tipo tapete

Este caso é semelhante ao do caso 2, os procedimentos para a determinação da linha freática são iguais, portanto, a única mudança é a cota do nível d'água. A solução é mostrada na Figura 24.

Figura 24 – Solução para a linha freática para o quarto caso.



Fonte: O autor (2015).

De posse dos potenciais (ou cargas hidráulicas totais) nos pontos discretos da malha de diferenças finitas, todas as demais variáveis de projeto podem ser obtidas. Estas incluem: poro-pressão, gradientes, velocidades e vazão. Caso sejam necessários valores em pontos internos à malha, pode-se fazer uso de algum tipo de interpolação.

3.2.4 PORO-PRESSÃO

A poro-pressão ou pressão neutra, pode ser calculada pela equação (41)

$$u = \gamma_w(\phi - y) \quad (41)$$

Onde

u = poro-pressão;

γ_w = peso específico da água;

ϕ = carga hidráulica total;

y = cota do ponto em relação ao nível de referência adotado (superfície rochosa).

3.2.5 GRADIENTES HIDRÁULICOS

O gradiente em um ponto no interior da barragem é o vetor $\vec{i} = (i_x, i_y)$.

Onde:

$$i_x = \frac{\Delta\phi}{\Delta x} = \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{\Delta x} \quad (42)$$

$$i_y = \frac{\Delta\phi}{\Delta y} = \frac{\phi_j - \phi_{j+1}}{\Delta y}$$

Assim, a partir do cálculo dos potenciais, os gradientes surgem pela razão entre a variação de potencial entre dois nós consecutivos e a distância entre os mesmos para as direções x e y .

3.2.6 VELOCIDADES

A velocidade em um ponto no interior da barragem dado pelo vetor $\vec{v} = (v_x, v_y)$.

Sendo,

$$v_x = k_h i_x$$

$$v_y = k_v i_y \quad (43)$$

Onde: k_h e k_v são as permeabilidades horizontal e vertical respectivamente.

3.2.7 PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DA PLANILHA

Com o conhecimento das condições de contorno do problema e aplicando a equação de Laplace simplificada em expressões algébricas, constrói-se a malha de diferenças finitas na planilha (Excel). A seguir serão descritos os passos feitos para a elaboração da planilha.

1º passo - O primeiro problema encontrado é como fazer com que o programa calcule iterativamente os valores dos potenciais, visto que existe a dependência nodal entre os pontos da malha. Para se conseguir resolver este problema segue-se o procedimento descrito via configuração da planilha:

Arquivo → Opções → Fórmulas, e aparecerá a imagem da Figura 25.

Figura 25 – Habilitar cálculo iterativo no Excel.



Fonte: O autor (2015).

Após habilitar o cálculo iterativo, escolhe-se o número de iterações e a precisão como condição de parada de cálculo. Neste trabalho, foi colocado o número máximo de iterações que é igual 32.767, que provavelmente seria suficiente para garantir a convergência do cálculo. Caso contrário se os valores não convergissem, uma nova tentativa seria usada até se atingir a convergência.

2º passo - Determina-se em forma de desenho com auxílio de cores o contorno da barragem na planilha e inserindo-se inicialmente os valores da carga hidráulica no contato entre a água e a superfície do talude de montante.

3º passo – Escrever a fórmula obtida pela simplificação da equação de Laplace (Equação 26).

4º passo – Após a determinação do traçado da linha freática, aproxima-se da melhor forma às coordenadas da barragem na planilha com valores iguais à cota da célula, isso porque a poro-pressão nesta linha é nula, e, portanto os potenciais dos elementos sobre a linha são iguais à própria cota.

Figura 26 – Traçado da linha freática no Excel.

	A	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU
28	28,8											
29	28,6											
30	28,4											
31	28,2											
32	28		28									
33	27,8	28	27,9333	27,8	27,8							
34	27,6	28				27,6						
35	27,4						27,4	27,4				
36	27,2								27,2			
37	27									27	27	
38	26,8											26,8
39	26,6											

Fonte: O Autor (2015).

Onde as células em magenta representam a linha freática com valores de potencial igual à cota que está em vermelho na figura. Além disso, o filtro também faz parte da linha freática, deste modo, o potencial nas células que compõem o filtro também serão iguais às suas respectivas cotas.

5º passo - Escrever a equação 30 e 33 para o contorno de superfície impermeáveis.

6º passo – Repetir o passo 3 para todas as demais células no interior da barragem.

Após estes passos, o Excel calcula automaticamente todos os valores. Dependendo do número de células e da precisão utilizada, o procedimento do cálculo iterativo pode levar desde alguns segundos até horas. Neste trabalho o tempo de cálculo não chega a ser superior a 20 (vinte) minutos.

A partir do valor do potencial, calcula-se todos os outros parâmetros descritos anteriormente (poro-pressão, gradientes hidráulicos e velocidades).

Para que este documento não ficasse muito extenso, foram criados anexos para mostrar os resultados obtidos que não foram incluídos no corpo principal deste trabalho. O anexo A (PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE UMA REDE DE FLUXO) mostra a explicação passo a passo dos procedimentos para determinação da rede de fluxo no SEEP/W, com objetivo de guiar um possível trabalho futuro que dê continuidade a este trabalho.

3.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES

O objetivo desta fase do trabalho é obter o fator de segurança quanto à estabilidade dos taludes nas três fases citadas anteriormente. Diferente do estudo de fluxo, nesta etapa será considerado apenas a barragem com filtro tipo tapete, para este fim, utilizou-se o método de Bishop-simplificado.

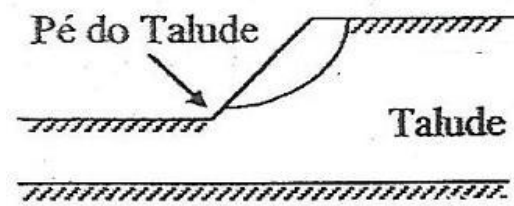
3.3.1 O SIGNIFICADO DE RUPTURA DE UM TALUDE

Talude é a superfície que forma um ângulo com a horizontal definindo uma fronteira entre o interior do solo e atmosfera. Quando no solo, a tensão cisalhante atuante é maior do que a resistência ao cisalhamento do solo ocorre à ruptura. Isto significa dizer que, o mecanismo de forças cisalhantes atuante é denominado de deslizamento da massa de solo na forma de movimento em uma superfície de ruptura. Uma vez atingida à ruptura, a massa de solo contida na superfície de deslizamento ocorre rapidamente, todavia, isto se refere a uma escala relativa de tempo (CARVALHO, 2012)

A ruptura de um talude pode acontecer de duas maneiras:

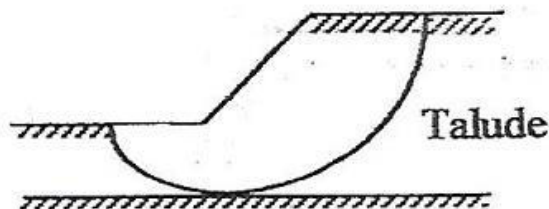
- a) Ruptura superficial: quando a superfície de ruptura fica contida no talude, passando acima da base (Figura 27);
- b) Ruptura profunda. Quando a superfície de ruptura não fica contida só no talude, atingindo uma parte do solo abaixo do pé do talude (Figura28).

Figura 27 – Superfície de ruptura superficial.



Fonte: CARVALHO, J. Q. (2012).

Figura 28 – Superfície de ruptura profunda.



Fonte: CARVALHO, J. Q. (2012).

3.3.2 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA

Como dito no item 3, a análise de estabilidade dos taludes deve ser feita nas três fases.

São elas:

- a) Fase final de construção;
- b) Fase reservatório cheio;
- c) Fase esvaziamento rápido.

3.3.2.1 FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO

A construção de uma barragem de terra é feita a partir da colocação do solo seguida de compactação em camadas horizontais, na condição de umidade ótima e peso específico aparente máximo determinado em laboratório.

Nesta fase, considera-se que a barragem ainda não está em operação e, portanto o solo mantém seu peso específico (compactado).

Para a análise da estabilidade na fase final de construção, é recomendável a construção do gráfico “fator de segurança (FS) vs. Parâmetro de poro-pressão B”. Para tanto, atribuem-se valores a B, e determinam-se os respectivos FS. Neste trabalho foram adotados os seguintes valores para o parâmetro $B = 0,10; 0,15; 0,20$. (CARVALHO, 2012).

3.3.2.2 FASE RESERVATÓRIO CHEIO

Na condição em que o reservatório está cheio, o estado de tensão efetiva pode ser bem caracterizado (inclusive a poro-pressão), uma vez que se estabelece uma condição de fluxo contínuo e a consequente definição da rede de fluxo (CARVALHO, 2012).

Nesta fase, a barragem começa a operar com sua capacidade máxima de projeto, isto é, com a máxima cota do nível d’água. Com base os resultados obtidos na etapa do cálculo da rede de fluxo como o traçado da linha freática, e sabe-se que a parte de solo abaixo desta linha está submerso em água e a parte acima da linha está seco.

Nas fatias, devem ser consideradas as regiões de solo seco e de solo submerso. O peso específico do solo submerso é calculado pela equação 44.

$$\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (44)$$

Onde

γ_{sat} = Peso específico do solo saturado (quando os vazios são preenchidos com água);

γ_w = Peso específico da água.

3.3.2.3 FASE ESVAZIAMENTO RÁPIDO

A condição de esvaziamento rápido é aquela estabelecida quando o reservatório ou nível d’água atinge o ponto mais baixo, chegando a baixar de 10cm a 15cm por dia. É uma condição das mais favoráveis para ocorrer a ruptura. Antes do rebaixamento do nível d’água, a distribuição da poro-pressão é governada pelas condições de equilíbrio do fluxo d’água através do maciço. O esvaziamento rápido estabelece novos limites para o fluxo d’água e um fluxo relativamente “instável” é estabelecido até que seja definido um novo equilíbrio para a linha freática (CARVALHO, 2012).

Isto significa que o estado de tensões é alterado, pois a região do maciço entre as cotas máxima e mínima do nível d'água que continha o solo submerso, agora está apenas saturado, ou seja, seus vazios estão preenchidos de água mas estão ainda acima da cota mínima do nível d'água. Logo, a linha freática terá um novo traçado iniciando no ponto de contato entre o nível d'água e o talude de montante e seguirá a linha que separa as regiões de solo seco e saturado. A Figura 29 mostra este comportamento.

Figura 29 – Nova conformação da linha freática.



Fonte: CARVALHO, J. Q. (2012).

3.3.3 PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

Inicialmente para a determinação do fator de segurança, foi utilizada uma planilha do Excel para auxiliar os cálculos permitindo uma melhor interpretação dos valores. Em seguida, foi comparado com os resultados obtidos a partir do programa SLOPE/W do pacote GeoStudio.

3.3.3.1 FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO

Como as declividades dos taludes são iguais, foi calculado apenas o fator de segurança do talude de jusante devido à existência do filtro.

O fator de segurança segundo o método de Bishop-Simplificado é dado pela equação 45.

$$FS = \frac{1}{\sum P \sin \alpha} \Sigma \{ c_b + \tan \phi [P(1 - B)] \} \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{FS}} \quad (45)$$

A partir da equação 45, inicia-se uma série de etapas quem possibilitam o cálculo do fator de segurança. A seguir serão apresentados os passos necessários para solução do problema proposto.

Passo 1 – Definição de uma malha de pontos que representarão os centros das circunferências das possíveis superfícies de ruptura. Em seguida, desenhar círculos que tangenciam a fundação da barragem com centros nestes pontos da malha. Em seguida, criar fatias como mostrada na Figura 6. Para cada fatia, deve-se medir suas alturas e os comprimentos das bases, em seguida, a partir do centro da circunferência, traçar linhas que passam pelo ponto mais baixo do plano paralelo aos cortes que passam pelo centro da base, e assim, medir os ângulos que estas linhas fazem com a vertical.

Passo 2 - De posse dos dados geométricos, se desenvolve a planilha que é mostrada na Figura 30.

Figura 30 – Tabela para determinação do fator de segurança para fase final de construção pelo método de Bishop-Simplificado.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tipo	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m ³)	P (kN)	P·sin(α)	c	c·b	ϕ	B	P·(1 - B)·tan(ϕ)	c·b + P·(1 - B)·tan(ϕ)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi_1) \cdot \tan(\alpha)}{CSa_1} \right)}$	CSa ₁

Fonte: O Autor (2015).

Coluna 1 = Tipo do solo (função), maciço ou filtro;

Coluna 2 = Numeração das fatias;

Coluna 3 = Comprimento da base da fatia em metros;

Coluna 4 = Altura média da fatia em metros;

Coluna 5 = Ângulo que cada reta que se inicia no centro da circunferência de ruptura e passa pelo ponto médio mais baixo da fatia faz com a vertical;

Coluna 6 = Peso específico do solo compactado em kN/m³;

Coluna 7 = Peso da fatia de solo para 1 metro de espessura em kN (Coluna3*Coluna4*Coluna6);

Coluna 8 = (Coluna 7*Coluna5);

Coluna 9 = Coesão do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 10 = (Coluna9*Coluna3);

Coluna 11 = Ângulo de atrito do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 12 = Parâmetro de poro-pressão;

Coluna 13 = (Coluna7*(1-Coluna12)*tan(Coluna11));

Coluna 14 = (Coluna10+Coluna 13);

Coluna 15 = (sec(Coluna5)/(1+(tan(Coluna11)*tan(Coluna5))/FSa1);

Coluna 16 = (Coluna 14*Coluna15)

FS = SOMA(Coluna16)/SOMA(Coluna8).

Passo 3 – Como o cálculo é iterativo e o usuário deve inicialmente chutar um valor para o fator de segurança usado na coluna 15, foi utilizada a ferramenta *Solver*, tendo como objetivo que o módulo da diferença entre FSa_1 e FS fosse o menor possível (tendendo a zero), variando a célula correspondente ao FSa_1 estimado inicialmente.

Passo 4 – Após obter o fator de segurança para cada superfície de ruptura, o fator de segurança à estabilidade do talude será tomado como o menor fator de todas as superfícies.

3.3.3.2 FASE RESERVATÓRIO CHEIO

Para esta fase, o procedimento é semelhante, porém deve-se tomar cuidado já que quando o reservatório está cheio, há região de solo submerso em água.

A planilha para esta fase deve ser adaptada de forma que leve em consideração o nível d'água, a planilha desta fase é mostrada na Figura 31.

Figura 31 – Tabela para determinação do fator de segurança para fase reservatório cheio pelo método de Bishop-Simplificado.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tipo	Fatia (n°)	base (m)	h_{ab} (m)	h_{bc} (m)	h_p (m)	α (°)	$\gamma_{m\acute{a}x}$ (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	γ_{sub} (kN/m³)	$P1 = b_{ab} \cdot b \cdot \gamma_{m\acute{a}x}$	$P2 = h_{bc} \cdot b \cdot \gamma_{sub_sat}$	$(P1 + P2) \cdot \sin\alpha$
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$\mu_s = h_p \cdot \gamma_{\acute{a}gua}$	$\mu_s \cdot b$	ϕ (°)	c (kPa)	c-b	$tg(\phi)$	$\chi = (P1 + P2 - \mu_s \cdot b) \cdot \tan(\phi)$	c-b + χ	$tg(\alpha)$	$sec(\alpha)$	$1 + \frac{sec(\alpha) \cdot \tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa}$	Csa	

Fonte: O Autor (2015).

Coluna 1 = Tipo do solo (função), maciço ou filtro;

Coluna 2 = Numeração das fatias;

Coluna 3 = Comprimento da base da fatia em metros;

Coluna 4 = Altura com solo natural na fatia correspondente à altura média na fatia;

Coluna 5 = Altura com solo submerso na fatia correspondente à altura média na fatia;

Coluna 6 = Diferença de altura entre a intersecção entre a linha freática e o extremo da fatia e o ponto mais baixo do centro da fatia;

Coluna 7 = Ângulo que cada reta que se inicia no centro da circunferência de ruptura e passa pelo ponto médio mais baixo da fatia faz com a vertical;

Coluna 8 = Peso específico do solo compactado em kN/m^3 ;

Coluna 9 = Peso específico do solo saturado em kN/m^3 ;

Coluna 10 = Peso específico do solo submerso em kN/m^3 ;

Coluna 11 = Peso da fatia de solo correspondente ao solo natural em kN;

Coluna 12 = Peso da fatia de solo correspondente ao solo “saturado” em kN;

Coluna 13 = $(\text{Coluna 11} + \text{Coluna 12}) * \text{Coluna 7}$;

Coluna 14 = $(\text{Coluna 6} * \gamma_{\text{água}})$;

Coluna 15 = Peso de água na fatia $(\text{Coluna 14} * \text{Coluna 3})$;

Coluna 16 = Ângulo de atrito do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 17 = Coesão do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 18 = $(\text{Coluna 17} * \text{Coluna 3})$;

Coluna 19 = $\tan(\text{Coluna 16})$;

Coluna 20 = $(\text{Coluna 11} + \text{Coluna 12} - \text{Coluna 15}) * \text{Coluna 19}$;

Coluna 21 = $\text{Coluna 18} + \text{Coluna 20}$;

Coluna 22 = $\tan(\text{Coluna 7})$;

Coluna 23 = $\sec(\text{Coluna 7})$;

Coluna 24 = $\text{Coluna 23} / (1 + \text{Coluna 19} * \text{Coluna 22} / \text{FSa})$

Coluna 25 = $\text{Coluna 21} * \text{Coluna 24}$

$\text{FS} = \text{SOMA}(\text{Coluna 25}) / \text{SOMA}(\text{Coluna 13})$.

3.3.3.3 FASE ESVAZIAMENTO RÁPIDO

Nesta fase, parte do solo está submerso, parte está saturado e parte está natural. A planilha fica agora como na Figura 32.

Figura 32 – Tabela para determinação do fator de segurança para fase esvaziamento rápido pelo método de Bishop-Simplificado.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tipo	Fatia (n°)	base (m)	h_{ab} (m)	h_{bc} (m)	h_{cd} (m)	α (°)	$\gamma_{\text{máx}}$ (kN/m³)	γ_{sat} kN/m³	γ_{sub} kN/m³	$P1 = h_{ab} \cdot b \cdot \gamma_{\text{máx}}$	$P2 = h_{bc} \cdot b \cdot \gamma_{\text{sub_sat}}$	$(P1 + P2) \cdot \sin \alpha$
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$\mu_s = h_{cd} \cdot \gamma_{\text{água}}$	$\mu_s \cdot b$	ϕ (°)	c (kPa)	$c \cdot b$	$\text{tg}(\phi)$	$\chi = (P1 + P2 - \mu_s \cdot b) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + \chi$	$\text{tg}(\alpha)$	$\sec(\alpha)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{\text{Csa}}}$	Csa	

Fonte: O Autor (2015).

Onde

Coluna 1 = Tipo do solo (função), maciço ou filtro;

Coluna 2 = Numeração das fatias;

Coluna 3 = Comprimento da base da fatia em metros;

Coluna 4 = Altura com solo natural na fatia correspondente à altura média na fatia;

Coluna 5 = Altura com solo saturado na fatia correspondente à altura média na fatia;

Coluna 6 = Altura com solo submerso na fatia correspondente à altura média na fatia;

Coluna 7 = Ângulo que cada reta que se inicia no centro da circunferência de ruptura e passa pelo ponto médio mais baixo da fatia faz com a vertical;

Coluna 8 = Peso específico do solo compactado em kN/m³;

Coluna 9 = Peso específico do solo saturado em kN/m³;

Coluna 10 = Peso específico do solo submerso em kN/m³;

Coluna 11 = Peso da fatia de solo correspondente ao solo natural em kN;

Coluna 12 = Peso da fatia de solo correspondente ao solo saturado mais o peso da fatia de solo correspondendo ao solo submerso em kN;

Coluna 13 = (Coluna 11+Coluna 12)*Coluna7;

Coluna 14 = (Coluna6* $\gamma_{\text{água}}$);

Coluna 15 = Peso de água na fatia (Coluna14*Coluna3);

Coluna 16 = Ângulo de atrito do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 17 = Coesão do solo de acordo com o tipo de ensaio adequado para cada fase de construção;

Coluna 18 = (Coluna 17*Coluna3);

Coluna 19 = $\tan(\text{Coluna16})$;

Coluna 20 = (Coluna11+Coluna12-Coluna15)*Coluna19;

Coluna 21 = Coluna18+Coluna20;

Coluna 22 = $\tan(\text{Coluna7})$;

Coluna 23 = $\sec(\text{Coluna7})$;

Coluna 24 = $\text{Coluna23}/(1+\text{Coluna 19}*\text{Coluna22}/\text{FSa})$

Coluna 25 = $\text{Coluna21}*\text{Coluna24}$

FS = $\text{SOMA}(\text{Coluna25})/\text{SOMA}(\text{Coluna13})$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados acerca da rede de fluxo e da estabilidade dos taludes calculados de forma independente de qualquer programa comercial de análise de problema geotécnicos foram comparados com os resultados do SEEP/W e SLOPE/W. A versão do programa utilizada para obtenção dos resultados foi a versão *Student*, que atende ao trabalho feito aqui, mas limita o usuário de fazer análises de problemas com malhas construídas com até 500 nós, impedindo refinamento de malhas em pontos alvo de análise.

São apresentados a seguir os resultados obtidos da análise de fluxo dos 4 casos estudados

- 1- Barragem com reservatório cheio, sem filtro;
- 2- Barragem com reservatório cheio, com filtro tapete;
- 3- Barragem com reservatório cheio, com filtro chaminé;
- 4- Barragem com reservatório no nível mínimo, com filtro tapete.

4.1 BARRAGEM COM RESERVATÓRIO CHEIO, SEM FILTRO

São apresentados a seguir os resultados obtidos pela planilha elaborada neste trabalho no que diz respeito as variáveis analisadas no estudo de fluxo da barragem de terra em questão, comparadas com os resultados obtidos no programa SEEP/W.

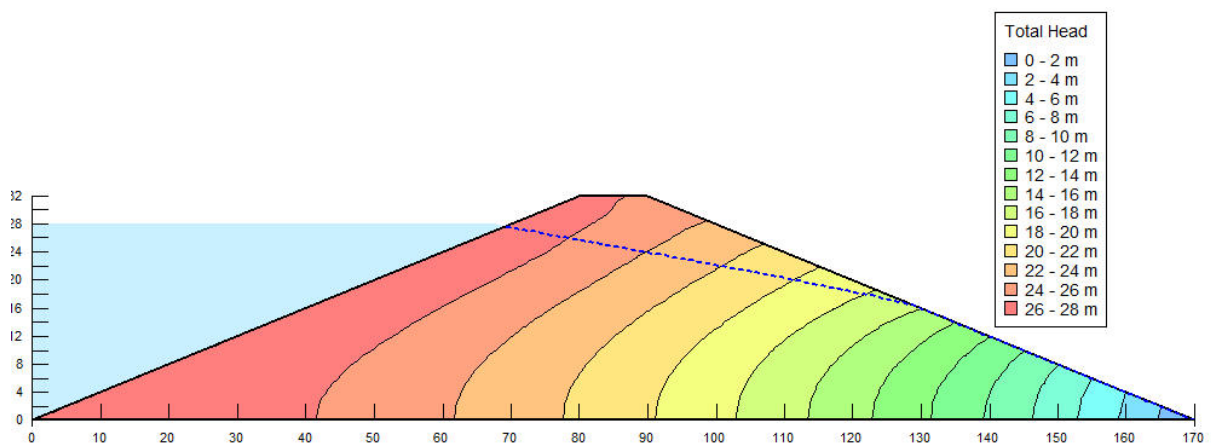
Equipotenciais

Figura 33 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 34 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 1).



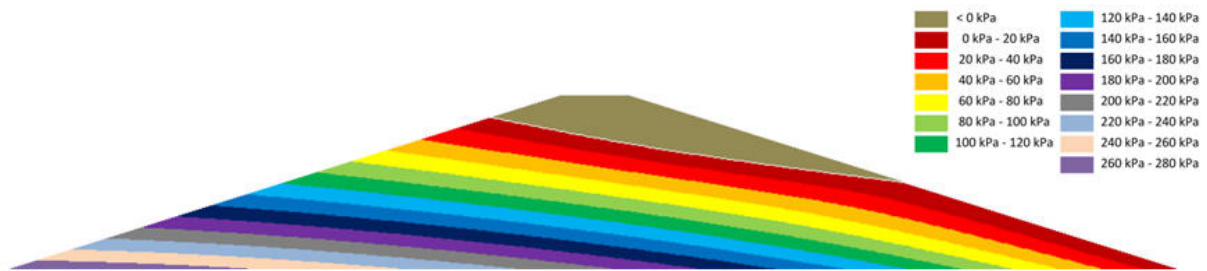
Fonte: O autor (2015).

Percebe-se que os resultados obtidos para as linhas equipotenciais foram bastante satisfatória, porém, a linha mais à esquerda curvou-se para a esquerda de maneira não-esperada (Figura 33) se comparado ao resultado obtido pelo programa SEEP/W (Figura 34). O inesperado não foi o fato da equipotencial ter voltado, e sim a magnitude, pois pela literatura a primeira e segunda equipotencial voltam um pouco, mas não tanto assim. Acredita-se que isto ocorreu por algum problema na condição de contorno do problema. Além disso, percebe-se que a linha freática da Figura 35 resultou o mesmo comportamento da solução encontrada pelo autor na Figura 20. Este resultado mostra a importância da existência de um filtro de modo que desvie esta linha freática protegendo o talude de jusante contra o

piping e é por este motivo que as barragens de terra da atualidade são sempre construídas tendo vista a prevenção contra o *piping* por meio de filtros de várias geometrias.

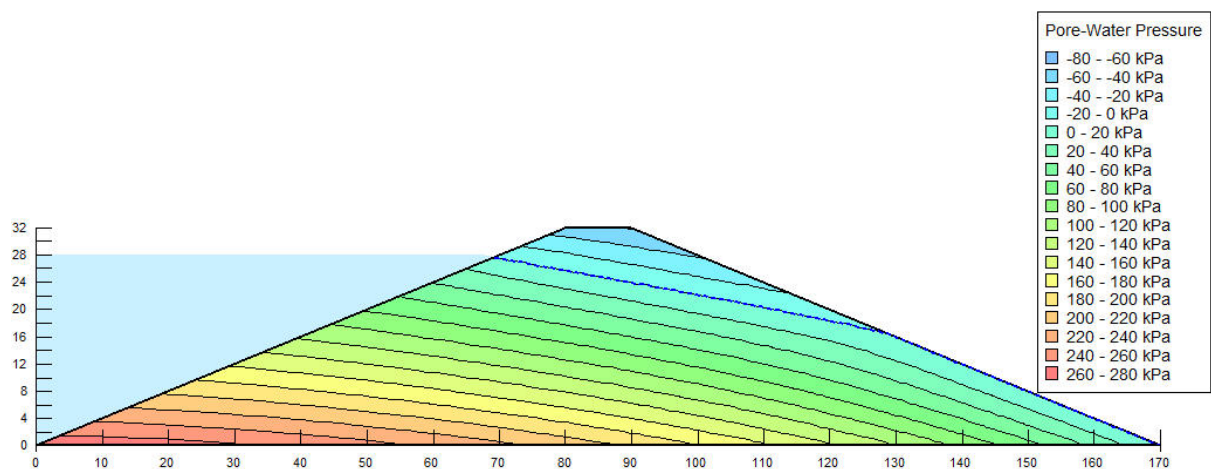
Linhas de Fluxo (Poro-pressão)

Figura 35 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 36 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 1).

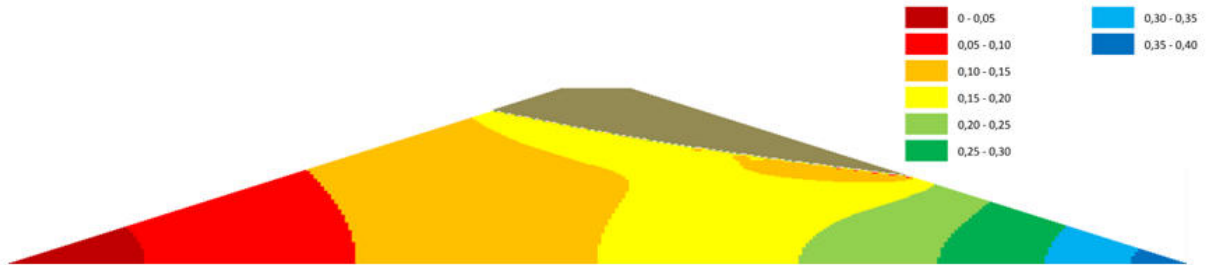


Fonte: O autor (2015).

Assim como as linhas equipotenciais tiveram um bom resultado, as linhas de fluxo (linhas de igual poro-pressão) também tiveram resultados satisfatórios. Estas linhas mostram o regime permanente do escoamento da água através da barragem, deixando claro que o talude de jusante não está protegido.

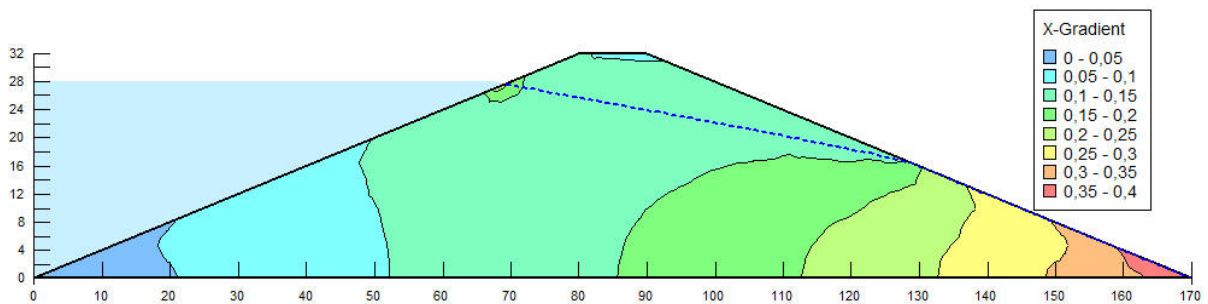
Gradiente-x

Figura 37 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 38 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 1).

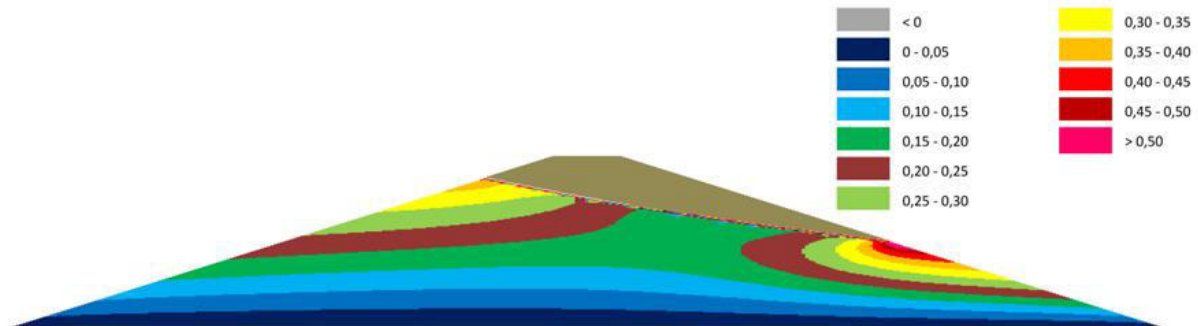


Fonte: O autor (2015).

Quanto ao gradiente hidráulico na direção horizontal, o resultado obtido pelo autor foi muito semelhante ao encontrado a partir do programa, apenas uma pequena região mais ao centro teve um comportamento diferente (Figura 37). Esta diferença se dá a partir da linha freática, e devido ao fato de que a versão utilizado do programa ter sido a versão *student*, que limita a malha a 500 pontos, possivelmente o programa pode falhar nessa região. Uma observação importante é que acima da linha freática existe gradientes, porém, estes não são importantes na análise, já que não há interesse no cálculo da velocidade de percolação numa região onde não há água.

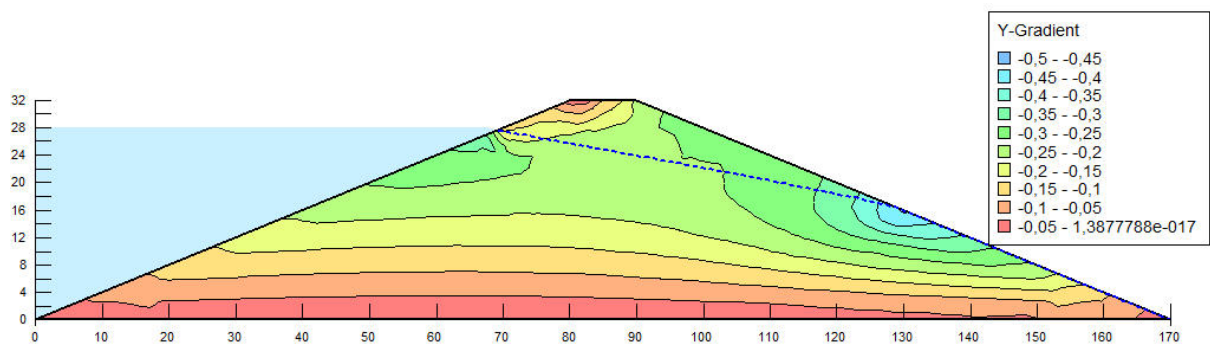
Gradiente-y

Figura 39 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 40 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 1).

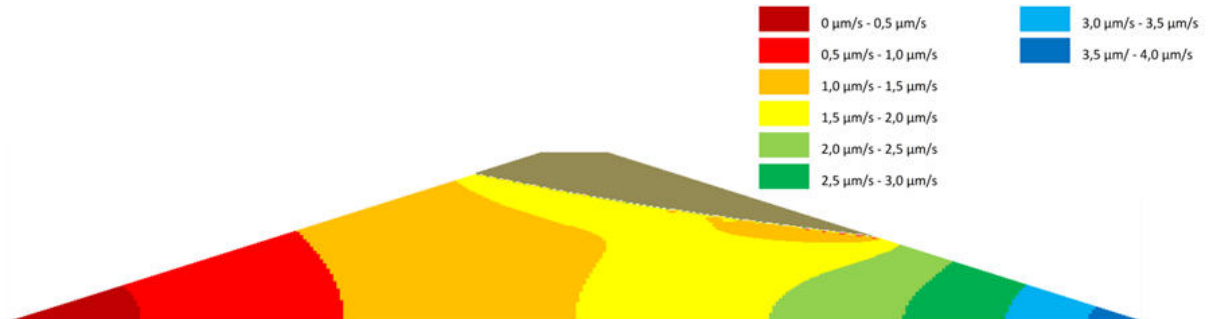


Fonte: O autor (2015).

Os resultados dos gradientes hidráulicos na direção vertical também tiveram bons resultados. O comportamento das linhas na parte inferior das Figuras 39 e 40 eram esperadas já que a base da barragem é impermeável, por isso a medida que se aproxima da base da barragem, o potencial diminui com menos intensidade.

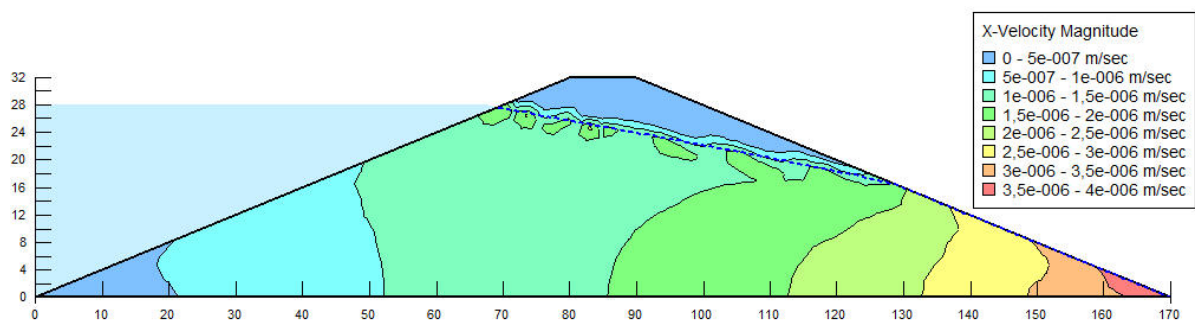
Velocidade-x

Figura 41 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 42 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 1).

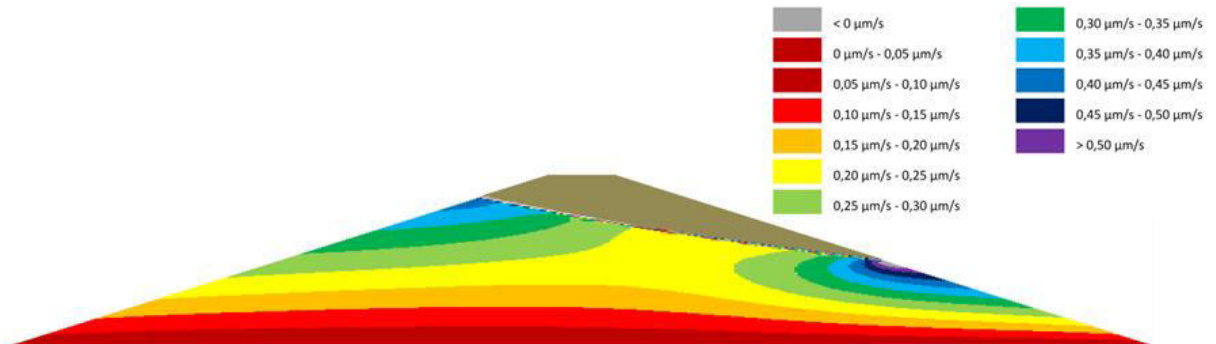


Fonte: O autor (2015).

Sobre a parcela horizontal da velocidade, esta seguiu o mesmo padrão do gradiente horizontal, porém, na Figura 42, o programa gerou algumas regiões com comportamento anômalo por razões ainda desconhecidas.

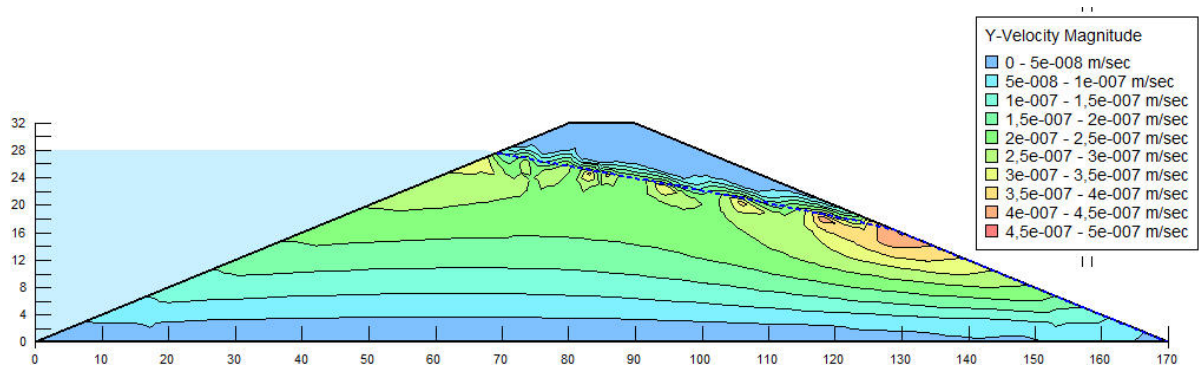
Velocidade-y

Figura 43 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Figura 44 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 1).



Fonte: O autor (2015).

Como se pode perceber, o comportamento do gráfico de velocidade segue o mesmo padrão do gradiente hidráulico, já que a velocidade é numericamente igual a um valor constante multiplicado pelo gradiente (Lei de Darcy).

4.2 BARRAGEM COM RESERVATÓRIO CHEIO, COM FILTRO TAPETE

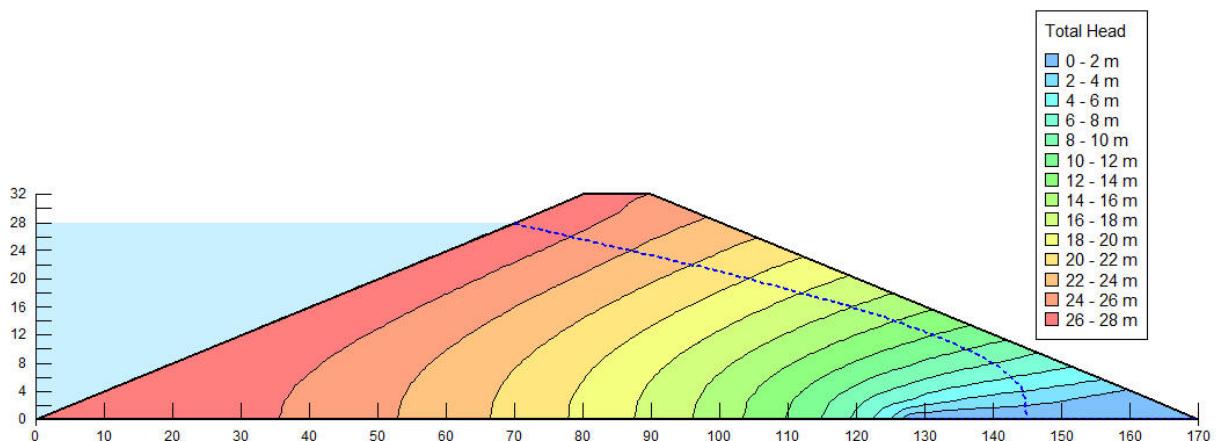
Equipotenciais

Figura 45 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

Figura 46 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 2).

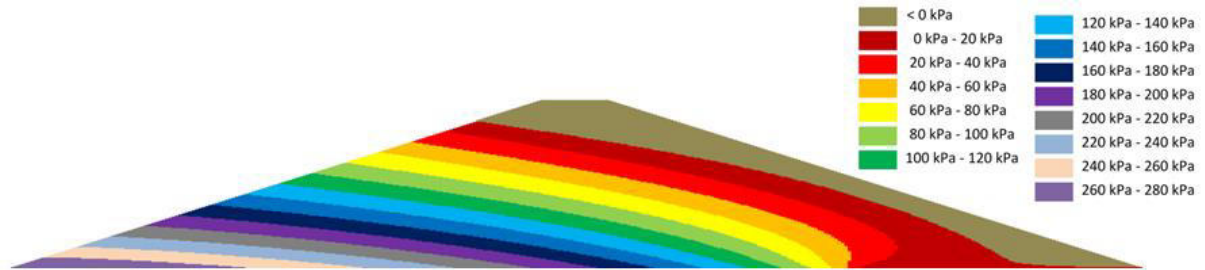


Fonte: O autor (2015).

Assim como o primeiro caso, tanto a linha freática como as linhas equipotenciais, porém, novamente a primeira curva (à esquerda) da Figura 45 não teve o mesmo comportamento comparado com o resultado do programa (Figura 46). A razão para este comportamento ainda não é conhecida, mas sabe-se que as condições de contorno são essenciais para um bom resultado, logo, a condição de contorno na parte superior do talude de montante pode não ter correspondido ao comportamento correto.

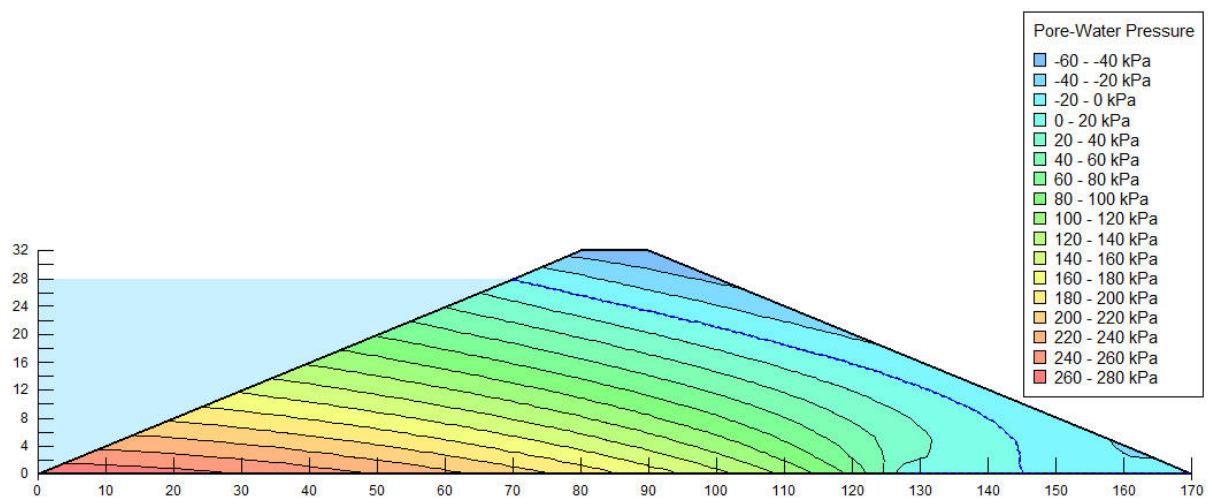
Linhas de Fluxo (Poro-presão)

Figura 47 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

Figura 48 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 2).

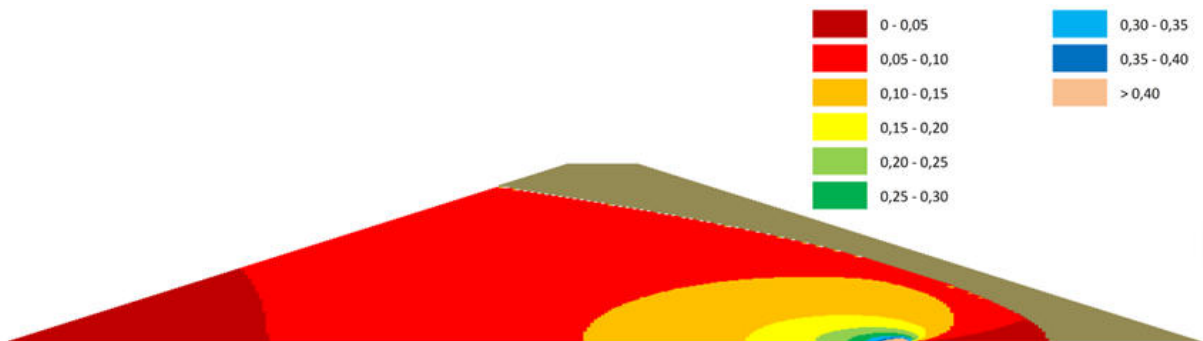


Fonte: O autor (2015).

É possível notar que para as linhas de fluxo nas Figuras 47 e 48, o comportamento foi exatamente o mesmo, além do comportamento da linha freática que foi “atraída” pelo filtro, isso mostra a importância de um sistema interno de drenagem para proteção do talude de jusante e consequentemente da barragem como um todo.

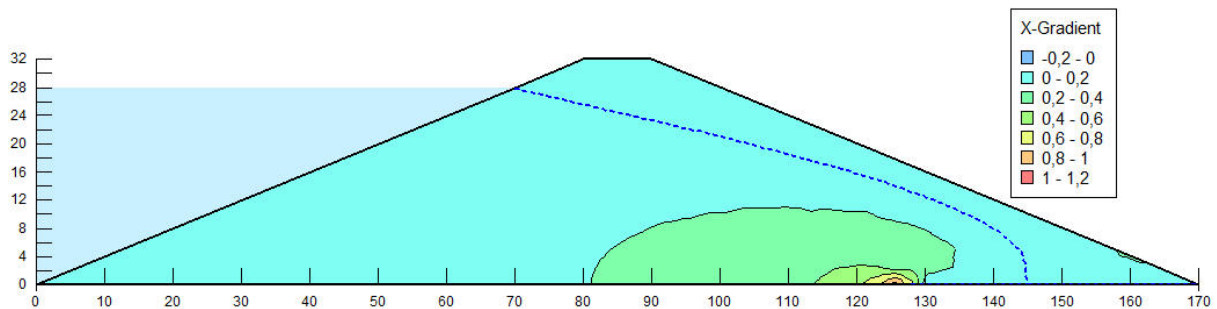
Gradiente-x

Figura 49 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

Figura 50 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 2).

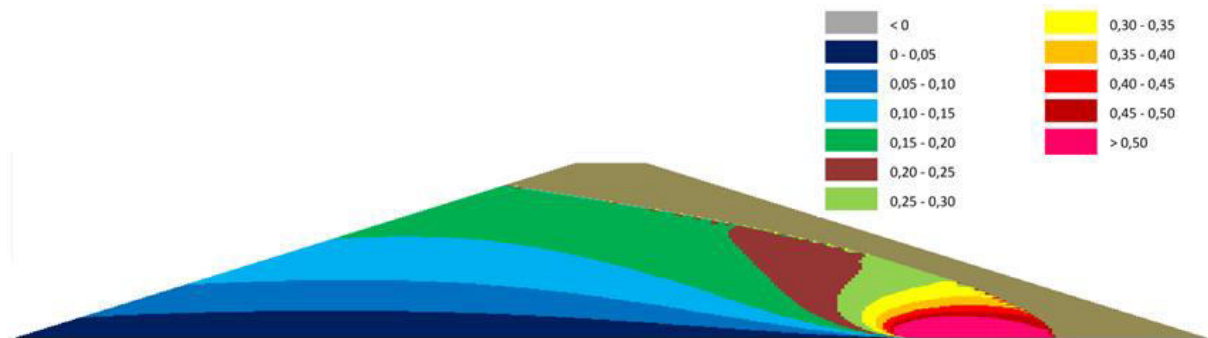


Fonte: O autor (2015).

À medida que a água se aproxima se aproxima do filtro na direção horizontal, é natural que a velocidade da água aumente isso porque o filtro diminui o nível freático, e portanto, a área por onde a água irá percolar, isso acarreta numa maior velocidade, essa informação pode ser percebida através da equação da continuidade.

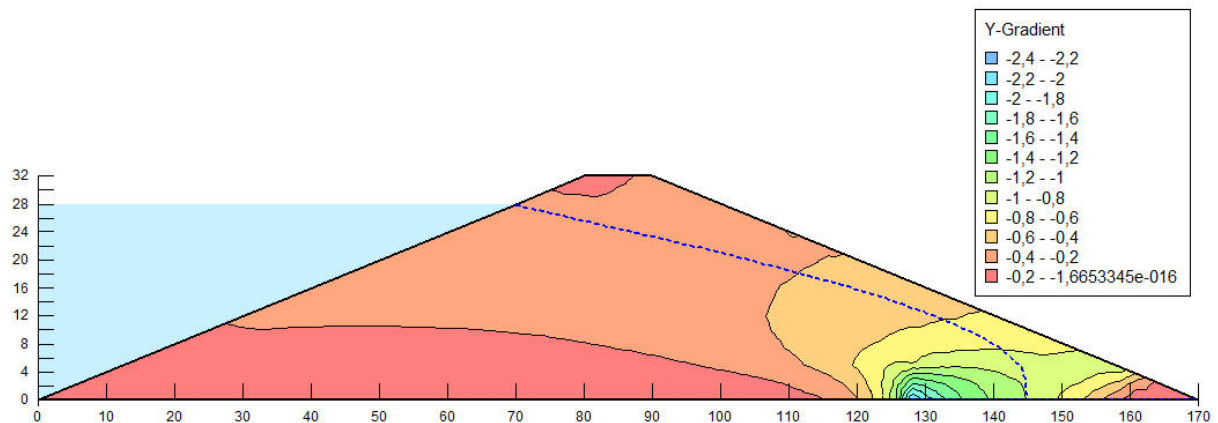
Gradiente-y

Figura 51 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

Figura 52 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 2).

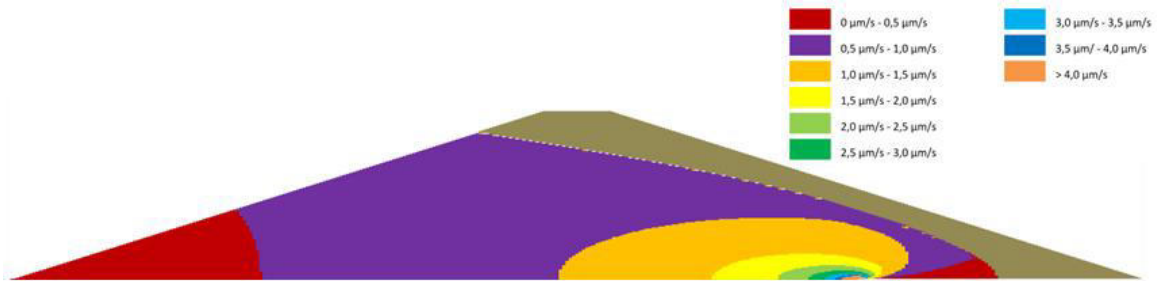


Fonte: O autor (2015).

Da mesma forma, considerado o gradiente vertical, percebe-se que a água logo acima do filtro é sugada para o filtro com um gradiente superior ao de outras áreas da barragem, isso permite que o espaço acima do filtro seja preenchido pela água da lateral esquerda, por isso, acontece o gradiente horizontal acima do filtro mostrados nas Figuras 49 e 50.

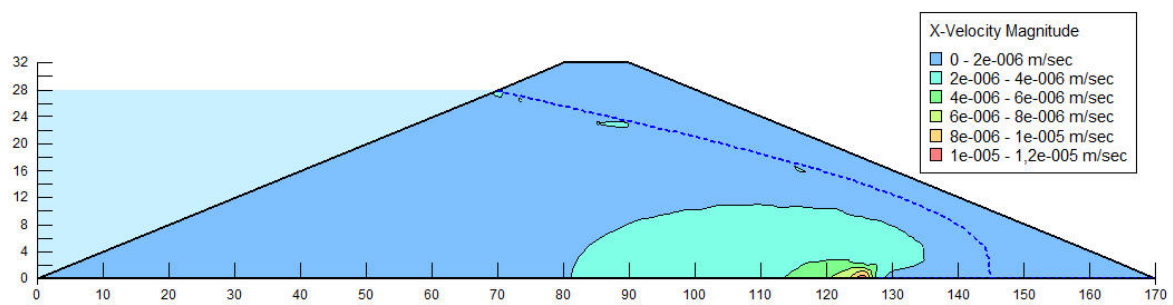
Velocidade-x

Figura 53 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

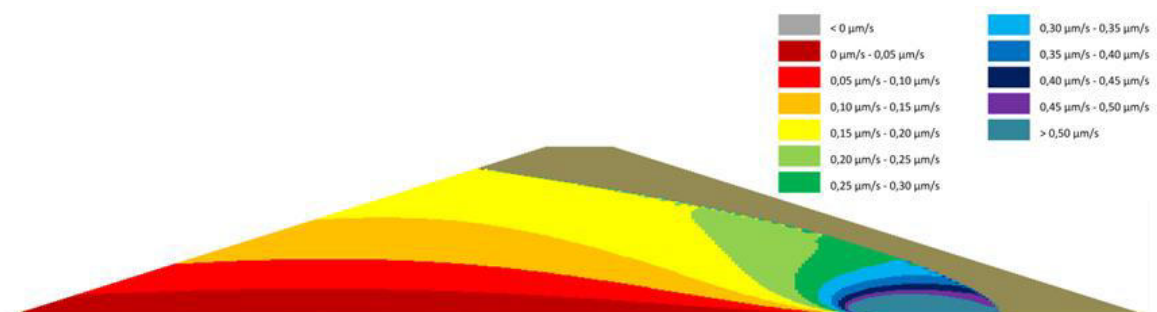
Figura 54 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

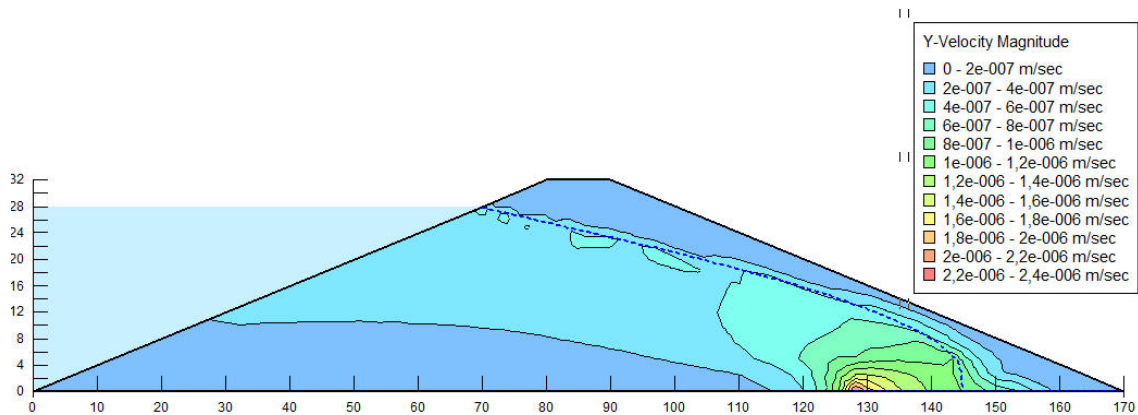
Velocidade-y

Figura 55 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 2).



Fonte: O autor (2015).

Figura 56 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 2).



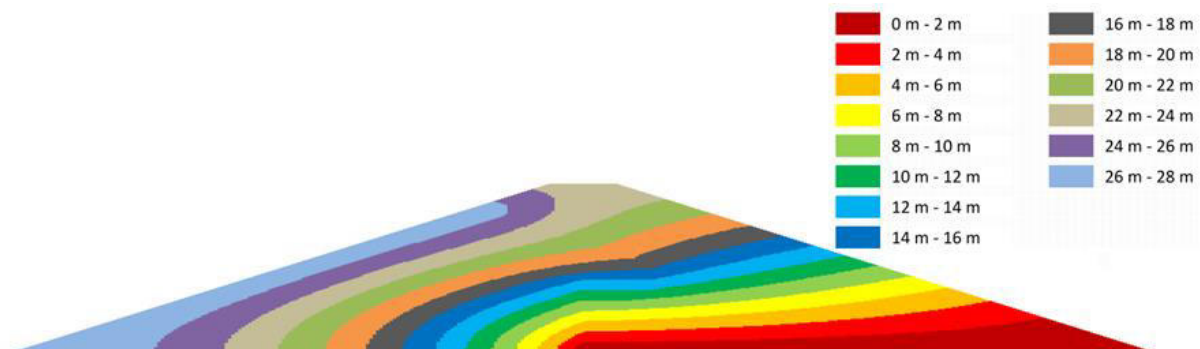
Fonte: O autor (2015).

Sobre as velocidades, resume-se afirmando que as linhas de isovalores, seguem o mesmo padrão que os gradientes hidráulicos. Com relação à magnitude das velocidades, no caso com filtro, é normal que a vazão total aumente se comparado com a barragem sem filtro, isso porque há um meio de menor resistência à passagem da água (material do filtro).

4.3 BARRAGEM COM RESERVATÓRIO CHEIO, COM FILTRO CHAMINÉ

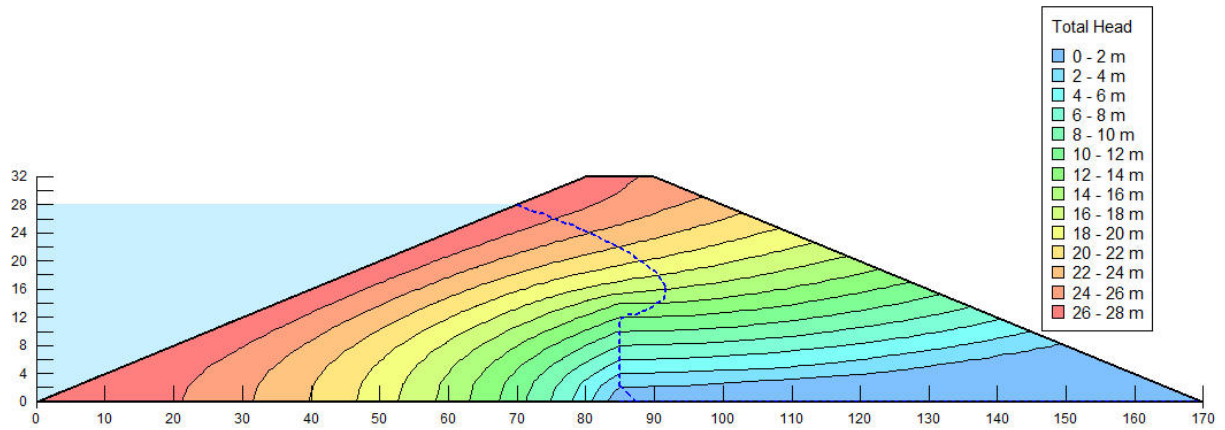
Equipotenciais

Figura 57 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

Figura 58 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 3).

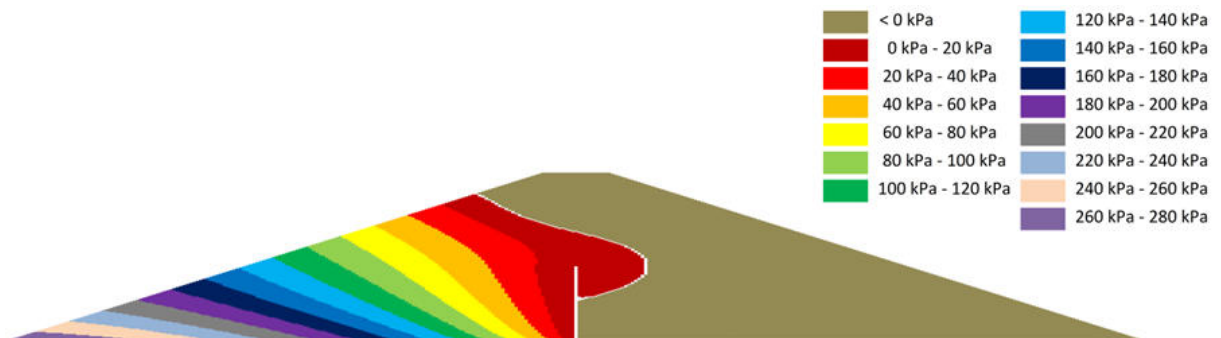


Fonte: O autor (2015).

Novamente, bons resultados foram encontrados para as linhas equipotenciais e como é possível notar, há um recuo da linha freática devido a parte vertical do filtro, isso mostra a influência do filtro tipo chaminé sobre a linha freática

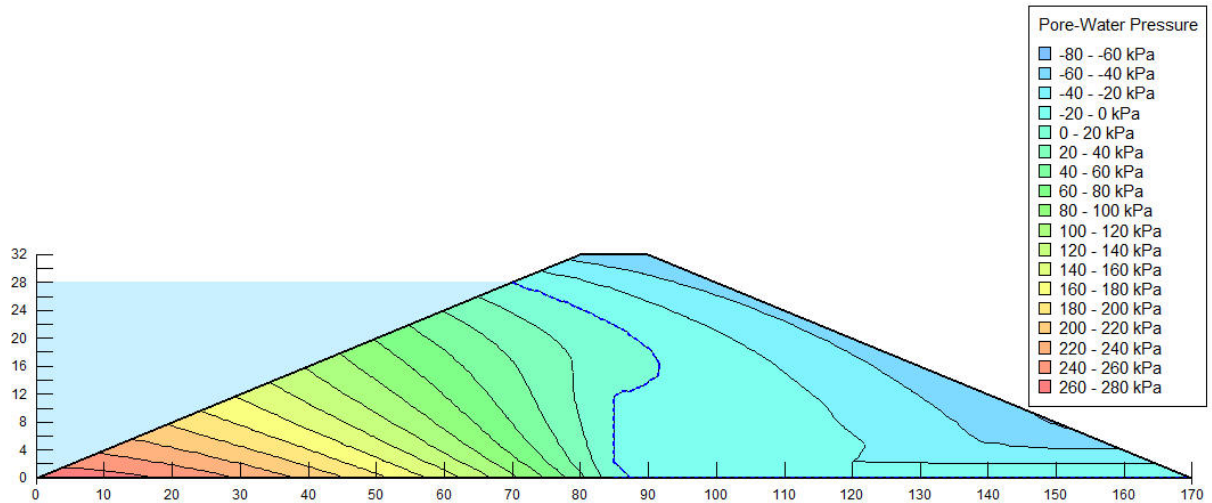
Linhas de Fluxo (Poro-pressão)

Figura 59 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

Figura 60 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 3).

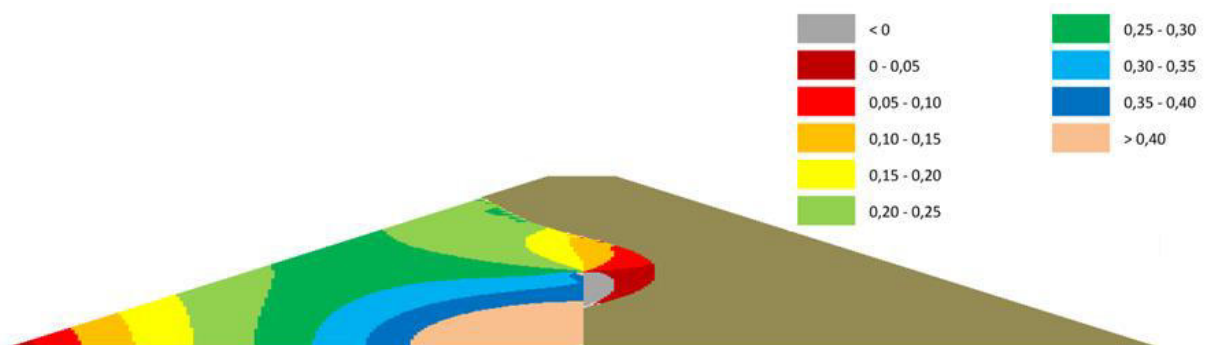


Fonte: O autor (2015).

A linha freática teve o comportamento esperado sendo atraído ainda mais pelo filtro. Nota-se que este tipo de filtro, por ter um comprimento horizontal maior e por ter uma parte vertical, esta intercepta a linha freática muito antes se comparado com o caso do filtro tipo tapete.

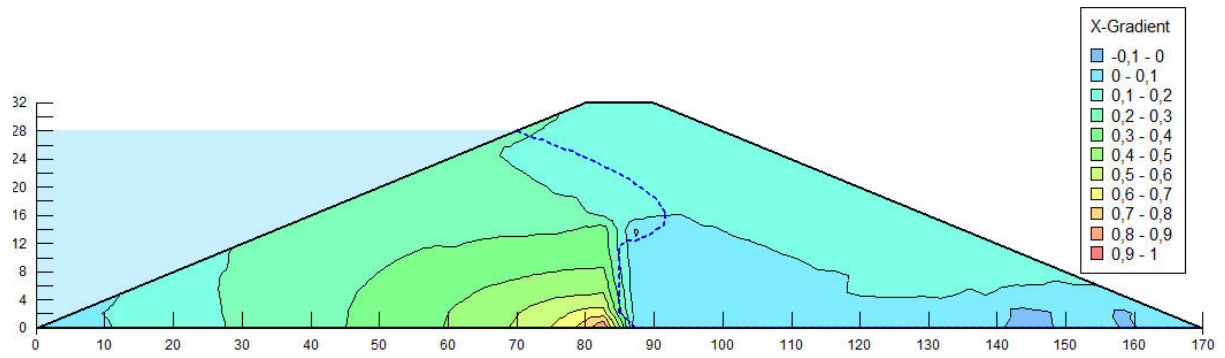
Gradiente-x

Figura 61 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

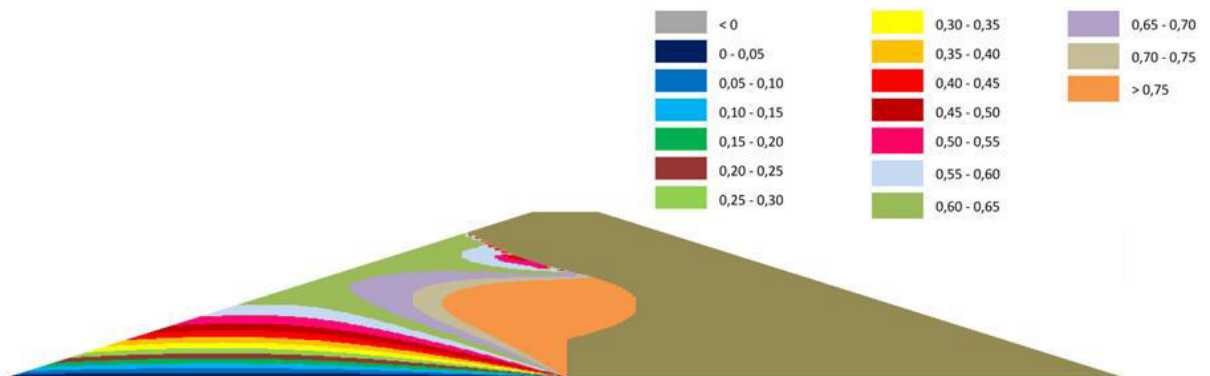
Figura 62 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

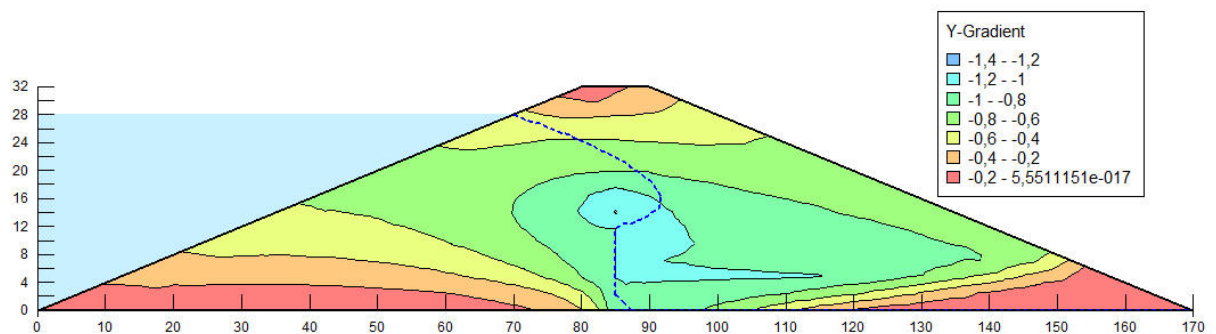
Gradiente-y

Figura 63 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

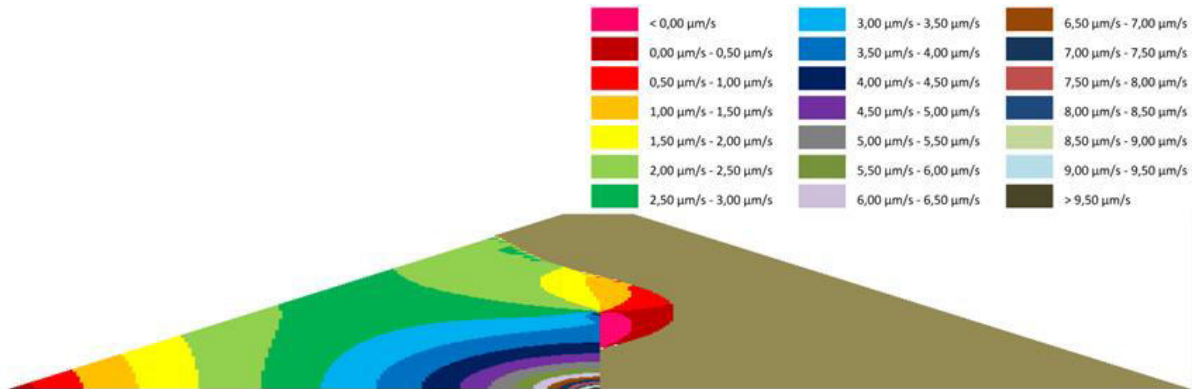
Figura 64 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

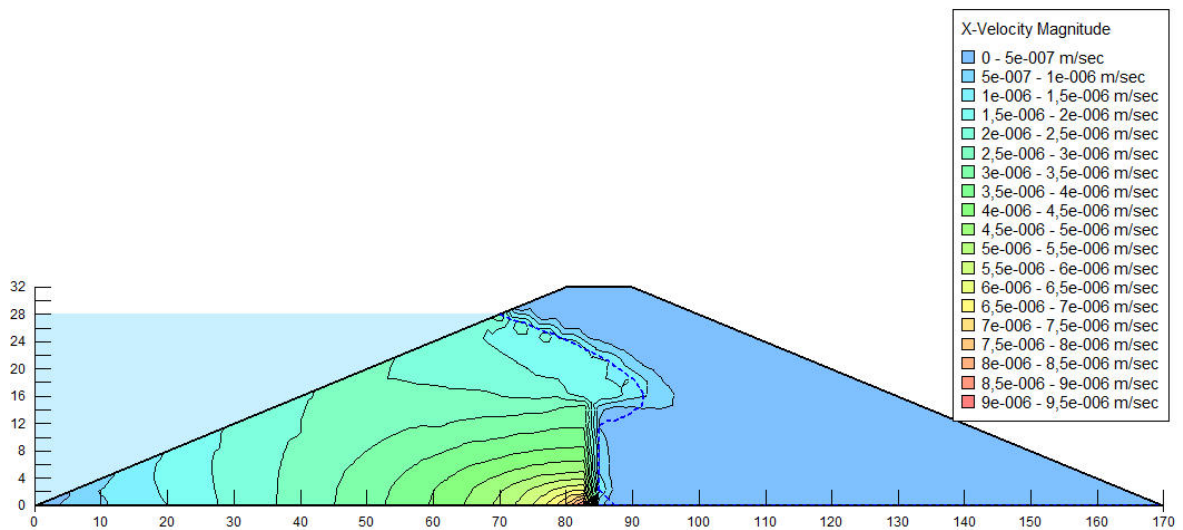
Velocidade-x

Figura 65 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

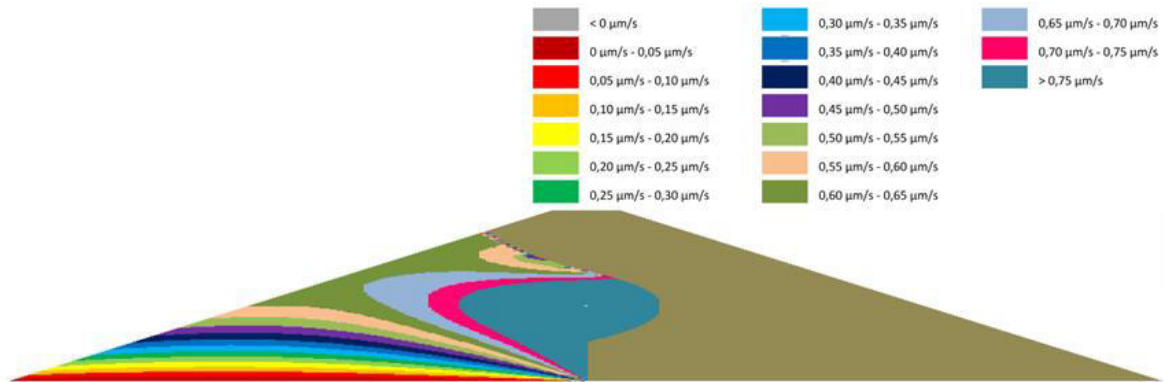
Figura 66 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

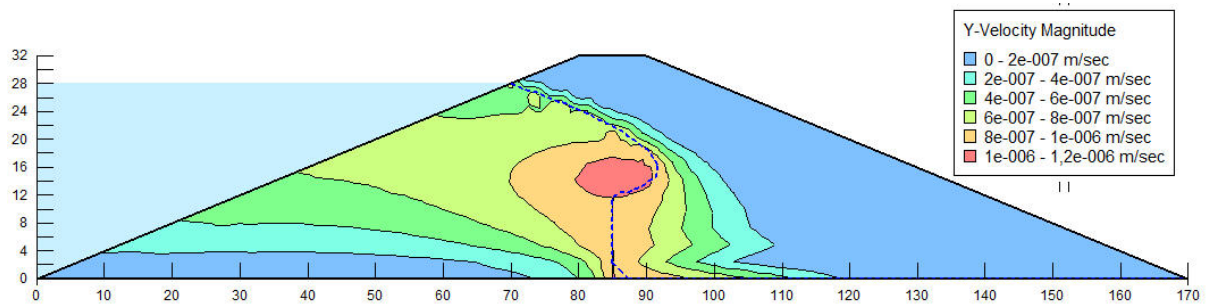
Velocidade-y

Figura 67 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

Figura 68 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 3).



Fonte: O autor (2015).

4.4 BARRAGEM COM RESERVATÓRIO NO NÍVEL MÍNIMO, COM FILTRO TAPETE

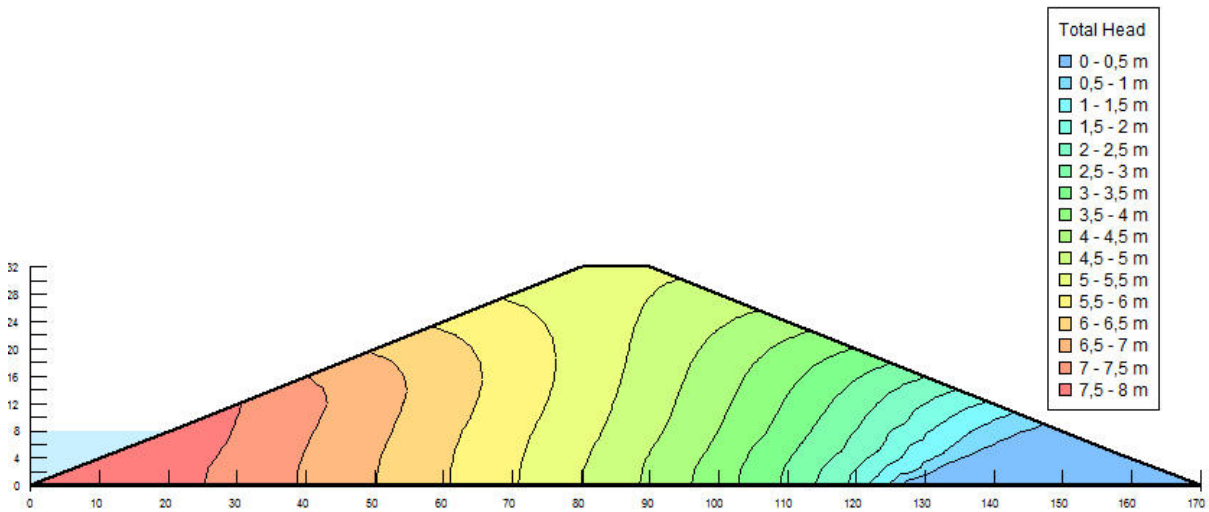
Equipotenciais

Figura 69 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

Figura 70 – Resultado de linhas equipotenciais obtido pelo SEEP/W (caso 4).

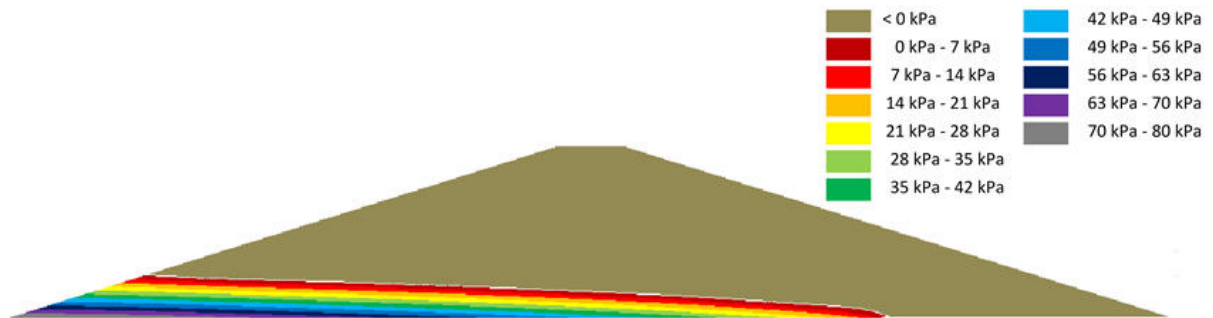


Fonte: O autor (2015).

No caso com nível mais baixo do reservatório, o comportamento nas linhas equipotenciais se curvarem para a esquerda aparece na Figura 70, mas não são ainda como os resultados obtidos pelo autor na Figura 69.

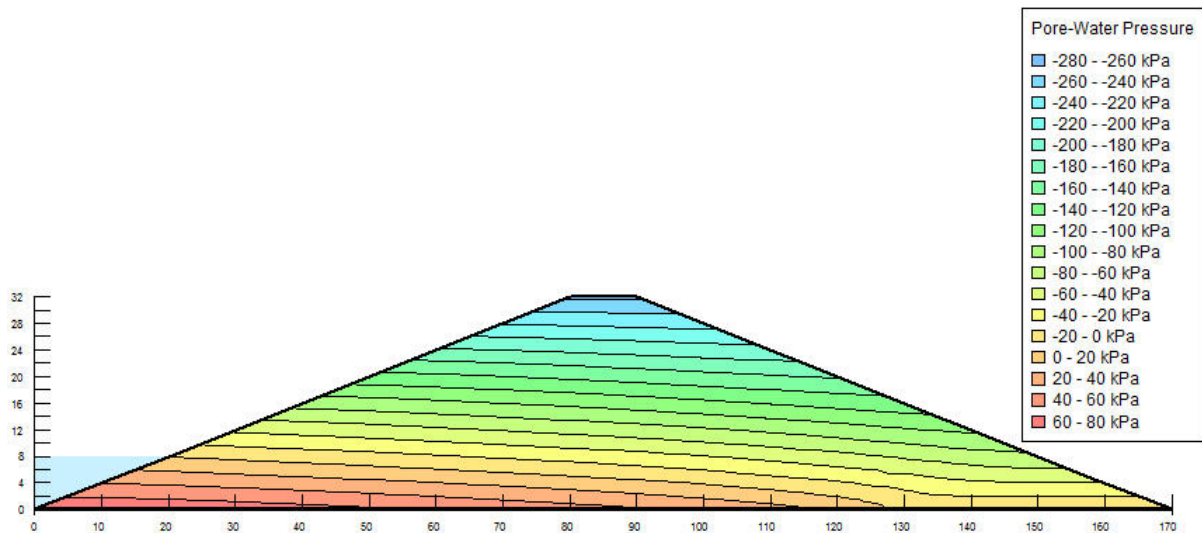
Linhas de Fluxo (Poro-pressão)

Figura 71 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

Figura 72 – Resultado de linhas de fluxo obtido pelo SEEP/W (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

Assim como nos casos anteriores, os resultados encontrados para todos os elementos da rede de fluxo para o quarto caso foram satisfatórios, mostrando a convergência dos resultados obtidos via diferenças finitas e o método dos elementos finitos utilizado pelo programa SEEP/W.

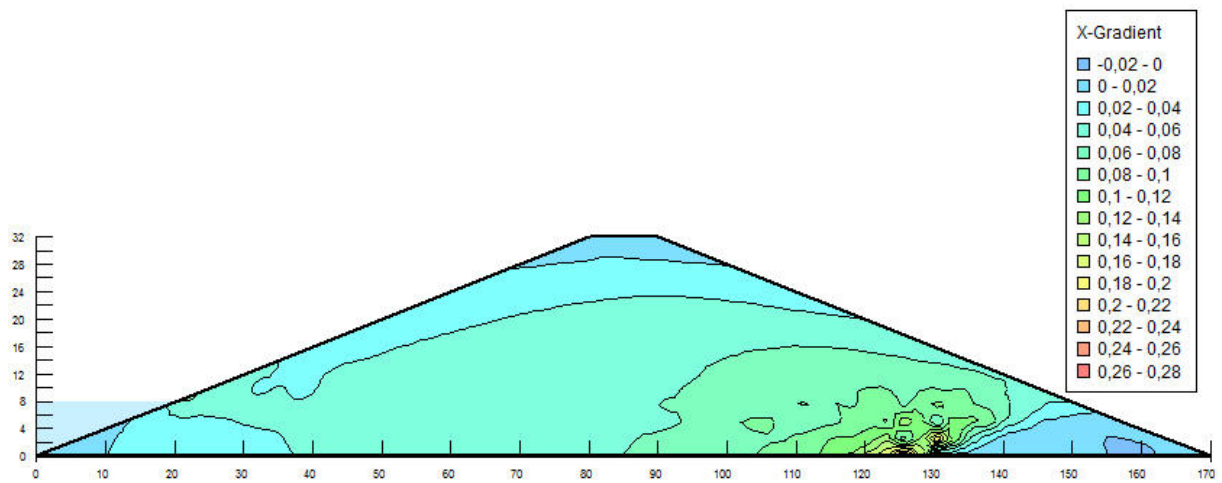
Gradiente x

Figura 73 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

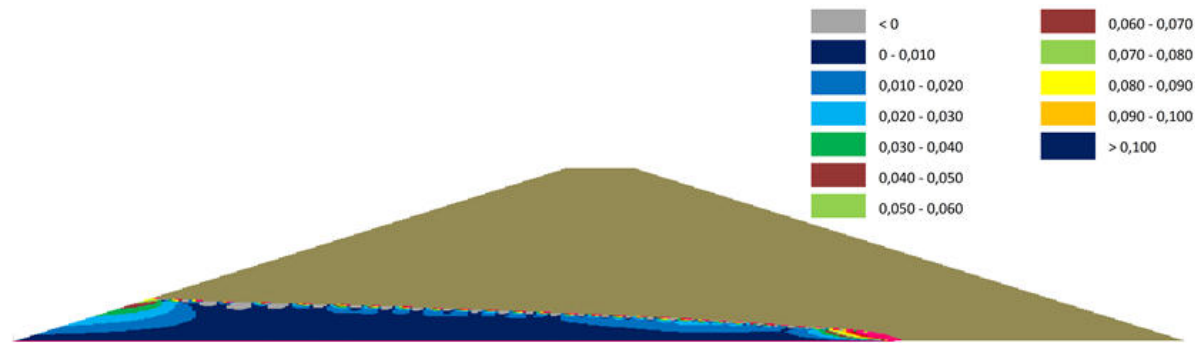
Figura 74 – Resultado de gradientes hidráulicos horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

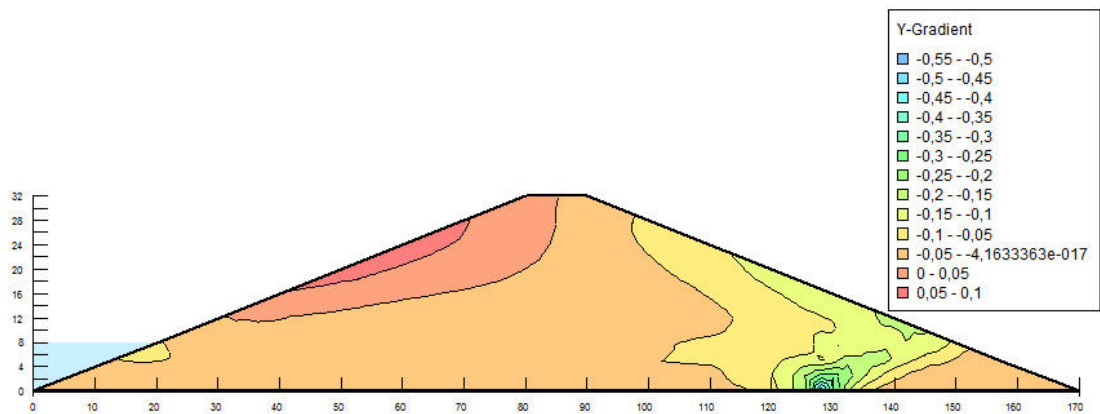
Gradiente y

Figura 75 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

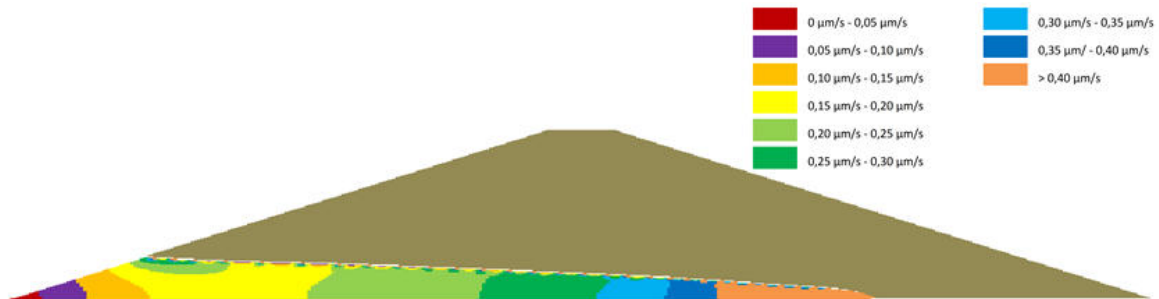
Figura 76 – Resultado de gradientes hidráulicos verticais obtido pelo SEEP/W (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

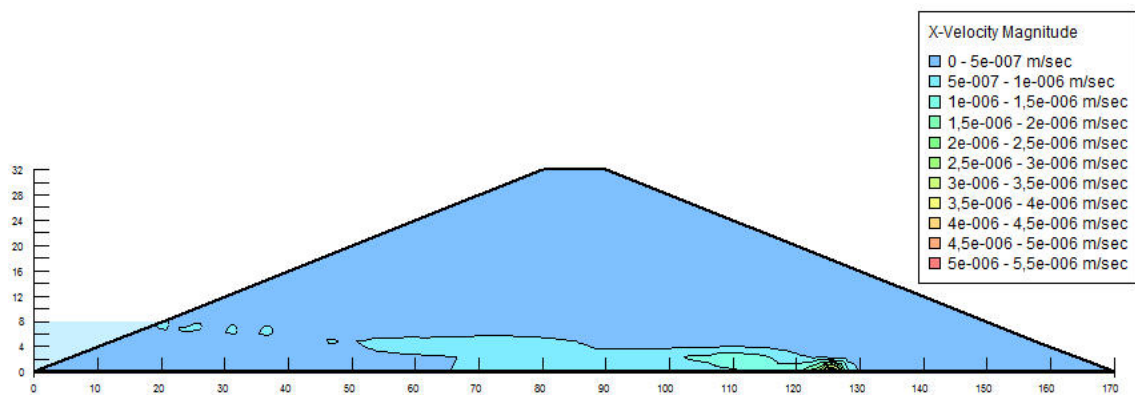
Velocidade x

Figura 77 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

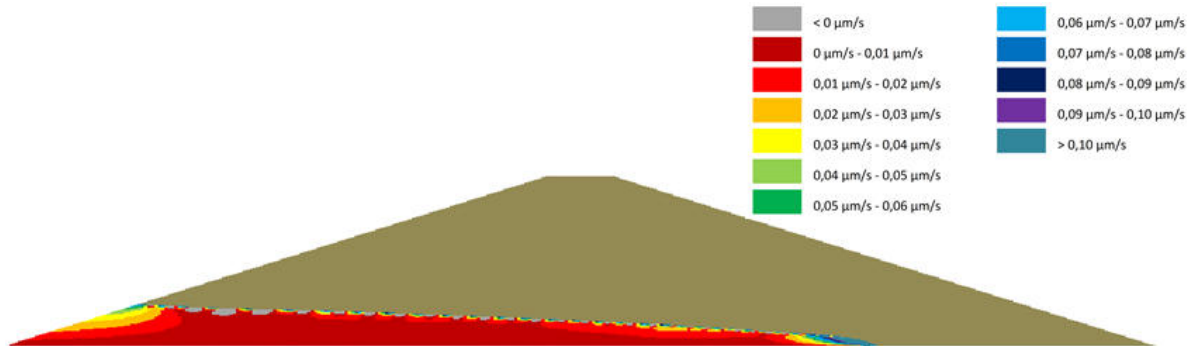
Figura 78 – Resultado de velocidades horizontais obtido pelo SEEP/W (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

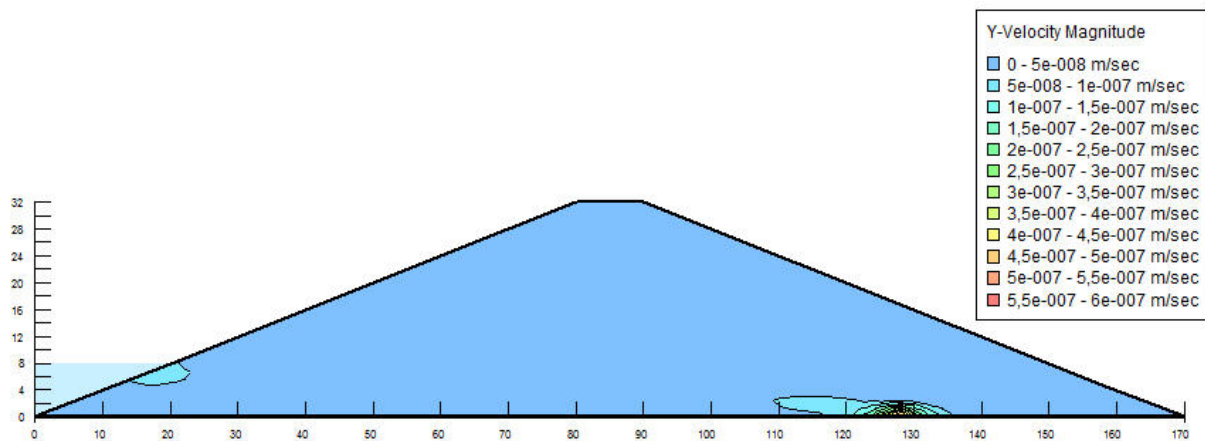
Velocidade y

Figura 79 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo autor (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

Figura 80 – Resultado de velocidades verticais obtido pelo SEEP/W (caso 4).



Fonte: O autor (2015).

4.5 VAZÃO

Em qualquer que seja a fase ou disposição do filtro, a vazão de água que atravessa o corpo da barragem pode ser obtido pela equação 46

$$Q = \Delta y \sum_{i=1}^n V_{x_i} \quad (46)$$

Onde

Q = Vazão de água que atravessa a barragem por metro de largura;

Δy = Espaçamento vertical da malha;

V_x = Velocidade de percolação horizontal.

Os resultados das vazões nos 4 casos são mostrados da Tabela 2

Tabela 2 - Resultados de vazão.

Casos	Vazão (L/min/m)
1	2,19
2	2,60
3	4,99
4	0,097

Fonte: O autor (2015).

Estes resultados mostram que a utilização de filtro aumenta a vazão através da barragem e quanto maiores forem as dimensões do filtro, maior é esta vazão, isto pode ser constatado se comparados os resultados dos casos 1, 2 e 3, pois o filtro do caso 3 (chaminé) é um filtro bem maior que o filtro do caso 2 (tapete).

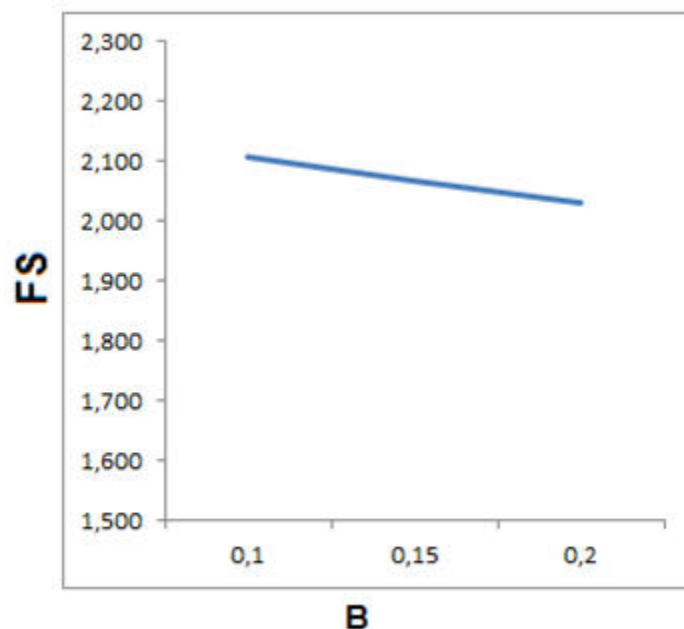
4.6 ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO

Serão apresentados agora os resultados obtidos pelas análises de estabilidade de taludes feitas pelo Método de Bishop Simplificado, foram analisadas diversas superfícies de rupturas para as três fases de análise, a saber, final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido. Para não se tornar muito repetitivo a apresentação dos resultados, serão mostradas apenas as superfícies de ruptura que apresentaram os menores fatores de segurança, as demais análises serão postas em Anexo.

Inicialmente serão apresentados os resultados para o talude de jusante na fase final de construção, na sequência fase de reservatório cheio, e por fim a fase de esvaziamento rápido. Na Figura 81, apresenta-se o comportamento do fator de segurança versus o parâmetro B da poro-pressão. Os resultados mostram que quando o parâmetro de poro-pressão B aumenta, o fator de segurança diminui, além disso, o fator de segurança acima de 1,5 mostra que a barragem está estável.

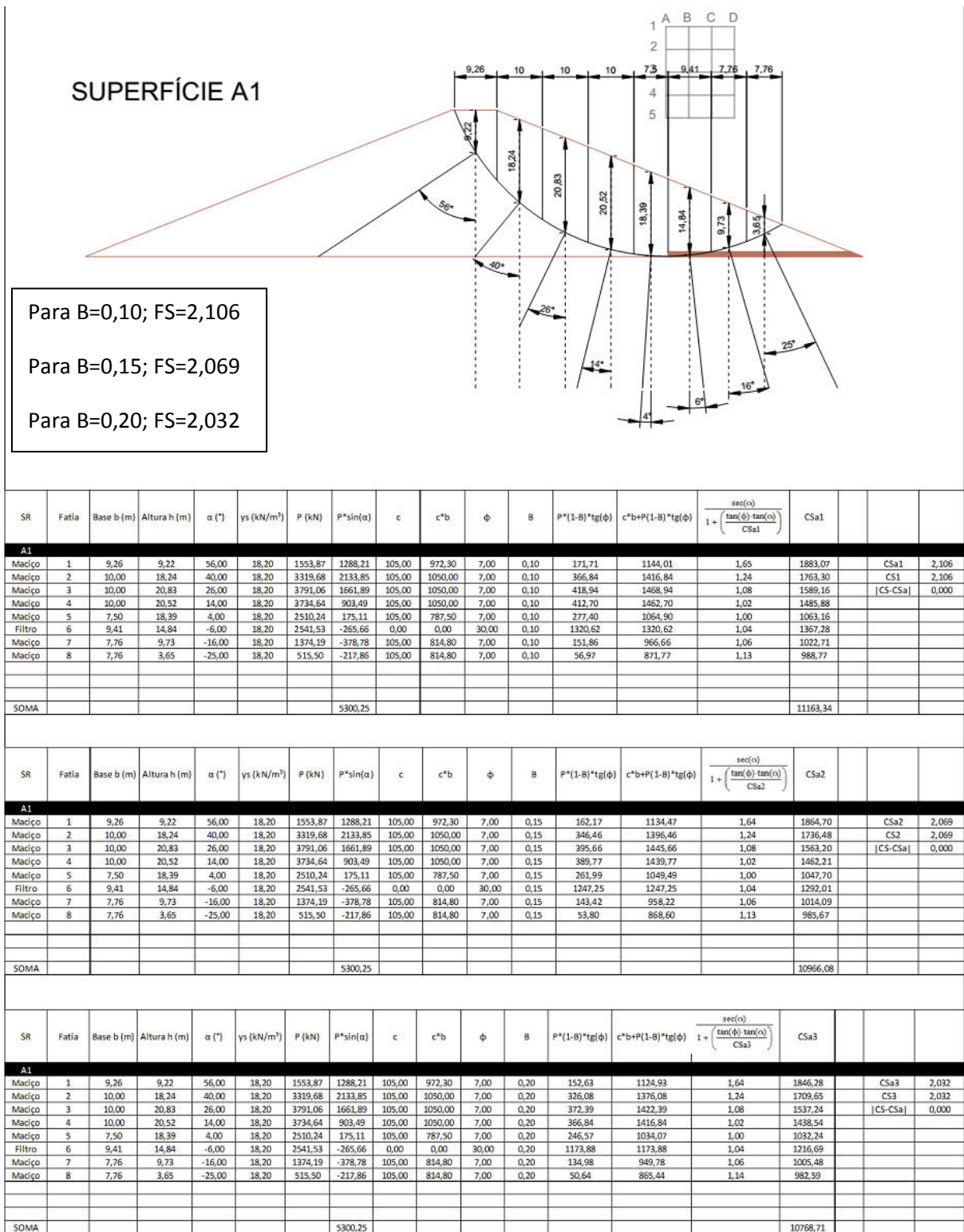
Verifica-se, portanto, que este comportamento colabora com os resultados apresentados na literatura sendo observada uma relação inversamente proporcional entre estes dados.

Gráfico 1 – Fator de segurança X parâmetro de poro-pressão



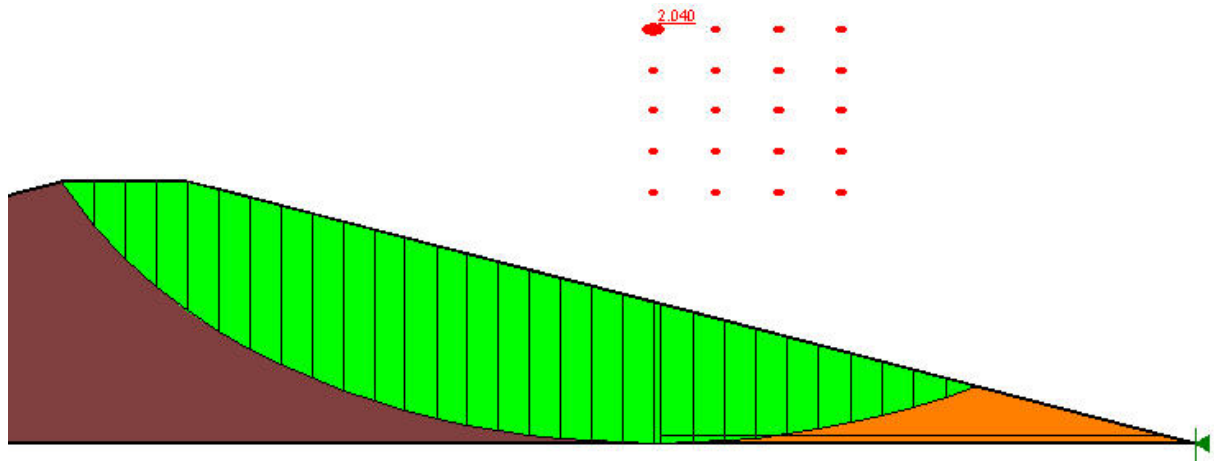
Fonte: O autor (2015).

Figura 81 – Resultado de menor FS para a fase final de construção.



Fonte: O autor (2015).

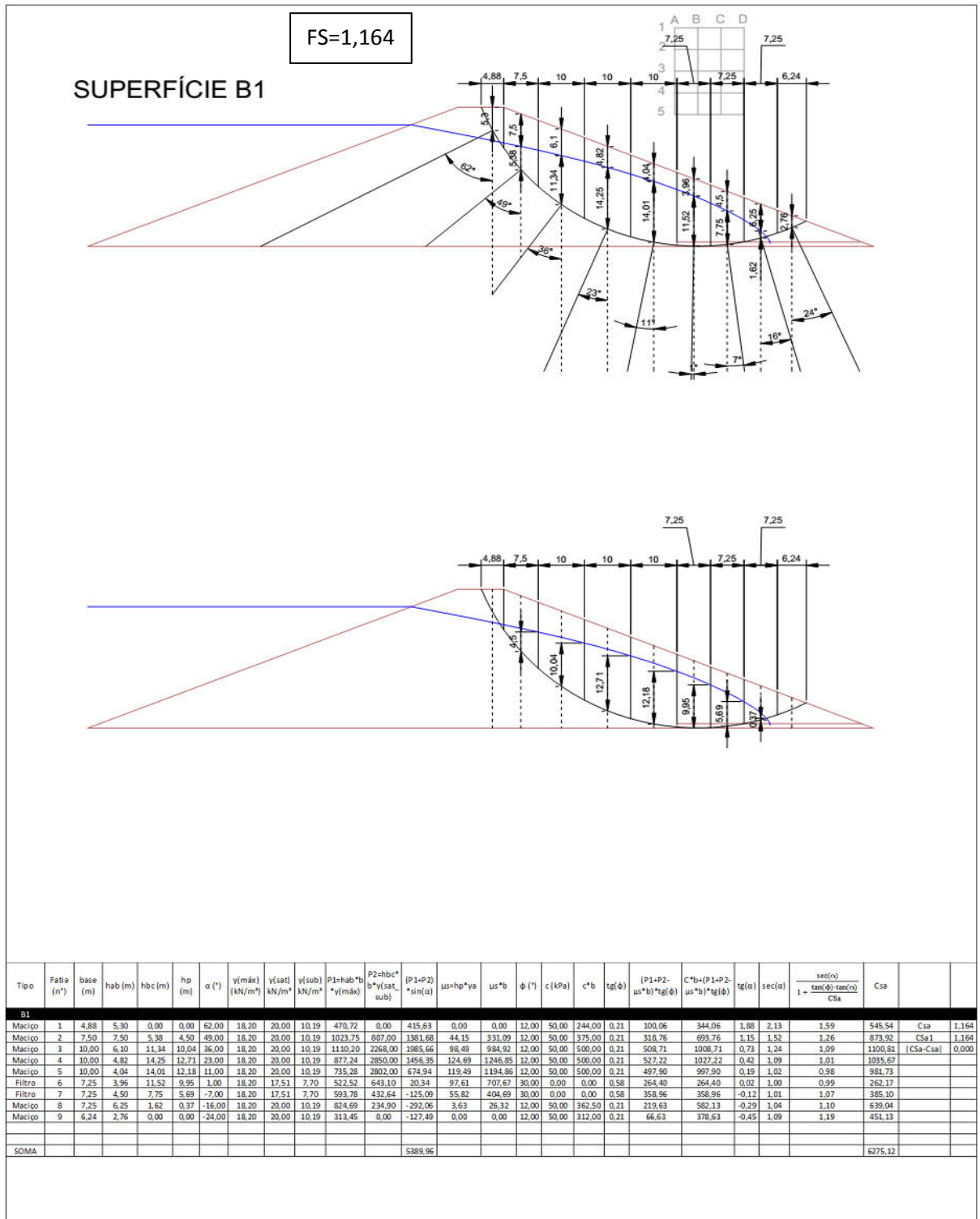
Figura 82 – Resultado do menor fator de segurança para fase final de construção obtido do SLOPE/W.



Fonte: O autor (2015).

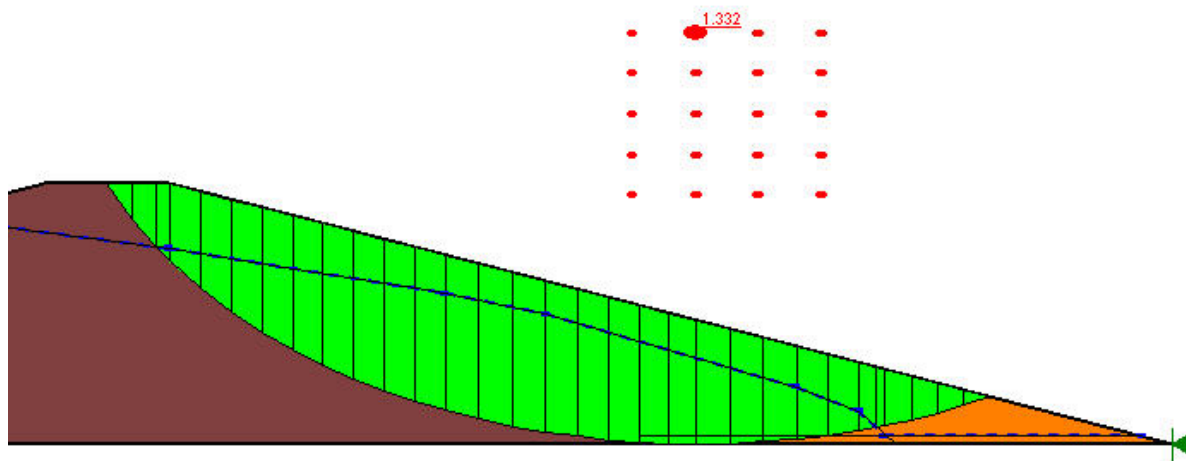
4.7 ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – FASE RESERVATÓRIO CHEIO

Figura 83 – Resultado de menor FS para a fase reservatório cheio.



Fonte: O autor (2015).

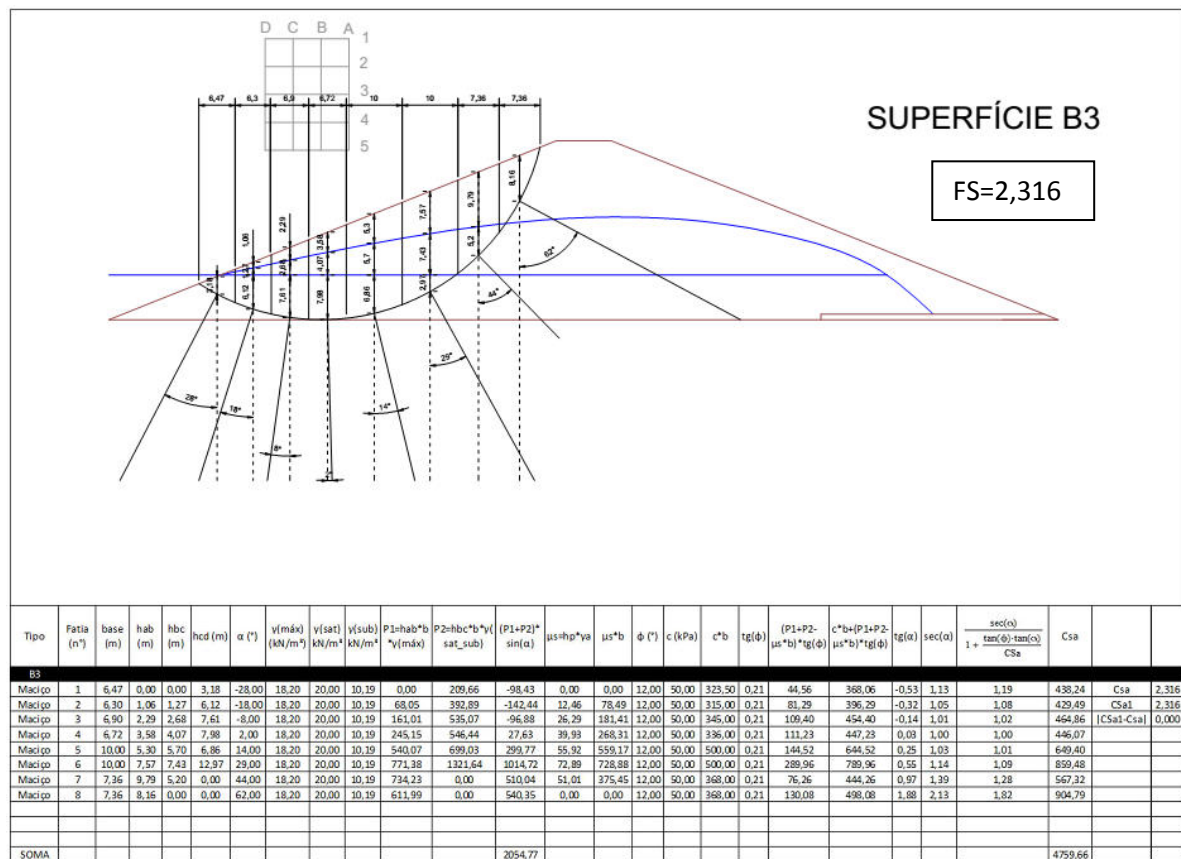
Figura 84 – Resultado do menor fator de segurança para fase reservatório cheio obtido do SLOPE/W.



Fonte: O autor (2015).

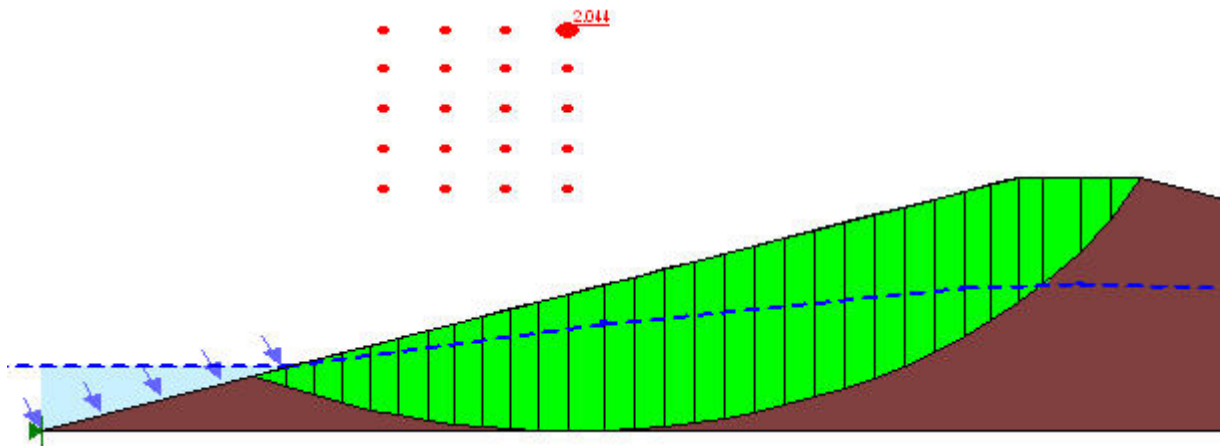
4.8 ESTABILIDADE DO TALUDE DE MONTANTE – ESVAZIAMENTO RÁPIDO

Figura 85 – Resultado de menor FS para a fase esvaziamento rápido.



Fonte: O autor (2015).

Figura 86 – Resultado do menor fator de segurança para fase esvaziamento rápido obtido do SLOPE/W.



Fonte: O autor (2015).

Como percebido, a fase reservatório cheio é a fase de maior instabilidade dentre as três fases. O fator de segurança encontrado nesta fase foi de 1,164, isso não significa que a barragem está estruturalmente instável, apenas não está de acordo com a NBR 11682:2006, que deveria ter no mínimo 1,5. Para este tipo de problema, uma alternativa deve ser empregada de modo a aumentar o fator de segurança para que esteja de acordo com a norma. Uma solução é o emprego de bermas de equilíbrio, que são extensões de terra colocadas no pé do talude que serve para diminuir o efeito do escorregamento de terra devido ao peso do solo, fazendo com que o solo que poderia vir a romper, fique estável. Outra solução viável seria a aplicação de outro tipo de filtro, por exemplo, o filtro tipo chaminé, este por sua vez desviaria com mais eficiência a linha freática e por sua vez, não haveria região de solo saturado próximo ao talude de jusante, esta solução possivelmente acarretaria em um fator de segurança superior à 1,5.

A seguir, a Tabela 3 resume os resultados de FS para as três fases da barragem utilizando os vinte pontos da malha como citado.

Tabela 3 - Resultados de FS nas três fases de análise da barragem.

Fase	FS (pelo autor)	FS (Pelo SLOPE/W)
Final de construção	2,032	2,040
Reservatório cheio	1,164	1,332
Esvaziamento rápido	2,316	2,044

Fonte: O autor (2015).

Os demais resultados que tiveram fatores de segurança maiores estão apresentados nos anexos B (RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE DE JUSANTE FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO), C (RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE DE JUSANTE FASE RESERVATÓRIO CHEIO) e D (RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE DE MONTANTE FASE ESVAZIAMENTO RÁPIDO).

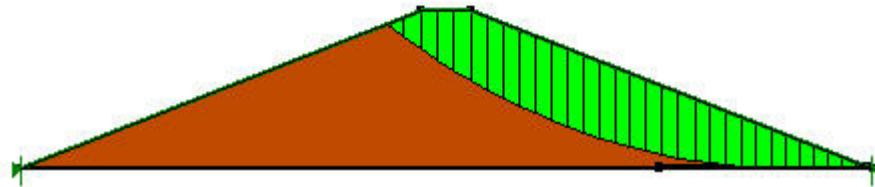
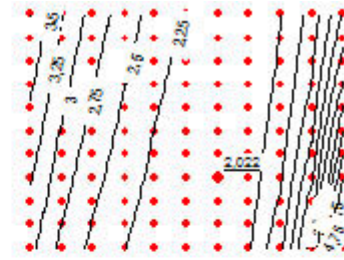
4.9 CURVAS DE ISOFATORES NO SLOPE/W

Os resultados encontrados na análise de estabilidade de taludes no SLOPE/W mostram que a superfície crítica de ruptura para a malha de pontos colocada (de cada fase) fica no extremo da malha, ou seja, nada garante que aquela superfície é a superfície que gera o menor fator de segurança.

No método de cálculo feito por Carvalho (2012), considera-se que a fatia de solo cuja base contém o filtro, esta fatia deve ser considerada como se fosse completamente constituída do material do filtro, desta forma, o fator de segurança tende a diminuir, neste item este efeito será desconsiderado. As figuras 87, 88 e 89 mostram os resultados gerados pelo SLOPE/W para o fator de segurança críticas da fase final de construção, fase reservatório cheio e fase esvaziamento rápido respectivamente.

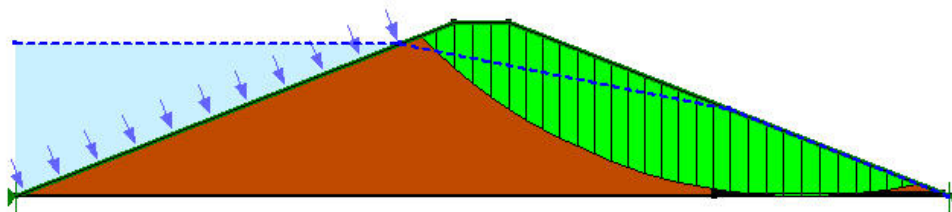
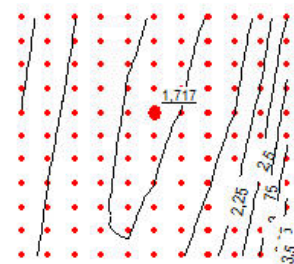
Os resultados mostram que desconsiderando a ideia sugerida por Carvalho (2012) citada acima, o fator de segurança crítico na fase reservatório cheio, é superior ao encontrado anteriormente, sendo inclusive, superior à 1,5.

Figura 87 – Curvas de isofatores (fase final de construção)



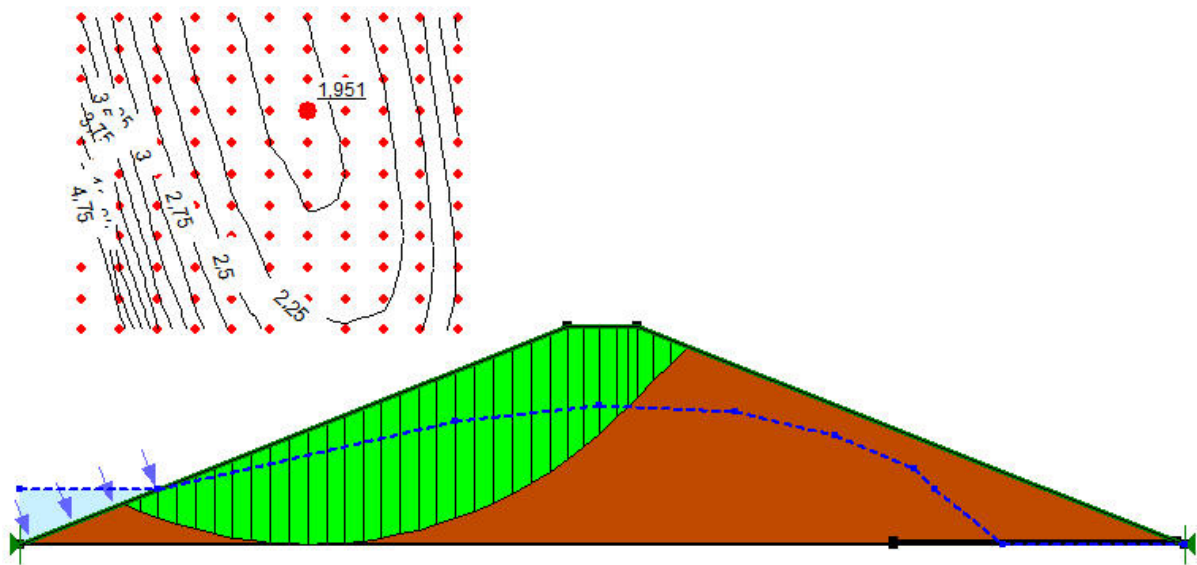
Fonte: O autor (2015).

Figura 88 – Curvas de isofatores (fase reservatório cheio)



Fonte: O autor (2015).

Figura 89 – Curvas de isofatores (fase esvaziamento rápido)



Fonte: O autor (2015).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no item 5, conclui-se que é de grande importância o conhecimento teórico (pois possibilita entendimento da parte interna de programas comerciais) e da utilização de *softwares* (que aumentam a produtividade, com velocidade de cálculo e possibilidade de análises diversas em menor tempo, se antecipando aos eventos durante a execução da obra) que auxiliem tanto na análise de estabilidade como na análise de fluxo de uma barragem, esta por sua vez deve ser dimensionada de forma que não haja riscos à sociedade e ao meio ambiente, garantindo o binômio da engenharia segurança e economia.

A análise antes da execução previne vários problemas, entre eles, o custo de execução, já que o projeto sem as devidas análises podem acarretar mudanças nas diretrizes do projeto e consequentemente seu replanejamento. O tempo de execução também está diretamente associado com a definição de um projeto, este sendo bem elaborado evita tais problemas.

Além disso, conclui-se que a utilização de um filtro é de grande importância do ponto de vista de fluxo para o desvio da linha freática e proteção contra o *piping* no talude de jusante, e com o desvio da linha freática, consequentemente há mudança no estado de tensões do solo que influencia na estabilidade do talude, então todas as análises devem ser feitas de forma integrada e não isolada para elaboração de um projeto de barragem de terra.

De acordo com os resultados, é possível concluir que uma barragem com filtro tende a aumentar a vazão de água através do maciço da barragem, principalmente quando este filtro tem dimensões maiores como foi o caso do filtro chaminé em relação ao filtro tapete, além de apesar aumentar a vazão, o filtro tem importância fundamental no desempenho e funcionamento da barragem. É possível perceber também que a presença do filtro gera uma região de baixo potencial próximo ao filtro, o que gera um gradiente hidráulico superior aos de outras regiões, fazendo com que haja um fluxo total no filtro bem maior que demais regiões. Quanto ao fluxo descendente sobre a fundação, é possível notar que com a condição de impermeabilidade imposta, o resultado foi satisfatório.

Quanto à análise de estabilidade de taludes, nota-se que a fase reservatório cheio é a que gera uma menor segurança quanto à estabilidade, este resultado era esperado uma vez que a água percola de montante para jusante, a pressão de percolação é favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros sugere-se fazer além de análises de Estabilidade e Fluxo, análise de tensões e deformações no solo devido a construção de uma barragem de terra, fazendo comparativos com solos secos e em presença de nível d'água, com fundação sobre solo ou rocha, bem como aplicação de heterogeneidade do solo (Barragens Zoneadas).

Sugere-se também fazer estes tipos de análises em Barragens de Concreto, para estudar o efeito da água armazenada no talude de montante, e problemas de sub-pressão sob este tipo de estrutura.

Aplicação de outros métodos de equilíbrio limite de estabilidade com elaboração de planilhas, que possam ser comparados os resultados em diversos métodos.

Visualização do fluxo d'água no tempo (transiente) através da barragem.

Aplicação de outras geometrias da barragem e outras disposições de filtros para análise de fluxo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 11682:2006 - Estabilidade de encostas.

DAS, B. M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering. 7th ed.

MURTHY, V. N. S. (2003) Geotechnical Engineering – Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering – New York.

MASSAD, F. (2010) Obras de Terra – Curso Básico de Geotecnia 2ª ed. São Paulo.

US Bureau of Reclamation (1987). Design of Small Dams. Department of the Interior 3rd ed., Washington, USA.

ASSIS, A. P., HERNANDEZ, H. M. & COLMANETTI, J. P. (2003) Apostila de Barragens – Universidade de Brasília. Brasília.

SORIANO, H. L., (2009). Elementos Finitos, Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas – PUC. Rio de Janeiro.

AZEVEDO, A. F. M. (2003). Método dos Elementos Finitos. 1ª ed– Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal.

BARENDTS, F. B. J., & UFFINK, G. J. M. Mechanics and Transport of Flow through Porous Media. Online Syllabus.Disponível em <http://geo.citg.tudelft.nl/~uffink/syllabusCT3320/home.html>.

CIGB (2007) – As Barragens & a Água do Mundo, Um Livro Educativo que Explica como as Barragens Ajudam a Administrar a Água no Mundo.

CARVALHO, J. Q. (1998). Projeto de Barragens de Terra. UFPB. Campina Grande.

CARVALHO, J. Q. (2012). Barragens de Terra: Conceitos Básicos e Análise da Estabilidade. 6ª ed. Campina Grande.

CARVALHO, J. Q. (19??). Mecânica dos Solos. 1ª ed. UFPB. Campina Grande.

CEDERGREN, H. R. (1977). Seepage, Drainage, and Flow Nets 3rd ed.

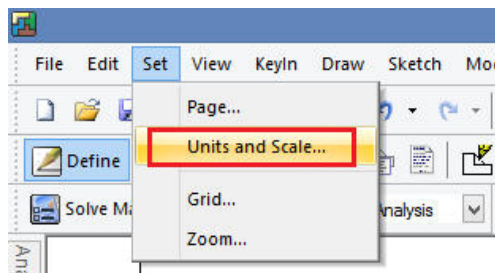
ANEXO A

PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE UMA REDE DE FLUXO

Para determinação das variáveis de uma rede de fluxo, o usuário do programa SEEP/W do pacote GeoStudio deve seguir os seguintes passos.

1º passo – Determinar as dimensões da área onde se farão os trabalhos. Para isso, deve-se ir no menu *Set* → *Units and Scale*.

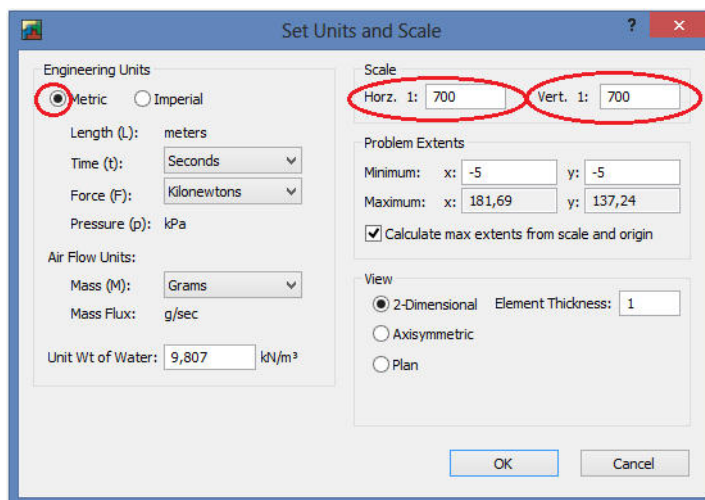
Figura A1 – Units and Scale (Unidades e escala).



Fonte: O autor (2015).

irá abrir uma janela como a da Figura A2

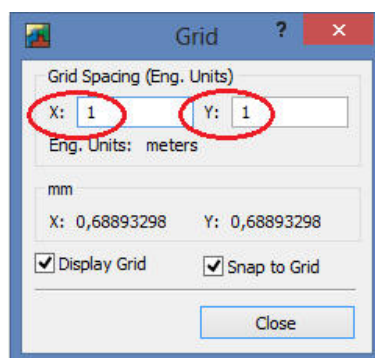
Figura A2 – Set Units and Scale (Definir unidades e escala).



Fonte: O autor (2015).

Na área *Engineering Units*, escolhe a unidade métrica (*Metric*) e na área *Scale*, escolhe os valores de 700 para os itens *Horz 1* e *Vert 1*. O valor de 700 no item *Horz 1* permite que a escala horizontal varie entre -4 e 181, este intervalo compreende todo o comprimento da barragem que é de 170 metros. O mesmo valor no item *Vert 1* permite que o *snap* seja de 1 em 1 metro nas direções vertical e horizontal. Esta informação pode ser verificada no menu *Set → Grid*

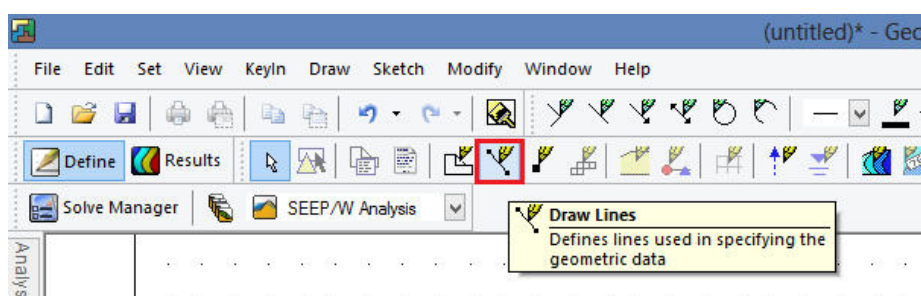
Figura A3 – Grid (Grade).



Fonte: O autor (2015).

2º passo – Desenhar a geometria da barragem. Para isso deve-se usar o comando *Draw Lines*.

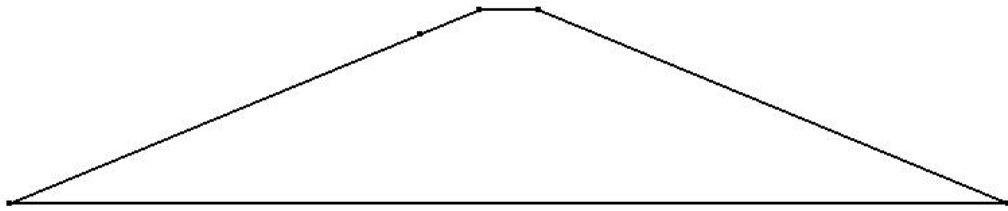
Figura A4 – Draw Lines (Desenhar linhas)



Fonte: O autor (2014).

E em seguida desenhar as linhas dando forma à barragem

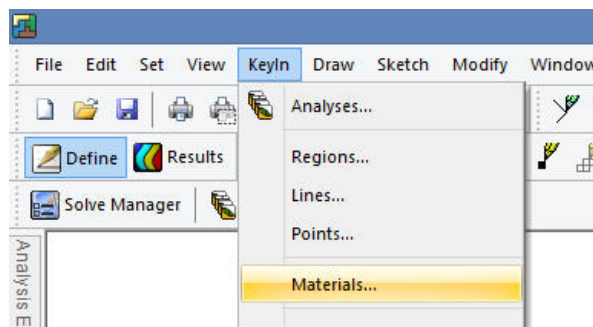
Figura A5 – Desenho da barragem.



Fonte: O autor (2015).

3º passo – Definir o material no maciço. Para definição do tipo de solo que forma a barragem, deve-se ir no menu *KeyIn* → *Materials*.

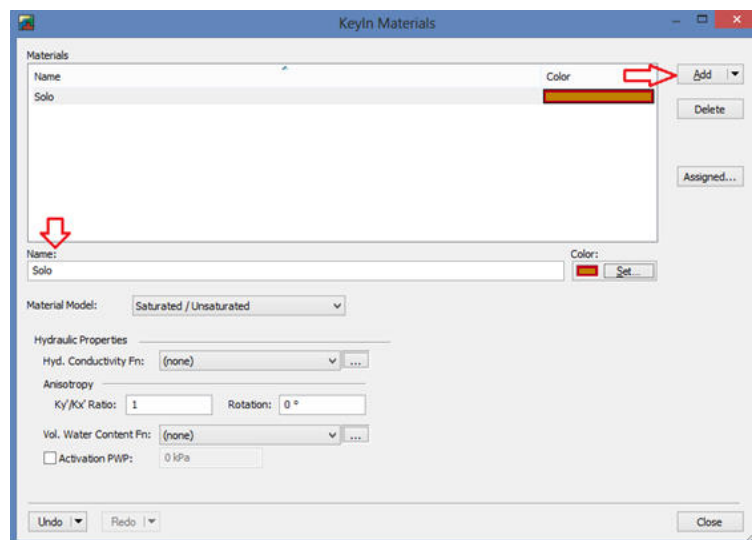
Figura A6 – Materials (Materiais).



Fonte: O autor (2015).

Irá aparecer a seguinte janela

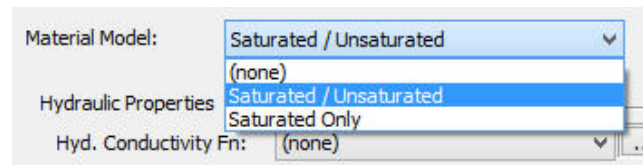
Figura A7 – KeyIn Materials (Gerenciar Materiais).



Fonte: O autor (2015).

No item *add* adiciona um novo material denominado “solo”. No item *Material Model* define o material como podendo ser saturado ou não-saturado em *Saturated/Unsaturated*

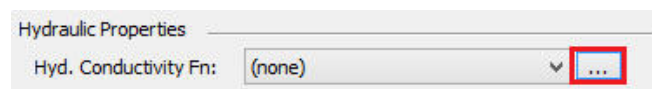
Figura A8 – Saturated/Unsaturated (Saturado/Insaturado).



Fonte: O autor (2015).

Em seguida, define-se as propriedades hidráulicas em *Hydraulic Properties*.

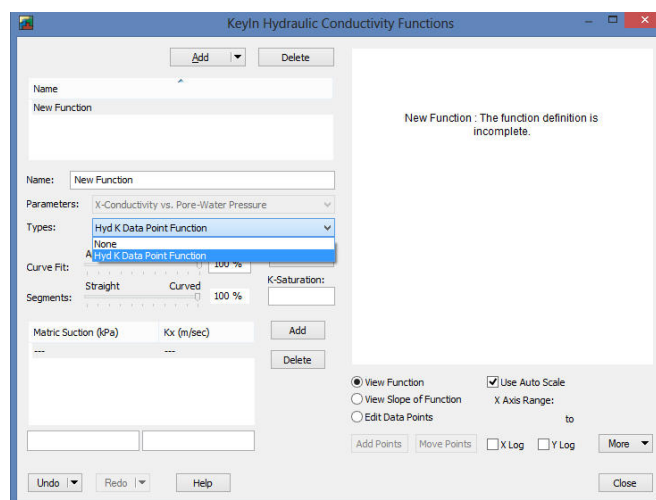
Figura A9 – Hydraulic Properties (Propriedades Hidráulicas).



Fonte: O autor(2015).

A seguinte janela irá aparecer

Figura A10 – KeyIn Hydraulic Conductivity Functions (Gerenciar Funções de Propriedades Hidráulicas).



Fonte: O autor(2015).

No item *add* adiciona uma função para as propriedade hidráulicas do solo. No item *Types* seleciona o item *Hyd Data Point Function* onde cria a propriedade de condutividade hidráulica do solo

Em seguida em *Estimate*

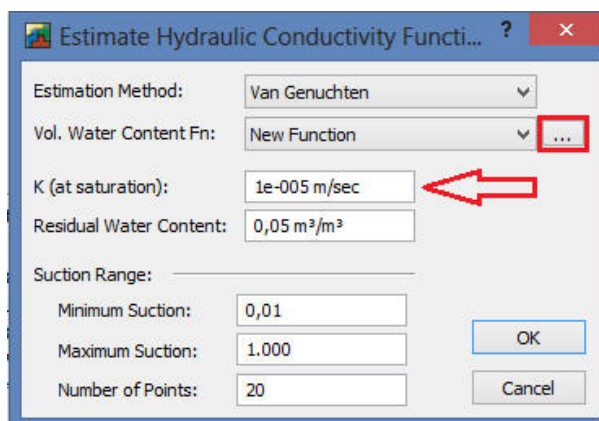
Figura A11 – Estimate (Estimativa).



Fonte: O autor(2015).

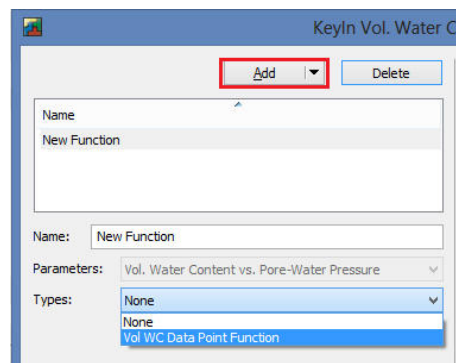
A seguinte janela irá aparecer.

Figura A12 - Estimate Hydraulic Conductivity Functions (Estimar Funções de Propriedades Hidráulicas).



Fonte: O autor(2015).

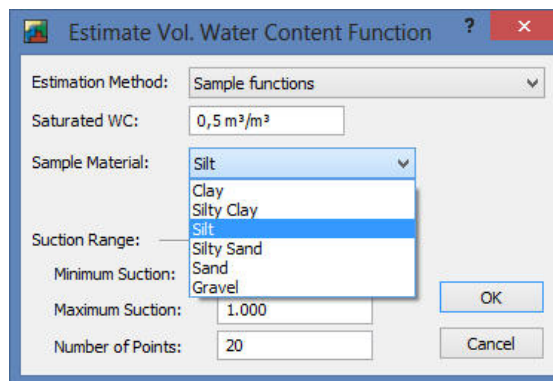
Em seguida, a sequencia de janelas.

Figura A13 - Vol. Water Content Fn

Fonte: O autor(2015).

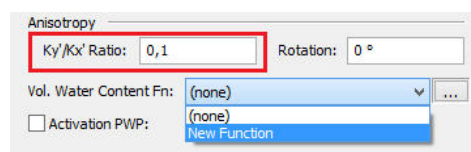
Figura A14 – Estimate 2 (Estimativa 2).

Fonte: O autor(2015).

Figura A15 – Estimate Vol. Water Content Function.

Fonte: O autor(2015).

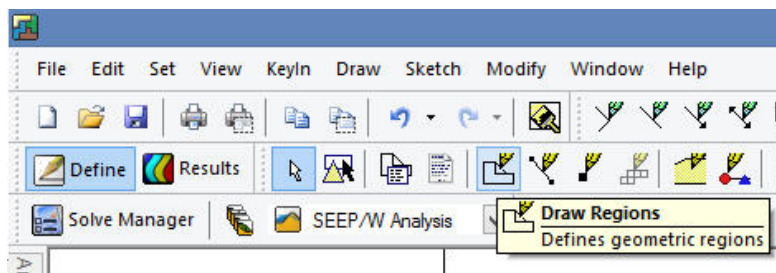
Em seguida define-se a condutividade vertical utilizando razão k_y'/k_x' no item *Anisotropy*

Figura A16 – Anisotropy (Anisotropia).

Fonte: O autor(2015).

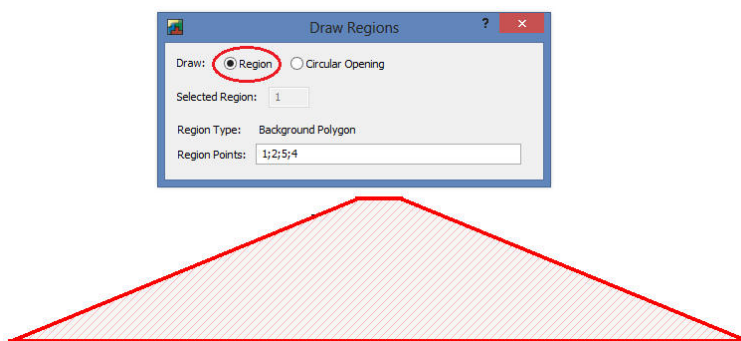
Após definir as propriedades hidráulicas no solo, é necessário definir a região no desenho onde será usado o solo. Para isso, deve-se utilizar o comando *Draw Regions*

Figura A17 – Draw Regions (Desenhar Regiões).



Fonte: O autor(2015).

Figura A18 – Região desenhada.

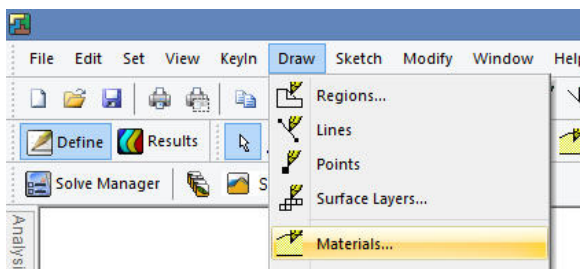


Fonte: O autor(2015).

O item *Region* deve estar marcado para que a região de interesse seja uma região fechada.

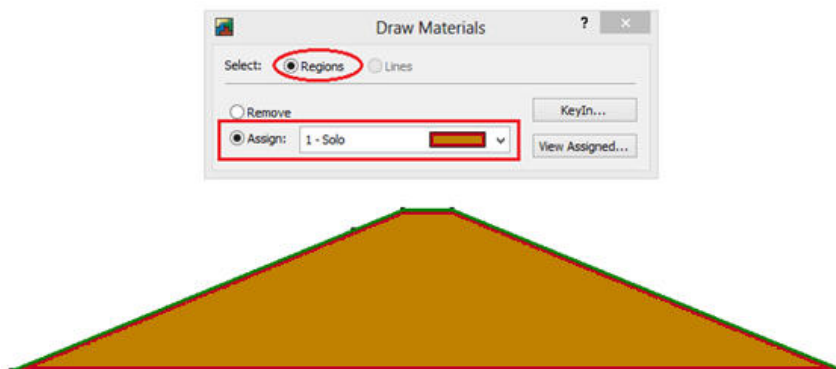
Em seguida deve-se ir no menu Draw → Materials

Figura A19 – Draw Materials (“Desenhar” Materiais).



Fonte: O autor(2015).

Figura A20 – Materiais “desenhados”

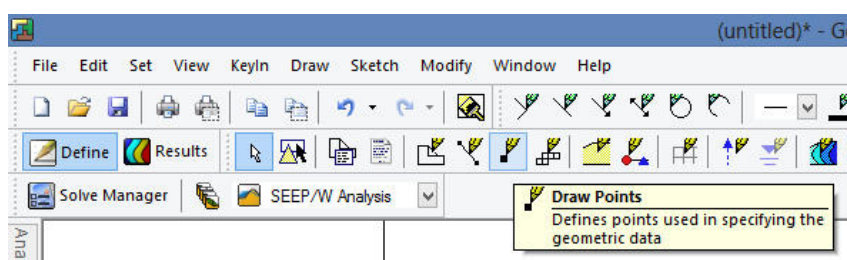


Fonte: O autor(2015).

4º passo – Colocação do filtro. Nesta etapa será demonstrada apenas o caso do filtro tipo chaminé. Para o filtro tipo tapete utiliza a mesma ideia enquanto na barragem sem filtro, este passo pode ser pulado.

Para colocação do filtro, determina as linhas por onde este irá passar. Uma linha horizontal na fundação da barragem já foi definida no segundo passo e não se pode criar uma linha onde já existe uma, assim, cria-se um ponto que separa esta linha horizontal e cria uma nova linha que define a parte vertical do filtro. Usa-se o comando *Draw Points* mostrado na Figura A21

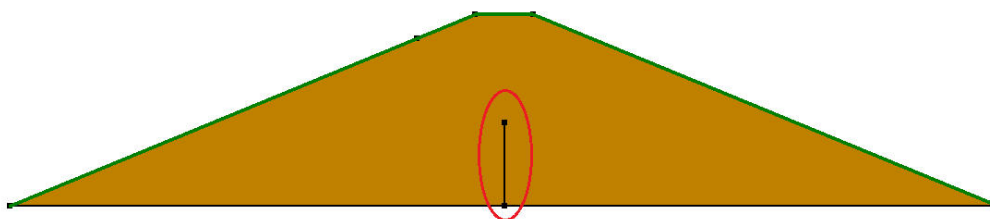
Figura A21 – Draw points (Desenhar pontos).



Fonte: O autor(2015).

Resultando na Figura A22

Figura A22 – Desenho de pontos.

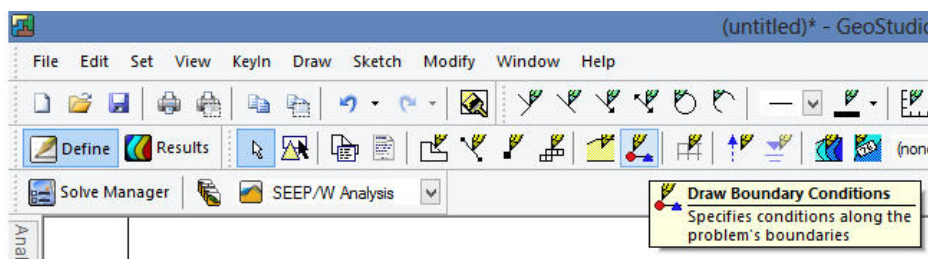


Fonte: O autor(2015).

5º passo – Definição das condições de contorno. O SEEP/W permite que o usuário coloque condições de maneira bem mais simples que no método manual, desta forma, o programa já reconhece que a percolação se dá apenas pelo maciço, logo, não há necessidade de se colocar as condições de impermeabilidade no ar e na fundação. Sendo assim, as condições colocadas são (1) a equipotencial no talude de montante, (2) o talude por onde a água deve escoar e (3) a poro-pressão nula no filtro.

Para isso, deve-se usar o comando *Draw Boundary Conditions*

Figura A23 – Draw Boundary Conditions (Desenhar condições de contorno).

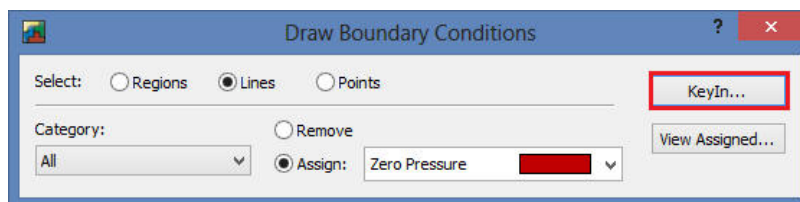


Fonte: O autor(2015).

A seguinte janela irá aparecer

No item *KeyIn* será criada a condição

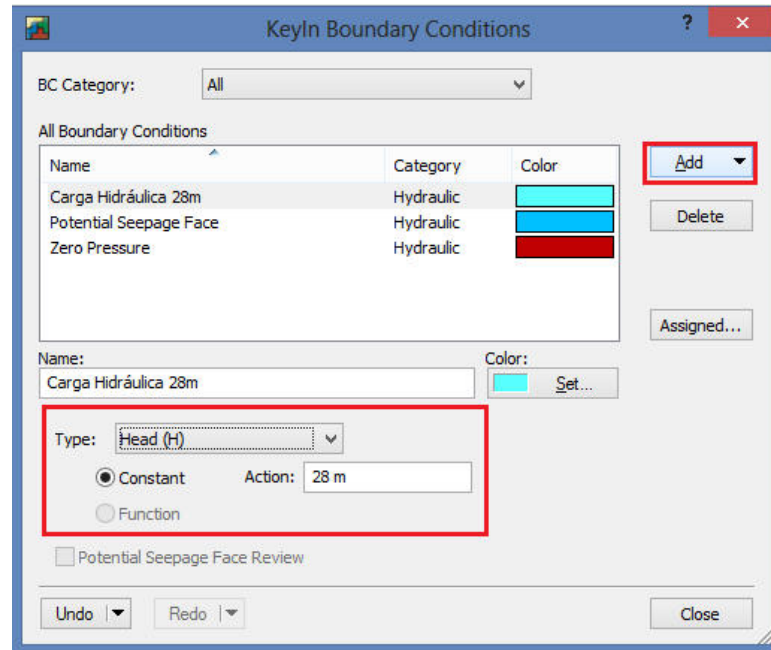
Figura A24 - Draw Boundary Conditions 2 (Desenhar condições de contorno 2).



Fonte: O autor(2015).

A seguinte janela irá aparecer. O usuário deve adicionar uma nova condição em *Add* em seguida, definir o tipo “carga hidráulica 28m” em *Type Head*, *Constant* e *Action* igual a 28m.

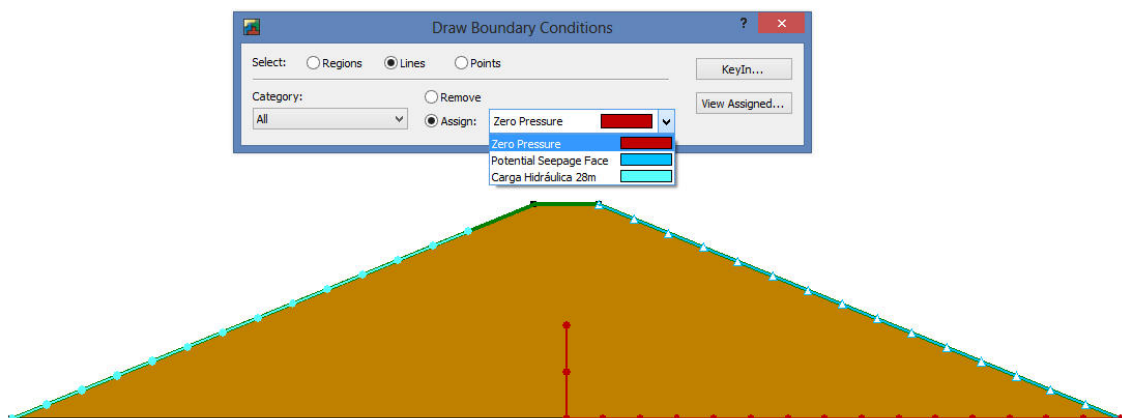
Figura A25 – KeyIn Boundary Conditions (Gerenciar condições de contorno).



Fonte: O autor(2015).

Após a criação da nova condição, basta impor as condições nas suas respectivas linhas.

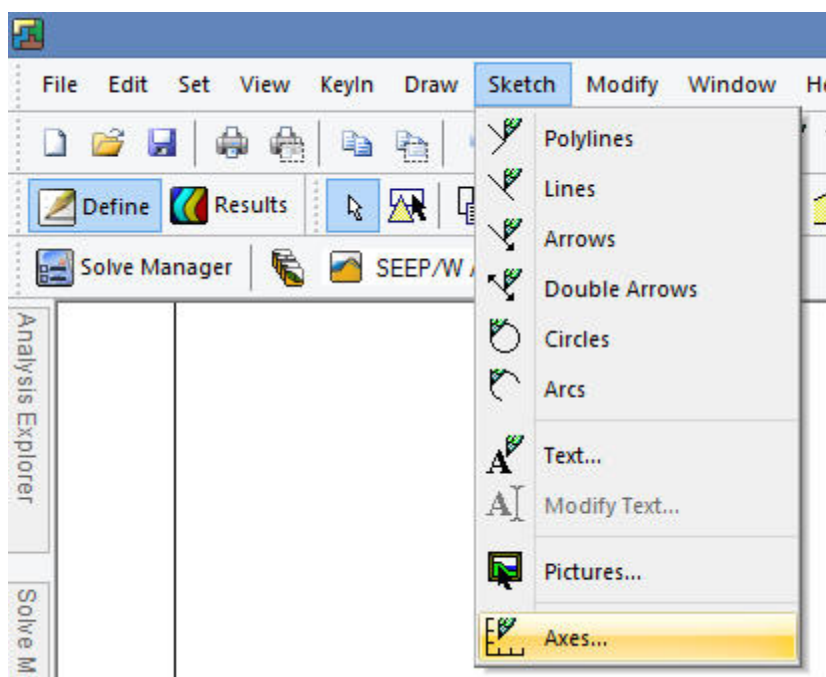
Figura A26 – Condições de contorno impostas.



Fonte: O autor(2015).

6º passo – Colocação dos eixos. Permite visualizar o comprimento e a cota de cada ponto. Para isso, o usuário deve ir no menu *Sketch* → *Axes*

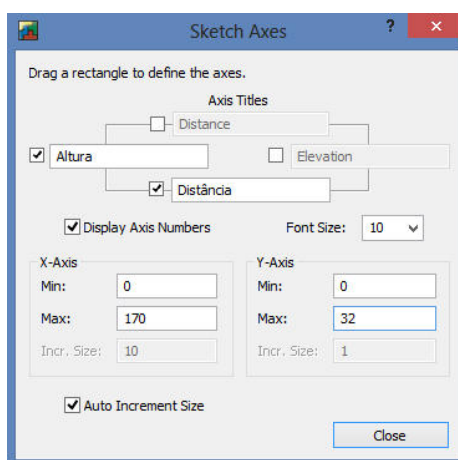
Figura A27 – Axes (Eixos)



Fonte: O autor(2015).

A seguinte janela irá aparecer

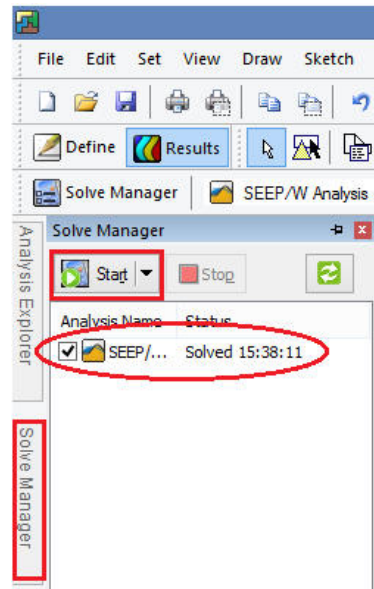
Figura A28 – Sketch Axes (Esboçar eixos).



Fonte: O autor(2015).

7º passo – Geração de resultados. Para gerar os resultados o usuário deve ir na aba *Solve Manager*, selecionar a opção SEEP e em seguida *Start*

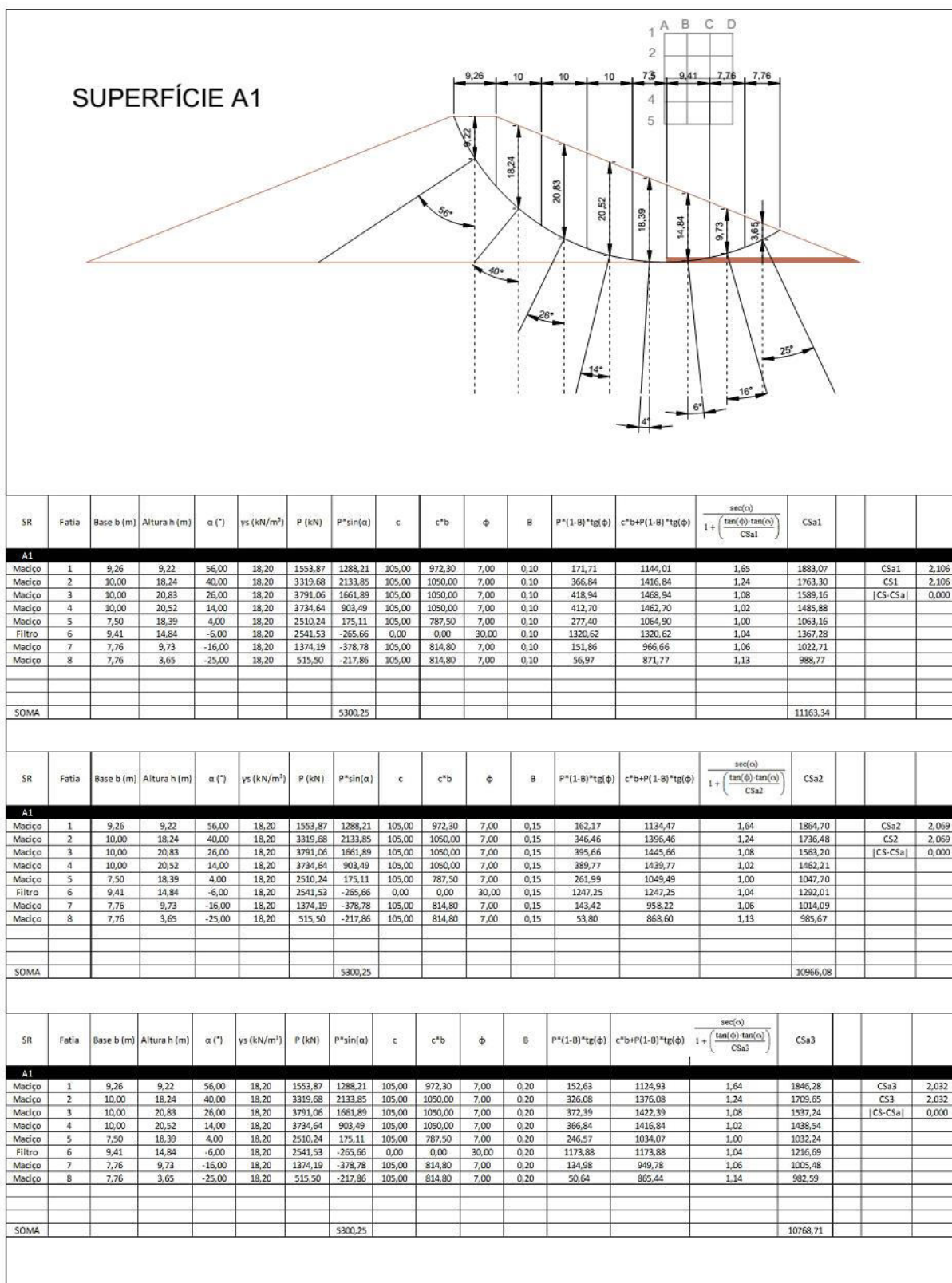
Figura A29 – Solve Manager (Gerenciador de soluções)



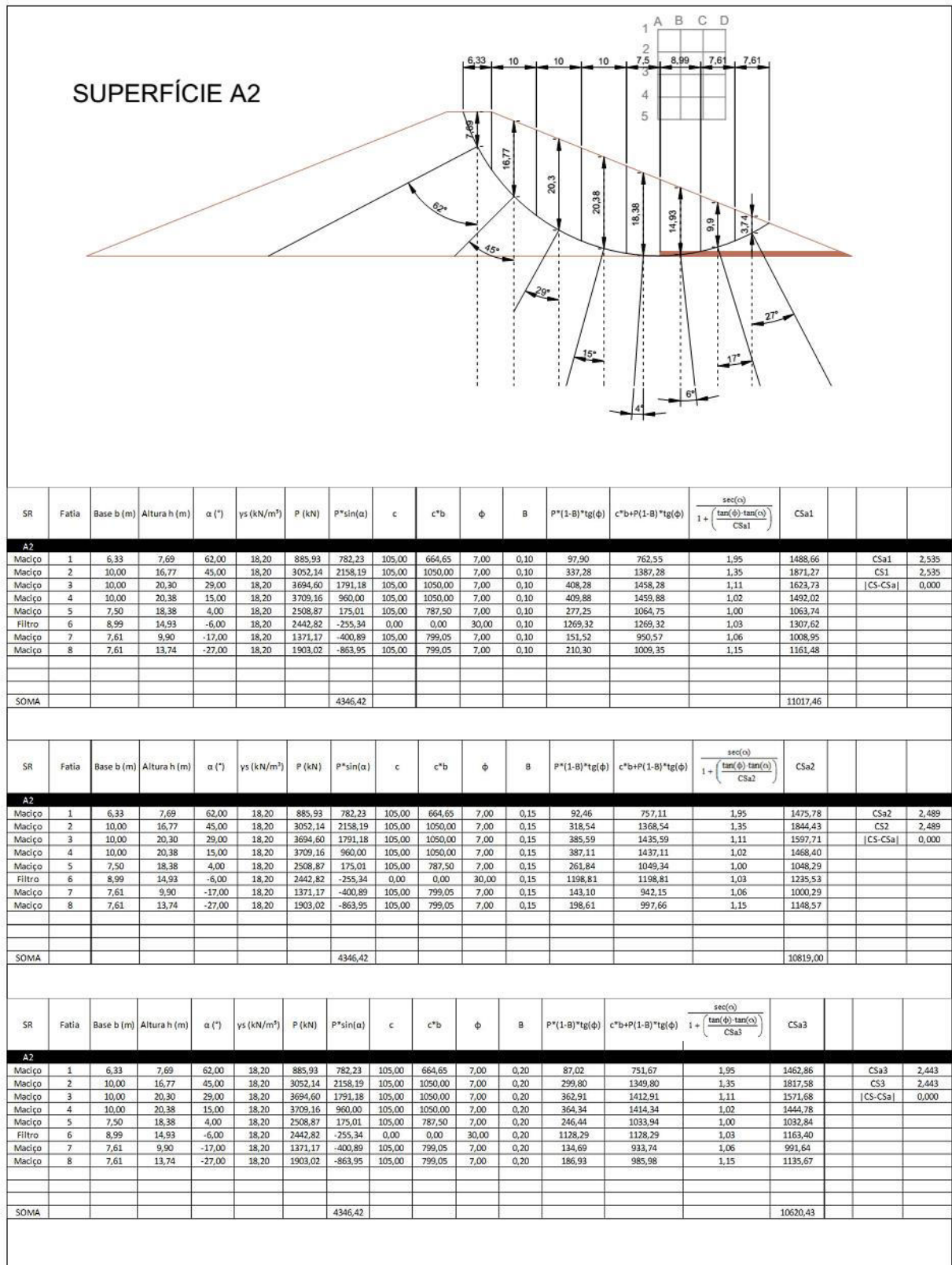
Fonte: O autor(2015).

ANEXO B**RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE
DE JUSANTE FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO**

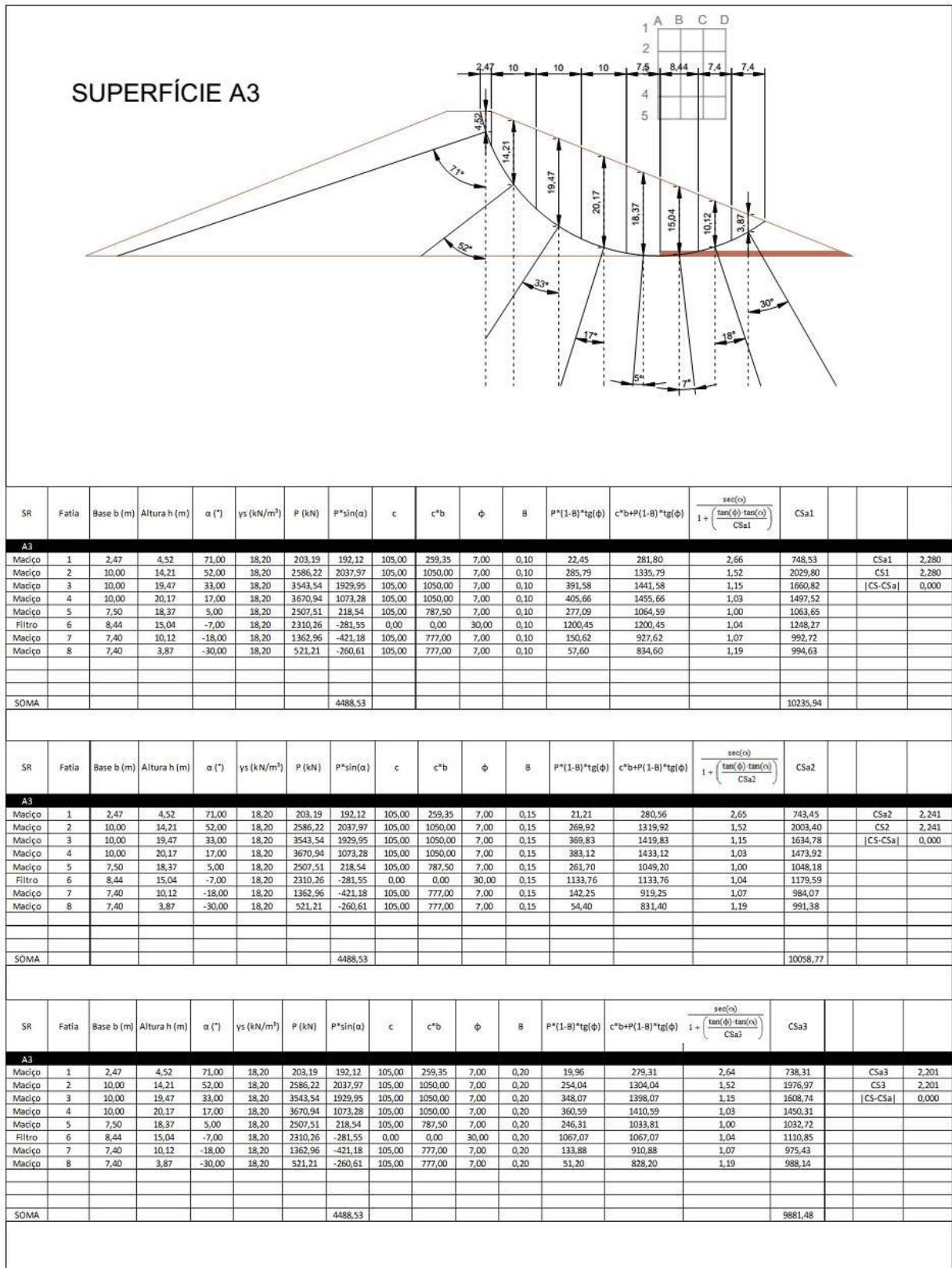
Figura B1 – Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase final de construção obtidas pelo autor. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.



(a)

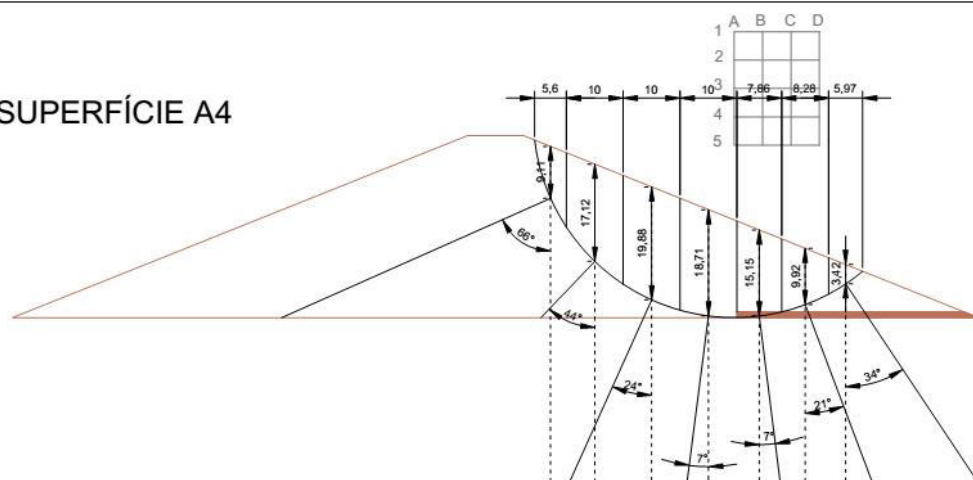


(b)



(c)

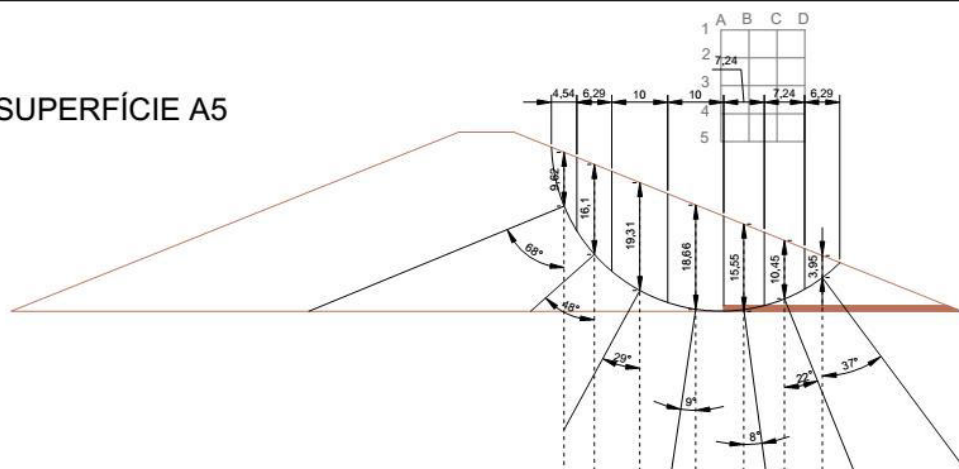
SUPERFÍCIE A4



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P^* (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$c^* b + P (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \tan(\alpha)}{CSa1} \right)}$	CSa1		
A4																	
Maciço	1	5,60	9,11	66,00	18,20	928,49	848,22	105,00	588,00	7,00	0,10	102,60	690,60	2,21	1525,35	CSa1	2,438
Maciço	2	10,00	17,12	44,00	18,20	3115,84	2164,44	105,00	1050,00	7,00	0,10	344,32	1394,32	1,33	1848,42	CS1	2,438
Maciço	3	10,00	19,88	24,00	18,20	3618,16	1471,64	105,00	1050,00	7,00	0,10	399,83	1449,83	1,07	1552,23	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	18,71	7,00	18,20	3405,22	414,99	105,00	1050,00	7,00	0,10	376,30	1426,30	1,00	1428,18		
Filtro	5	7,86	15,15	-7,00	18,20	2167,24	-264,12	0,00	0,00	30,00	0,10	1126,13	1126,13	1,04	1168,57		
Maciço	6	8,28	9,92	-21,00	18,20	1494,90	-535,73	105,00	869,40	7,00	0,10	165,20	1034,60	1,09	1130,05		
Maciço	7	5,97	3,42	-34,00	18,20	371,60	-207,79	105,00	626,85	7,00	0,10	41,06	667,91	1,25	833,98		
SOMA							3891,65								9486,78		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P^* (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$c^* b + P (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \tan(\alpha)}{CSa2} \right)}$	CSa2		
A4																	
Maciço	1	5,60	9,11	66,00	18,20	928,49	848,22	105,00	588,00	7,00	0,15	96,90	684,90	2,20	1510,06	CSa2	2,396
Maciço	2	10,00	17,12	44,00	18,20	3115,84	2164,44	105,00	1050,00	7,00	0,15	325,19	1375,19	1,32	1821,58	CS2	2,396
Maciço	3	10,00	19,88	24,00	18,20	3618,16	1471,64	105,00	1050,00	7,00	0,15	377,62	1427,62	1,07	1527,86	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	18,71	7,00	18,20	3405,22	414,99	105,00	1050,00	7,00	0,15	355,39	1405,39	1,00	1407,09		
Filtro	5	7,86	15,15	-7,00	18,20	2167,24	-264,12	0,00	0,00	30,00	0,15	1063,57	1063,57	1,04	1104,23		
Maciço	6	8,28	9,92	-21,00	18,20	1494,90	-535,73	105,00	869,40	7,00	0,15	156,02	1025,42	1,09	1120,42		
Maciço	7	5,97	3,42	-34,00	18,20	371,60	-207,79	105,00	626,85	7,00	0,15	38,78	665,63	1,25	831,65		
SOMA							3891,65								9322,88		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P^* (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$c^* b + P (1-\theta) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \tan(\alpha)}{CSa3} \right)}$	CSa3		
A4																	
Maciço	1	5,60	9,11	66,00	18,20	928,49	848,22	105,00	588,00	7,00	0,20	91,20	679,20	2,20	1494,73	CSa3	2,353
Maciço	2	10,00	17,12	44,00	18,20	3115,84	2164,44	105,00	1050,00	7,00	0,20	306,06	1356,06	1,32	1794,73	CS3	2,353
Maciço	3	10,00	19,88	24,00	18,20	3618,16	1471,64	105,00	1050,00	7,00	0,20	355,40	1405,40	1,07	1503,48	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	18,71	7,00	18,20	3405,22	414,99	105,00	1050,00	7,00	0,20	334,49	1384,49	1,00	1386,01		
Filtro	5	7,86	15,15	-7,00	18,20	2167,24	-264,12	0,00	0,00	30,00	0,20	1001,00	1001,00	1,04	1039,84		
Maciço	6	8,28	9,92	-21,00	18,20	1494,90	-535,73	105,00	869,40	7,00	0,20	146,84	1016,24	1,09	1110,79		
Maciço	7	5,97	3,42	-34,00	18,20	371,60	-207,79	105,00	626,85	7,00	0,20	36,50	663,35	1,25	829,33		
SOMA							3891,65								9158,91		

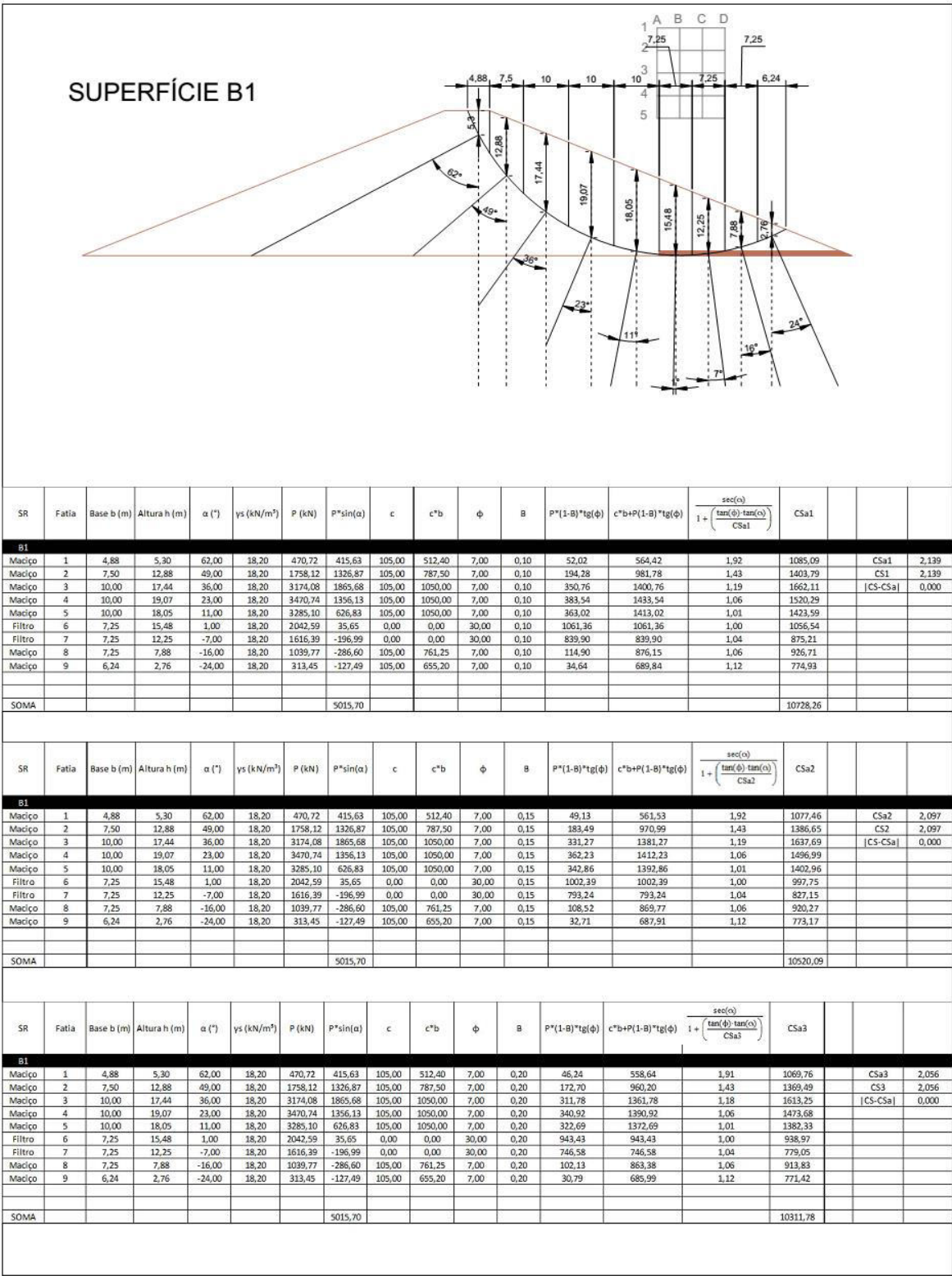
(d)

SUPERFÍCIE A5

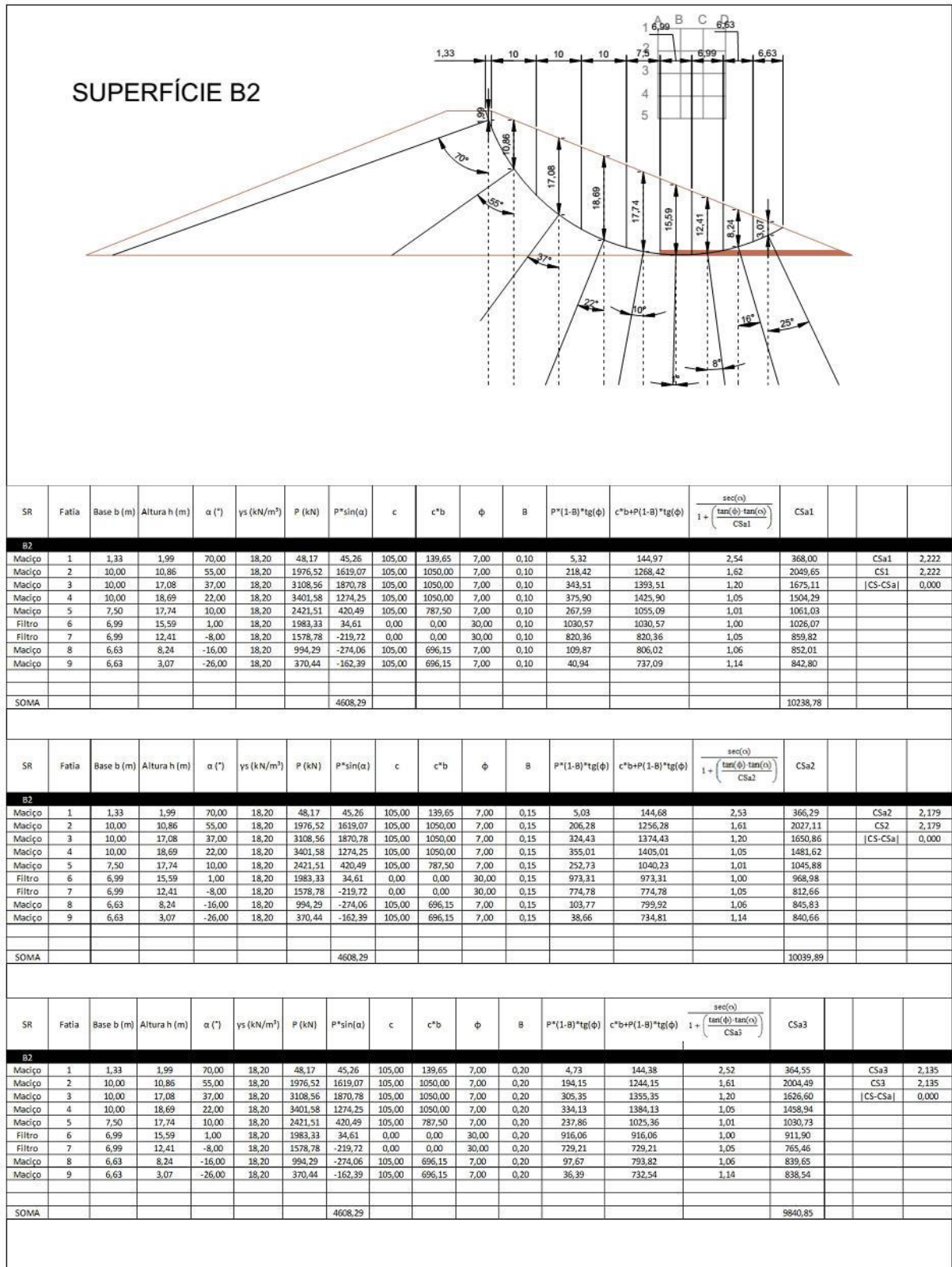


SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1		
A5																	
Maiço	1	4,54	9,62	68,00	18,20	794,88	737,00	105,00	476,70	7,00	0,10	87,84	564,54	2,39	1351,77	CSa1	2,646
Maiço	2	6,29	16,10	48,00	18,20	1843,10	1369,69	105,00	660,45	7,00	0,10	203,67	864,12	1,42	1228,12	CS1	2,646
Maiço	3	10,00	19,31	29,00	18,20	3514,42	1703,82	105,00	1050,00	7,00	0,10	388,36	1438,36	1,11	1603,32	[CS-CSa]	0,000
Maiço	4	10,00	18,66	9,00	18,20	3396,12	531,27	105,00	1050,00	7,00	0,10	375,29	1425,29	1,01	1432,53		
Filtro	5	7,24	15,55	-8,00	18,20	2048,99	-285,16	0,00	0,00	30,00	0,10	1064,69	1064,69	1,04	1109,16		
Maiço	6	7,24	10,45	-22,00	18,20	1376,98	-515,82	105,00	760,20	7,00	0,10	152,16	912,36	1,10	1002,82		
Maiço	7	6,29	3,95	-37,00	18,20	452,19	-272,13	105,00	660,45	7,00	0,10	49,97	710,42	1,30	921,77		
SOMA							3268,66								8649,50		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2		
A5																	
Maiço	1	4,54	9,62	68,00	18,20	794,88	737,00	105,00	476,70	7,00	0,15	82,96	559,66	2,39	1337,65	CSa2	2,600
Maiço	2	6,29	16,10	48,00	18,20	1843,10	1369,69	105,00	660,45	7,00	0,15	192,36	852,81	1,42	1210,99	CS2	2,600
Maiço	3	10,00	19,31	29,00	18,20	3514,42	1703,82	105,00	1050,00	7,00	0,15	366,79	1416,79	1,11	1578,57	[CS-CSa]	0,000
Maiço	4	10,00	18,66	9,00	18,20	3396,12	531,27	105,00	1050,00	7,00	0,15	354,44	1404,44	1,00	1411,39		
Filtro	5	7,24	15,55	-8,00	18,20	2048,99	-285,16	0,00	0,00	30,00	0,15	1005,54	1005,54	1,04	1048,13		
Maiço	6	7,24	10,45	-22,00	18,20	1376,98	-515,82	105,00	760,20	7,00	0,15	143,71	903,91	1,10	993,86		
Maiço	7	6,29	3,95	-37,00	18,20	452,19	-272,13	105,00	660,45	7,00	0,15	47,19	707,64	1,30	918,76		
SOMA							3268,66								8499,36		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3}}$	CSa3		
A5																	
Maiço	1	4,54	9,62	68,00	18,20	794,88	737,00	105,00	476,70	7,00	0,20	78,08	554,78	2,39	1323,49	CSa3	2,554
Maiço	2	6,29	16,10	48,00	18,20	1843,10	1369,69	105,00	660,45	7,00	0,20	181,04	841,49	1,42	1193,85	CS3	2,554
Maiço	3	10,00	19,31	29,00	18,20	3514,42	1703,82	105,00	1050,00	7,00	0,20	345,21	1395,21	1,11	1553,82	[CS-CSa]	0,000
Maiço	4	10,00	18,66	9,00	18,20	3396,12	531,27	105,00	1050,00	7,00	0,20	333,59	1383,59	1,00	1390,25		
Filtro	5	7,24	15,55	-8,00	18,20	2048,99	-285,16	0,00	0,00	30,00	0,20	946,39	946,39	1,04	987,05		
Maiço	6	7,24	10,45	-22,00	18,20	1376,98	-515,82	105,00	760,20	7,00	0,20	135,26	895,46	1,10	984,91		
Maiço	7	6,29	3,95	-37,00	18,20	452,19	-272,13	105,00	660,45	7,00	0,20	44,42	704,87	1,30	915,76		
SOMA							3268,66								8349,14		

(e)

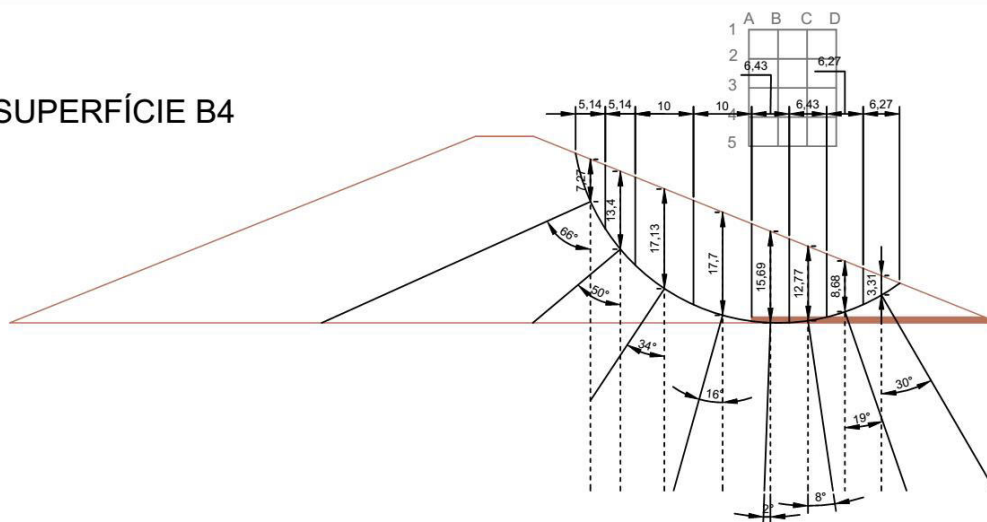


(f)



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*tg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*tg(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1			
B3																		
Maciço	1	7,36	8,16	62,00	18,20	1093,05	965,10	105,00	772,80	7,00	0,10	120,79	893,59	1,94	1731,67		CSa1	2,329
Maciço	2	7,36	14,99	44,00	18,20	2007,94	1394,83	105,00	772,80	7,00	0,10	221,89	994,69	1,32	1315,78		CS1	2,329
Maciço	3	10,00	17,97	29,00	18,20	3270,54	1585,59	105,00	1050,00	7,00	0,10	361,41	1411,41	1,11	1567,92	CS-CSa		0,000
Maciço	4	10,00	17,86	14,00	18,20	3250,52	786,37	105,00	1050,00	7,00	0,10	359,20	1409,20	1,02	1433,50			
Filtro	5	6,72	15,64	2,00	18,20	1912,83	66,76	0,00	0,00	30,00	0,10	993,94	993,94	0,99	986,01			
Filtro	6	6,90	12,58	-8,00	18,20	1579,80	-219,87	0,00	0,00	30,00	0,10	820,89	820,89	1,05	858,88			
Maciço	7	6,30	8,45	-18,00	18,20	968,88	-299,40	105,00	661,50	7,00	0,10	107,07	768,57	1,07	822,21			
Maciço	8	6,47	3,18	-28,00	18,20	374,46	-175,80	105,00	679,35	7,00	0,10	41,38	720,73	1,17	839,82			
SOMA							4103,59								9555,78			

SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*tg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*tg(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2			
B3																		
Maciço	1	7,36	8,16	62,00	18,20	1093,05	965,10	105,00	772,80	7,00	0,15	114,08	886,88	1,93	1715,56		CSa2	2,283
Maciço	2	7,36	14,99	44,00	18,20	2007,94	1394,83	105,00	772,80	7,00	0,15	209,56	982,36	1,32	1298,22		CS2	2,283
Maciço	3	10,00	17,97	29,00	18,20	3270,54	1585,59	105,00	1050,00	7,00	0,15	341,34	1391,34	1,11	1544,74	CS-CSa		0,000
Maciço	4	10,00	17,86	14,00	18,20	3250,52	786,37	105,00	1050,00	7,00	0,15	339,25	1389,25	1,02	1412,83			
Filtro	5	6,72	15,64	2,00	18,20	1912,83	66,76	0,00	0,00	30,00	0,15	938,72	938,72	0,99	931,07			
Filtro	6	6,90	12,58	-8,00	18,20	1579,80	-219,87	0,00	0,00	30,00	0,15	775,28	775,28	1,05	811,75			
Maciço	7	6,30	8,45	-18,00	18,20	968,88	-299,40	105,00	661,50	7,00	0,15	101,12	762,62	1,07	816,13			
Maciço	8	6,47	3,18	-28,00	18,20	374,46	-175,80	105,00	679,35	7,00	0,15	39,08	718,43	1,17	837,63			

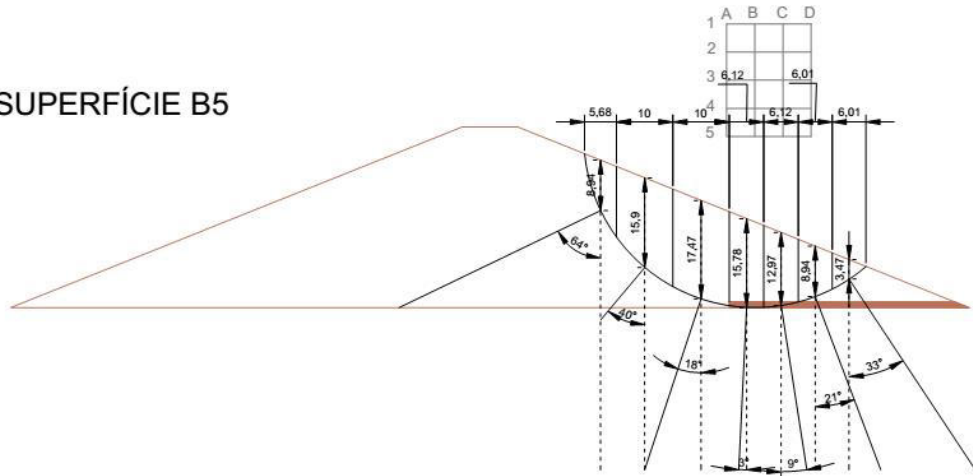


SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^*\sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*\lg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*\lg(\phi)$	$t+\frac{\sec(\alpha)}{1+\left(\frac{\tan(\phi)\cdot\tan(\alpha)}{CSa1}\right)}$	CSa1			
B4																		
Máçico	1	5,14	7,27	66,00	18,20	680,09	621,30	105,00	539,70	7,00	0,10	75,15	614,85	2,21	1360,72		CSa1	2,486
Máçico	2	5,14	13,40	50,00	18,20	1253,54	960,27	105,00	539,70	7,00	0,10	138,52	678,22	1,47	996,47		CS1	2,486
Máçico	3	10,00	17,13	34,00	18,20	3117,66	1743,37	105,00	1050,00	7,00	0,10	344,52	1394,52	1,17	1627,86	CS-CSa		0,000
Máçico	4	10,00	17,70	16,00	18,20	3221,40	887,94	105,00	1050,00	7,00	0,10	355,98	1405,98	1,03	1442,22			
Filtro	5	6,43	15,69	2,00	18,20	1836,14	64,08	0,00	0,00	30,00	0,10	954,09	954,09	0,99	946,99			
Filtro	6	6,43	12,78	-8,00	18,20	1495,24	-208,10	0,00	0,00	30,00	0,10	776,95	776,95	1,04	811,06			
Máçico	7	6,27	8,68	-19,00	18,20	990,51	-322,48	105,00	658,35	7,00	0,10	109,46	767,81	1,08	826,10			
Máçico	8	6,27	3,31	-30,00	18,20	377,72	-188,86	105,00	658,35	7,00	0,10	41,74	700,09	1,19	832,12			
SOMA							3557,52								8843,54			

SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)*\tan(\phi)$	$c^*b+P(1-B)*\tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2} \right)}$	CSa2			
B4																		
Maciço	1	5,14	7,27	66,00	18,20	680,09	621,30	105,00	539,70	7,00	0,15	70,98	610,68	2,21	1348,77	CSa2	2,437	
Maciço	2	5,14	13,40	50,00	18,20	1253,54	960,27	105,00	539,70	7,00	0,15	130,83	670,53	1,47	984,07	CS2	2,437	
Maciço	3	10,00	17,13	34,00	18,20	3117,66	1743,37	105,00	1050,00	7,00	0,15	325,38	1375,38	1,17	1604,48	CS-CSa	0,000	
Maciço	4	10,00	17,70	16,00	18,20	3221,40	887,94	105,00	1050,00	7,00	0,15	336,21	1386,21	1,03	1421,53			
Filtro	5	6,43	15,69	2,00	18,20	1836,14	64,08	0,00	0,00	30,00	0,15	901,08	901,08	0,99	894,23			
Filtro	6	6,43	12,78	-8,00	18,20	1495,24	-208,10	0,00	0,00	30,00	0,15	733,79	733,79	1,04	766,52			
Maciço	7	6,27	8,68	-19,00	18,20	990,51	-322,48	105,00	658,35	7,00	0,15	103,38	761,73	1,08	819,84			
Maciço	8	6,27	3,31	-30,00	18,20	377,72	-188,86	105,00	658,35	7,00	0,15	39,42	697,77	1,19	829,86			
SOMA							3557,52								8669,30			

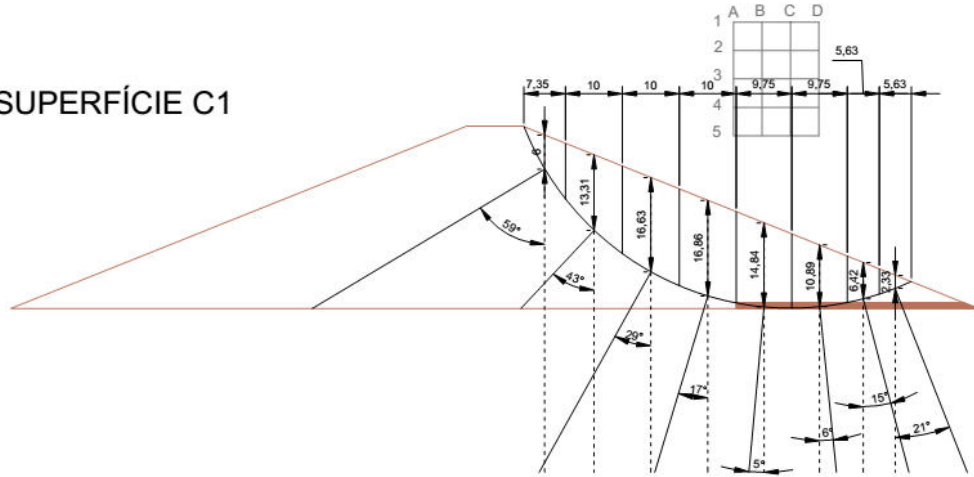
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	$\alpha (^{\circ})$	$y_s \text{ (kN/m}^2\text{)}$	P (kN)	$P*\sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P*(1-B)*tg(\phi)$	$c*b+P(1-B)*tg(\phi)$	$1 + \left(\frac{\sec(\alpha)}{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)} \right) \cdot CSa3$	CSa3			
B4																		
Máçico	1	5,14	7,27	66,00	18,20	680,09	621,30	105,00	539,70	7,00	0,20	66,80	606,50	2,20			CSa3	2,388
Máçico	2	5,14	13,40	50,00	18,20	1253,54	960,27	105,00	539,70	7,00	0,20	123,13	662,83	1,47			CS3	2,388
Máçico	3	10,00	17,13	34,00	18,20	3117,66	1743,37	105,00	1050,00	7,00	0,20	306,24	1356,24	1,17			[CS-CSa]	0,000
Máçico	4	10,00	17,70	16,00	18,20	3221,40	887,94	105,00	1050,00	7,00	0,20	316,43	1366,43	1,03				
Filtro	5	6,43	15,69	2,00	18,20	1836,14	64,08	0,00	0,00	30,00	0,20	848,08	848,08	0,99				
Filtro	6	6,43	12,78	-8,00	18,20	1495,24	-208,10	0,00	0,00	30,00	0,20	690,62	690,62	1,05				
Máçico	7	6,27	8,68	-19,00	18,20	990,51	-322,48	105,00	658,35	7,00	0,20	97,30	755,65	1,08				
Máçico	8	6,27	3,31	-30,00	18,20	377,72	-188,86	105,00	658,35	7,00	0,20	37,10	695,45	1,19				
SOMA							3557,52								8494,94			

SUPERFÍCIE B5



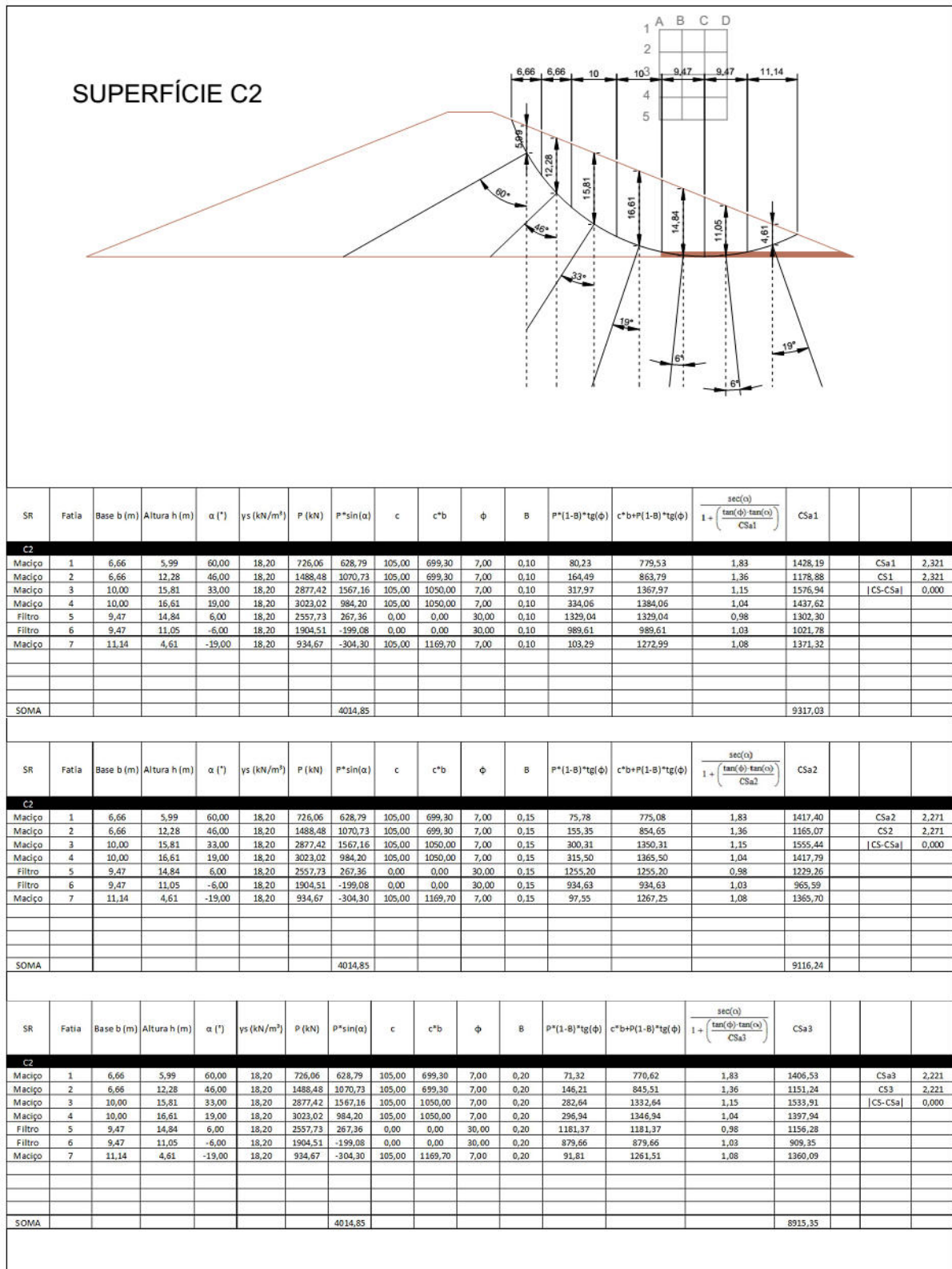
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1			
B5																		
Madiço	1	5,68	8,94	64,00	18,20	924,18	830,65	105,00	596,40	7,00	0,10	102,13	698,53	2,08	1456,02	CSa1		2,667
Madiço	2	10,00	15,90	40,00	18,20	2893,80	1860,10	105,00	1050,00	7,00	0,10	319,78	1369,78	1,26	1721,61	CS1		2,667
Madiço	3	10,00	17,47	18,00	18,20	3179,54	982,53	105,00	1050,00	7,00	0,10	351,36	1401,36	1,04	1451,76	[CS-CSa]		0,000
Filtro	4	6,11	15,78	3,00	18,20	1755,34	91,87	0,00	0,00	30,00	0,10	912,10	912,10	0,99	903,11			
Filtro	5	6,12	12,97	-9,00	18,20	1444,65	-225,99	0,00	0,00	30,00	0,10	750,66	750,66	1,05	787,00			
Madiço	6	6,01	8,94	-21,00	18,20	977,88	-350,44	105,00	631,05	7,00	0,10	108,06	739,11	1,09	805,94			
Madiço	7	6,01	3,47	-33,00	18,20	379,56	-206,72	105,00	631,05	7,00	0,10	41,94	672,99	1,23	827,18			
SOMA							2981,99								7952,63			
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2			
B5																		
Madiço	1	5,68	8,94	64,00	18,20	924,18	830,65	105,00	596,40	7,00	0,15	96,45	692,83	2,08	1441,63	CSa2		2,613
Madiço	2	10,00	15,90	40,00	18,20	2893,80	1860,10	105,00	1050,00	7,00	0,15	302,02	1352,02	1,26	1697,98	CS2		2,613
Madiço	3	10,00	17,47	18,00	18,20	3179,54	982,53	105,00	1050,00	7,00	0,15	331,84	1381,84	1,04	1431,10	[CS-CSa]		0,000
Filtro	4	6,11	15,78	3,00	18,20	1755,34	91,87	0,00	0,00	30,00	0,15	861,43	861,43	0,99	852,74			
Filtro	5	6,12	12,97	-9,00	18,20	1444,65	-225,99	0,00	0,00	30,00	0,15	708,96	708,96	1,05	743,83			
Madiço	6	6,01	8,94	-21,00	18,20	977,88	-350,44	105,00	631,05	7,00	0,15	102,06	733,11	1,09	795,69			
Madiço	7	6,01	3,47	-33,00	18,20	379,56	-206,72	105,00	631,05	7,00	0,15	39,61	670,66	1,23	824,85			
SOMA							2981,99								7791,81			
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	θ	$P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot [1 - \theta] \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3}}$	CSa3			
B5																		
Madiço	1	5,68	8,94	64,00	18,20	924,18	830,65	105,00	596,40	7,00	0,20	90,78	687,18	2,08	1427,17	CSa3		2,559
Madiço	2	10,00	15,90	40,00	18,20	2893,80	1860,10	105,00	1050,00	7,00	0,20	284,25	1334,25	1,25	1674,33	CS3		2,559
Madiço	3	10,00	17,47	18,00	18,20	3179,54	982,53	105,00	1050,00	7,00	0,20	312,32	1362,32	1,04	1410,44	[CS-CSa]		0,000
Filtro	4	6,11	15,78	3,00	18,20	1755,34	91,87	0,00	0,00	30,00	0,20	810,76	810,76	0,99	802,38			
Filtro	5	6,12	12,97	-9,00	18,20	1444,65	-225,99	0,00	0,00	30,00	0,20	667,26	667,26	1,05	700,61			
Madiço	6	6,01	8,94	-21,00	18,20	977,88	-350,44	105,00	631,05	7,00	0,20	96,05	727,10	1,09	793,45			
Madiço	7	6,01	3,47	-33,00	18,20	379,56	-206,72	105,00	631,05	7,00	0,20	37,28	668,33	1,23	822,53			
SOMA							2981,99								7630,90			

SUPERFÍCIE C1

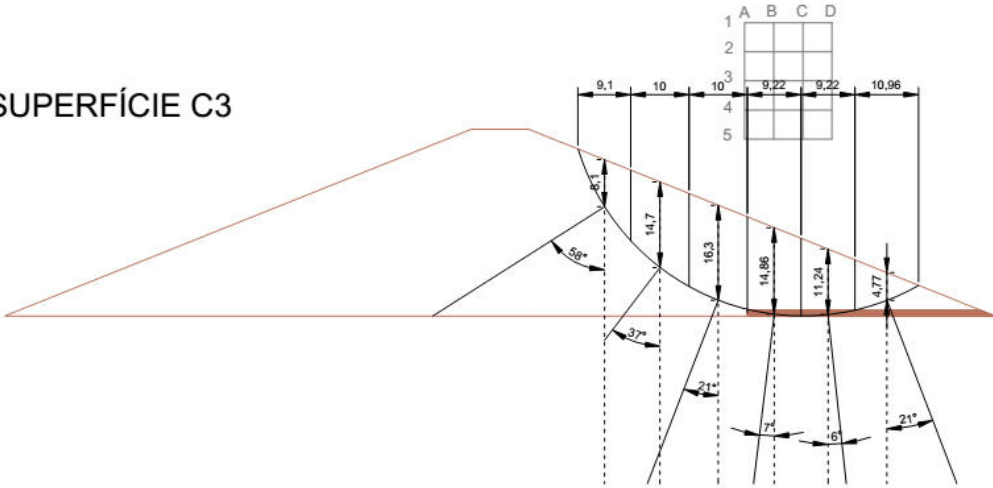


SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c^*b	ϕ	B	$P^*[1-B] \cdot \tan(\phi)$	$c^*b + P[1-B] \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1} \right)}$	CSa1		
C1																	
Maciço	1	7,35	6,00	59,00	18,20	802,62	687,98	105,00	771,75	7,00	0,10	88,69	860,44	1,78	1530,15	CSa1	2,226
Maciço	2	10,00	13,31	43,00	18,20	2422,42	1652,09	105,00	1050,00	7,00	0,10	267,69	1317,69	1,30	1713,56	CS1	2,226
Maciço	3	10,00	16,63	29,00	18,20	3026,66	1467,35	105,00	1050,00	7,00	0,10	334,46	1384,46	1,11	1535,96	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	16,86	17,00	18,20	3068,52	897,15	105,00	1050,00	7,00	0,10	339,09	1389,09	1,03	1428,47		
Filtro	5	9,75	14,84	5,00	18,20	2633,36	229,51	0,00	0,00	30,00	0,10	1368,33	1368,33	0,98	1343,08		
Filtro	6	9,75	10,89	-6,00	18,20	1932,43	-201,99	0,00	0,00	30,00	0,10	1004,12	1004,12	1,03	1037,95		
Maciço	7	5,63	6,42	-15,00	18,20	657,83	-170,26	105,00	591,15	7,00	0,10	72,69	663,84	1,05	697,57		
Maciço	8	5,63	2,33	-21,00	18,20	238,75	-85,56	105,00	591,15	7,00	0,10	26,38	617,53	1,09	675,78		
SOMA							4476,27								9962,52		
C2																	
Maciço	1	7,35	6,00	59,00	18,20	802,62	687,98	105,00	771,75	7,00	0,15	83,77	855,52	1,78	1518,61	CSa2	2,178
Maciço	2	10,00	13,31	43,00	18,20	2422,42	1652,09	105,00	1050,00	7,00	0,15	252,82	1302,82	1,30	1692,42	CS2	2,178
Maciço	3	10,00	16,63	29,00	18,20	3026,66	1467,35	105,00	1050,00	7,00	0,15	315,88	1365,88	1,11	1514,37	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	16,86	17,00	18,20	3068,52	897,15	105,00	1050,00	7,00	0,15	320,25	1370,25	1,03	1408,59		
Filtro	5	9,75	14,84	5,00	18,20	2633,36	229,51	0,00	0,00	30,00	0,15	1292,31	1292,31	0,98	1267,85		
Filtro	6	9,75	10,89	-6,00	18,20	1932,43	-201,99	0,00	0,00	30,00	0,15	948,34	948,34	1,03	980,88		
Maciço	7	5,63	6,42	-15,00	18,20	657,83	-170,26	105,00	591,15	7,00	0,15	68,66	659,81	1,05	659,56		
Maciço	8	5,63	2,33	-21,00	18,20	238,75	-85,56	105,00	591,15	7,00	0,15	24,92	616,07	1,09	674,49		
SOMA							4476,27								9750,78		
C3																	
Maciço	1	7,35	6,00	59,00	18,20	802,62	687,98	105,00	771,75	7,00	0,20	78,84	850,59	1,77	1506,98	CSa3	2,131
Maciço	2	10,00	13,31	43,00	18,20	2422,42	1652,09	105,00	1050,00	7,00	0,20	237,95	1287,95	1,30	1671,24	CS3	2,131
Maciço	3	10,00	16,63	29,00	18,20	3026,66	1467,35	105,00	1050,00	7,00	0,20	297,30	1347,30	1,11	1492,76	[CS-CSa]	0,000
Maciço	4	10,00	16,86	17,00	18,20	3068,52	897,15	105,00	1050,00	7,00	0,20	301,41	1351,41	1,03	1388,70		
Filtro	5	9,75	14,84	5,00	18,20	2633,36	229,51	0,00	0,00	30,00	0,20	1216,30	1216,30	0,98	1192,67		
Filtro	6	9,75	10,89	-6,00	18,20	1932,43	-201,99	0,00	0,00	30,00	0,20	892,55	892,55	1,03	923,78		
Maciço	7	5,63	6,42	-15,00	18,20	657,83	-170,26	105,00	591,15	7,00	0,20	64,62	655,77	1,05	689,55		
Maciço	8	5,63	2,33	-21,00	18,20	238,75	-85,56	105,00	591,15	7,00	0,20	23,45	614,60	1,10	673,22		
SOMA							4476,27								9538,89		

(k)



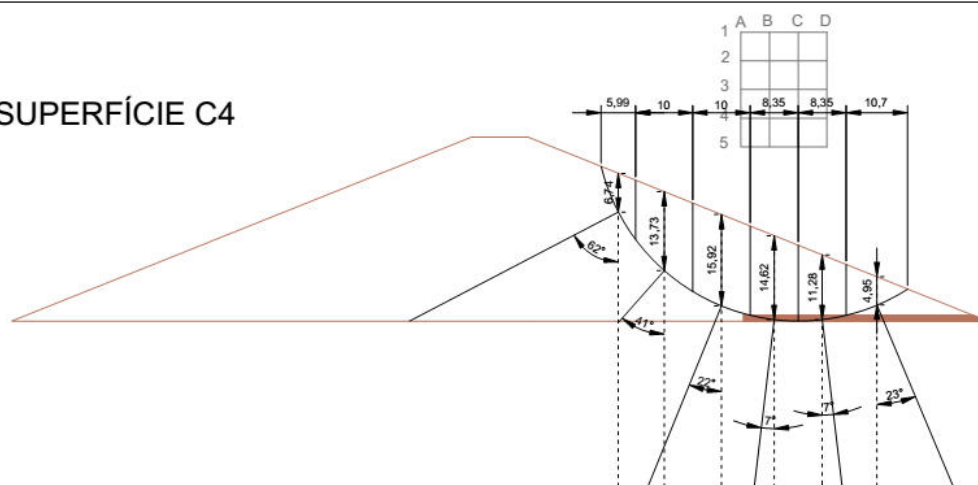
SUPERFÍCIE C3



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c^*b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1} \right)}$	CSa1		
C3																	
Maciço	1	9,10	8,10	58,00	18,20	1341,52	1137,68	105,00	955,50	7,00	0,10	148,25	1103,75	1,75	1926,31	CSa1	2,418
Maciço	2	10,00	14,70	37,00	18,20	2675,40	1610,10	105,00	1050,00	7,00	0,10	295,65	1345,65	1,21	1622,83	CS1	2,418
Maciço	3	10,00	16,30	21,00	18,20	2966,60	1063,13	105,00	1050,00	7,00	0,10	327,83	1377,83	1,05	1447,63	[CS-CSa]	0,000
Filtro	4	9,22	14,86	7,00	18,20	2493,57	303,89	0,00	0,00	30,00	0,10	1295,70	1295,70	0,98	1268,24		
Filtro	5	9,22	11,24	-6,00	18,20	1886,12	-197,15	0,00	0,00	30,00	0,10	980,06	980,06	1,03	1010,82		
Maciço	6	10,96	4,77	-21,00	18,20	951,48	-340,98	105,00	1150,80	7,00	0,10	105,14	1255,94	1,09	1372,04		
SOMA							3576,66								8647,88		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c^*b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2} \right)}$	CSa2		
C3																	
Maciço	1	9,10	8,10	58,00	18,20	1341,52	1137,68	105,00	955,50	7,00	0,15	140,01	1095,51	1,74	1908,69	CSa2	2,364
Maciço	2	10,00	14,70	37,00	18,20	2675,40	1610,10	105,00	1050,00	7,00	0,15	279,22	1329,22	1,20	1601,69	CS2	2,364
Maciço	3	10,00	16,30	21,00	18,20	2966,60	1063,13	105,00	1050,00	7,00	0,15	309,61	1359,61	1,05	1427,88	[CS-CSa]	0,000
Filtro	4	9,22	14,86	7,00	18,20	2493,57	303,89	0,00	0,00	30,00	0,15	1223,71	1223,71	0,98	1197,01		
Filtro	5	9,22	11,24	-6,00	18,20	1886,12	-197,15	0,00	0,00	30,00	0,15	925,61	925,61	1,03	955,22		
Maciço	6	10,96	4,77	-21,00	18,20	951,48	-340,98	105,00	1150,80	7,00	0,15	99,30	1250,10	1,09	1366,28		
SOMA							3576,66								8456,78		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c^*b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3} \right)}$	CSa3		
C3																	
Maciço	1	9,10	8,10	58,00	18,20	1341,52	1137,68	105,00	955,50	7,00	0,20	131,77	1087,27	1,74	1890,97	CSa3	2,311
Maciço	2	10,00	14,70	37,00	18,20	2675,40	1610,10	105,00	1050,00	7,00	0,20	262,80	1312,80	1,20	1580,52	CS3	2,311
Maciço	3	10,00	16,30	21,00	18,20	2966,60	1063,13	105,00	1050,00	7,00	0,20	291,40	1341,40	1,05	1408,11	[CS-CSa]	0,000
Filtro	4	9,22	14,86	7,00	18,20	2493,57	303,89	0,00	0,00	30,00	0,20	1151,73	1151,73	0,98	1125,84		
Filtro	5	9,22	11,24	-6,00	18,20	1886,12	-197,15	0,00	0,00	30,00	0,20	871,16	871,16	1,03	895,58		
Maciço	6	10,96	4,77	-21,00	18,20	951,48	-340,98	105,00	1150,80	7,00	0,20	93,46	1244,26	1,09	1360,54		
SOMA							3576,66								8265,56		

(m)

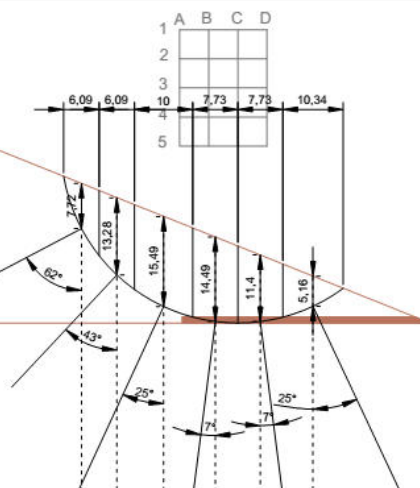
SUPERFÍCIE C4



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1		
C4																	
Maciço	1	5,99	6,74	62,00	18,20	734,78	648,77	105,00	628,95	7,00	0,10	81,20	710,15	1,96	1389,16	CSa1	2,598
Maciço	2	10,00	13,73	41,00	18,20	2498,86	1639,40	105,00	1050,00	7,00	0,10	276,14	1326,14	1,27	1687,80	CS1	2,598
Maciço	3	10,00	15,92	22,00	18,20	2897,44	1085,40	105,00	1050,00	7,00	0,10	320,18	1370,18	1,06	1450,10	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,35	14,62	7,00	18,20	2221,80	270,77	0,00	0,00	30,00	0,10	1154,48	1154,48	0,98	1132,25		
Filtro	5	8,35	11,28	-7,00	18,20	1714,22	-208,91	0,00	0,00	30,00	0,10	890,74	890,74	1,04	922,60		
Maciço	6	10,70	4,95	-23,00	18,20	963,96	-376,65	105,00	1123,50	7,00	0,10	106,52	1230,02	1,11	1363,61		
SOMA							3058,78								7945,52		
C4																	
Maciço	1	5,99	6,74	62,00	18,20	734,78	648,77	105,00	628,95	7,00	0,15	76,69	705,64	1,95	1377,85	CSa2	2,541
Maciço	2	10,00	13,73	41,00	18,20	2498,86	1639,40	105,00	1050,00	7,00	0,15	260,80	1310,80	1,27	1666,82	CS2	2,541
Maciço	3	10,00	15,92	22,00	18,20	2897,44	1085,40	105,00	1050,00	7,00	0,15	302,40	1352,40	1,06	1430,68	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,35	14,62	7,00	18,20	2221,80	270,77	0,00	0,00	30,00	0,15	1090,34	1090,34	0,98	1068,72		
Filtro	5	8,35	11,28	-7,00	18,20	1714,22	-208,91	0,00	0,00	30,00	0,15	841,25	841,25	1,04	871,89		
Maciço	6	10,70	4,95	-23,00	18,20	963,96	-376,65	105,00	1123,50	7,00	0,15	100,61	1224,11	1,11	1357,66		
SOMA							3058,78								7773,62		
C4																	
Maciço	1	5,99	6,74	62,00	18,20	734,78	648,77	105,00	628,95	7,00	0,20	72,18	701,13	1,95	1366,45	CSa3	2,485
Maciço	2	10,00	13,73	41,00	18,20	2498,86	1639,40	105,00	1050,00	7,00	0,20	245,46	1295,46	1,27	1645,81	CS3	2,485
Maciço	3	10,00	15,92	22,00	18,20	2897,44	1085,40	105,00	1050,00	7,00	0,20	284,61	1334,61	1,06	1411,25	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,35	14,62	7,00	18,20	2221,80	270,77	0,00	0,00	30,00	0,20	1026,21	1026,21	0,98	1005,24		
Filtro	5	8,35	11,28	-7,00	18,20	1714,22	-208,91	0,00	0,00	30,00	0,20	791,77	791,77	1,04	821,14		
Maciço	6	10,70	4,95	-23,00	18,20	963,96	-376,65	105,00	1123,50	7,00	0,20	94,69	1218,19	1,11	1351,74		
SOMA							3058,78								7601,62		

(n)

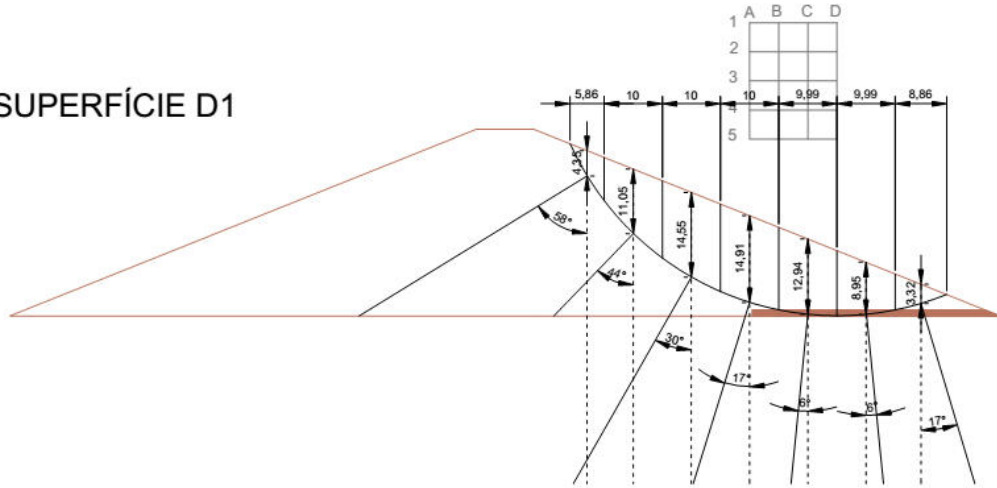
SUPERFÍCIE C5



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c^*b + P(1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1		
CS																	
Maciço	1	6,09	7,72	62,00	18,20	855,67	755,51	105,00	639,45	7,00	0,10	94,56	734,01	1,97	1443,65	CSa1	2,782
Maciço	2	6,09	13,28	43,00	18,20	1471,93	1003,85	105,00	639,45	7,00	0,10	162,66	802,11	1,31	1053,39	CS1	2,782
Maciço	3	10,00	15,49	25,00	18,20	2819,18	1191,44	105,00	1050,00	7,00	0,10	311,54	1361,54	1,08	1472,00	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	14,49	7,00	18,20	2038,54	248,44	0,00	0,00	30,00	0,10	1059,26	1059,26	0,98	1040,69		
Filtro	5	7,73	11,40	-7,00	18,20	1603,82	-195,46	0,00	0,00	30,00	0,10	833,37	833,37	1,03	861,58		
Maciço	6	10,34	5,16	-25,00	18,20	971,05	-410,38	105,00	1085,70	7,00	0,10	107,31	1193,01	1,13	1344,00		
SOMA							2593,40								7215,31		
CS																	
Maciço	1	6,09	7,72	62,00	18,20	855,67	755,51	105,00	639,45	7,00	0,15	89,30	728,75	1,96	1430,88	CSa2	2,722
Maciço	2	6,09	13,28	43,00	18,20	1471,93	1003,85	105,00	639,45	7,00	0,15	153,62	793,07	1,31	1040,61	CS2	2,722
Maciço	3	10,00	15,49	25,00	18,20	2819,18	1191,44	105,00	1050,00	7,00	0,15	294,23	1344,23	1,08	1452,63	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	14,49	7,00	18,20	2038,54	248,44	0,00	0,00	30,00	0,15	1000,41	1000,41	0,98	982,34		
Filtro	5	7,73	11,40	-7,00	18,20	1603,82	-195,46	0,00	0,00	30,00	0,15	787,07	787,07	1,03	814,19		
Maciço	6	10,34	5,16	-25,00	18,20	971,05	-410,38	105,00	1085,70	7,00	0,15	101,35	1187,05	1,13	1337,90		
SOMA							2593,40								7058,56		
CS																	
Maciço	1	6,09	7,72	62,00	18,20	855,67	755,51	105,00	639,45	7,00	0,20	84,05	723,50	1,96	1418,04	CSa3	2,661
Maciço	2	6,09	13,28	43,00	18,20	1471,93	1003,85	105,00	639,45	7,00	0,20	144,58	784,03	1,31	1027,81	CS3	2,661
Maciço	3	10,00	15,49	25,00	18,20	2819,18	1191,44	105,00	1050,00	7,00	0,20	276,92	1326,92	1,08	1433,26	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	14,49	7,00	18,20	2038,54	248,44	0,00	0,00	30,00	0,20	941,56	941,56	0,98	924,02		
Filtro	5	7,73	11,40	-7,00	18,20	1603,82	-195,46	0,00	0,00	30,00	0,20	740,77	740,77	1,04	766,76		
Maciço	6	10,34	5,16	-25,00	18,20	971,05	-410,38	105,00	1085,70	7,00	0,20	95,38	1181,08	1,13	1321,84		
SOMA							2593,40								6901,72		

(o)

SUPERFÍCIE D1



SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*tg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*tg(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1} \right)}$	CSa1		
D1																	
Maciço	1	5,86	4,35	58,00	18,20	463,94	393,44	105,00	615,30	7,00	0,10	51,27	666,57	1,74	1159,43	CSa1	2,314
Maciço	2	10,00	11,05	44,00	18,20	2011,10	1397,03	105,00	1050,00	7,00	0,10	222,24	1272,24	1,32	1682,43	CS1	2,314
Maciço	3	10,00	14,55	30,00	18,20	2648,10	1324,05	105,00	1050,00	7,00	0,10	292,63	1342,63	1,12	1504,26	CS-CSa	0,000
Maciço	4	10,00	14,91	17,00	18,20	2713,62	793,39	105,00	1050,00	7,00	0,10	299,87	1349,87	1,03	1389,02		
Filtro	5	9,99	12,94	6,00	18,20	2352,72	245,93	0,00	0,00	30,00	0,10	1222,51	1222,51	0,98	1197,84		
Filtro	6	9,99	8,95	-6,00	18,20	1627,27	-170,10	0,00	0,00	30,00	0,10	845,55	845,55	1,03	873,10		
Maciço	7	8,86	3,32	-17,00	18,20	535,36	-156,52	105,00	930,30	7,00	0,10	59,16	989,46	1,06	1051,73		
SOMA							3827,21								8857,81		

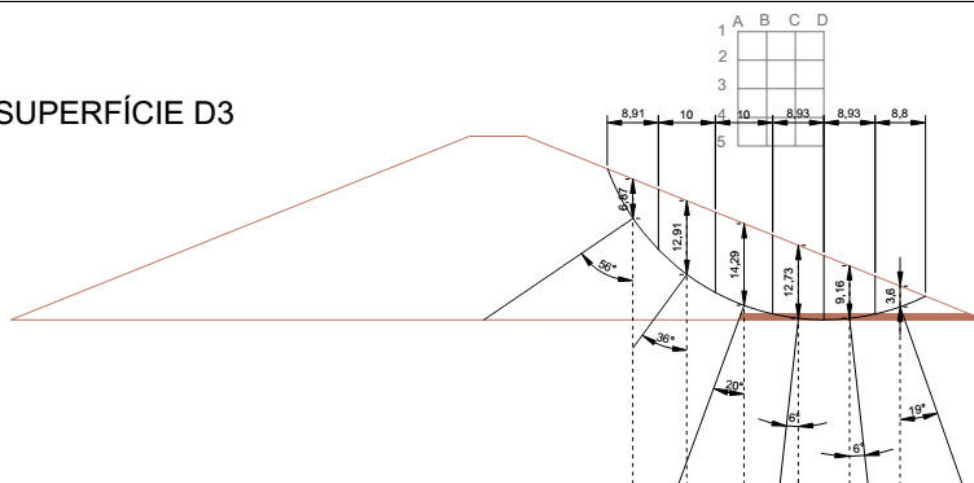
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*tg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*tg(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2} \right)}$	CSa2		
D1																	
Maciço	1	5,86	4,35	58,00	18,20	463,94	393,44	105,00	615,30	7,00	0,15	48,42	663,72	1,74	1152,61	CSa2	2,267
Maciço	2	10,00	11,05	44,00	18,20	2011,10	1397,03	105,00	1050,00	7,00	0,15	209,89	1259,89	1,32	1664,42	CS2	2,267
Maciço	3	10,00	14,55	30,00	18,20	2648,10	1324,05	105,00	1050,00	7,00	0,15	276,37	1326,37	1,12	1485,13	CS-CSa	0,000
Maciço	4	10,00	14,91	17,00	18,20	2713,62	793,39	105,00	1050,00	7,00	0,15	283,21	1333,21	1,03	1371,42		
Filtro	5	9,99	12,94	6,00	18,20	2352,72	245,93	0,00	0,00	30,00	0,15	1154,59	1154,59	0,98	1130,69		
Filtro	6	9,99	8,95	-6,00	18,20	1627,27	-170,10	0,00	0,00	30,00	0,15	798,58	798,58	1,03	825,06		
Maciço	7	8,86	3,32	-17,00	18,20	535,36	-156,52	105,00	930,30	7,00	0,15	55,87	986,17	1,06	1048,59		
SOMA							3827,21								8677,93		

SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P^* \sin(\alpha)$	c	c*b	ϕ	B	$P^*(1-B)^*tg(\phi)$	$c^*b+P(1-B)^*tg(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3} \right)}$	CSa3		
D1																	
Maciço	1	5,86	4,35	58,00	18,20	463,94	393,44	105,00	615,30	7,00	0,20	45,57	660,87	1,73	1145,72	CSa3	2,220
Maciço	2	10,00	11,05	44,00	18,20	2011,10	1397,03	105,00	1050,00	7,00	0,20	197,55	1247,55	1,32	1646,37	CS3	2,220
Maciço	3	10,00	14,55	30,00	18,20	2648,10	1324,05	105,00	1050,00	7,00	0,20	260,12	1310,12	1,12	1465,98	CS-CSa	0,000
Maciço	4	10,00	14,91	17,00	18,20	2713,62	793,39	105,00	1050,00	7,00	0,20	266,55	1316,55	1,03	1353,82		
Filtro	5	9,99	12,94	6,00	18,20	2352,72	245,93	0,00	0,00	30,00	0,20	1086,68	1086,68	0,98	1061,59		
Filtro	6	9,99	8,95	-6,00	18,20	1627,27	-170,10	0,00	0,00	30,00	0,20	751,60	751,60	1,03	776,98		
Maciço	7	8,86	3,32	-17,00	18,20	535,36	-156,52	105,00	930,30	7,00	0,20	52,59	982,89	1,06	1045,47		
SOMA							3827,21								8497,93		

SUPERFÍCIE D2																
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1	
D2																
Maciço	1	6,21	5,46	58,00	18,20	617,10	523,33	105,00	652,05	7,00	0,10	68,19	720,24	1,74	1254,79	CSa1
Maciço	2	6,21	10,43	46,00	18,20	1178,82	847,97	105,00	652,05	7,00	0,10	130,27	782,32	1,37	1068,67	CS1
Maciço	3	10,00	13,81	33,00	18,20	2513,42	1368,91	105,00	1050,00	7,00	0,10	277,75	1327,75	1,15	1531,47	CS-CSa
Maciço	4	10,00	14,61	19,00	18,20	2659,02	865,69	105,00	1050,00	7,00	0,10	293,84	1343,84	1,04	1396,28	
Filtro	5	9,47	12,84	6,00	18,20	2213,03	231,32	0,00	0,00	30,00	0,10	1149,92	1149,92	0,98	1127,30	
Filtro	6	9,47	9,05	-6,00	18,20	1559,80	-163,04	0,00	0,00	30,00	0,10	810,50	810,50	1,03	836,45	
Maciço	7	8,85	3,45	-18,00	18,20	555,69	-171,72	105,00	929,25	7,00	0,10	61,41	990,66	1,07	1059,53	
SOMA							3502,46								8274,50	
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2	
D2																
Maciço	1	6,21	5,46	58,00	18,20	617,10	523,33	105,00	652,05	7,00	0,15	64,40	716,45	1,74	1246,20	CSa2
Maciço	2	6,21	10,43	46,00	18,20	1178,82	847,97	105,00	652,05	7,00	0,15	123,03	775,08	1,36	1057,67	CS2
Maciço	3	10,00	13,81	33,00	18,20	2513,42	1368,91	105,00	1050,00	7,00	0,15	262,32	1312,32	1,15	1512,64	CS-CSa
Maciço	4	10,00	14,61	19,00	18,20	2659,02	865,69	105,00	1050,00	7,00	0,15	277,51	1327,51	1,04	1378,82	
Filtro	5	9,47	12,84	6,00	18,20	2213,03	231,32	0,00	0,00	30,00	0,15	1086,04	1086,04	0,98	1064,12	
Filtro	6	9,47	9,05	-6,00	18,20	1559,80	-163,04	0,00	0,00	30,00	0,15	765,47	765,47	1,03	790,41	
Maciço	7	8,85	3,45	-18,00	18,20	555,69	-171,72	105,00	929,25	7,00	0,15	58,00	987,25	1,07	1056,26	
SOMA							3502,46								8106,12	
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3}}$	CSa3	
D2																
Maciço	1	6,21	5,46	58,00	18,20	617,10	523,33	105,00	652,05	7,00	0,20	60,62	712,67	1,74	1237,55	CSa3
Maciço	2	6,21	10,43	46,00	18,20	1178,82	847,97	105,00	652,05	7,00	0,20	115,79	767,84	1,36	1046,63	CS3
Maciço	3	10,00	13,81	33,00	18,20	2513,42	1368,91	105,00	1050,00	7,00	0,20	246,89	1296,89	1,15	1493,80	CS-CSa
Maciço	4	10,00	14,61	19,00	18,20	2659,02	865,69	105,00	1050,00	7,00	0,20	261,19	1311,19	1,04	1361,34	
Filtro	5	9,47	12,84	6,00	18,20	2213,03	231,32	0,00	0,00	30,00	0,20	1022,15	1022,15	0,98	1000,98	
Filtro	6	9,47	9,05	-6,00	18,20	1559,80	-163,04	0,00	0,00	30,00	0,20	720,44	720,44	1,03	744,34	
Maciço	7	8,85	3,45	-18,00	18,20	555,69	-171,72	105,00	929,25	7,00	0,20	54,58	983,83	1,07	1053,00	
SOMA							3502,46								7937,64	

(q)

SUPERFÍCIE D3

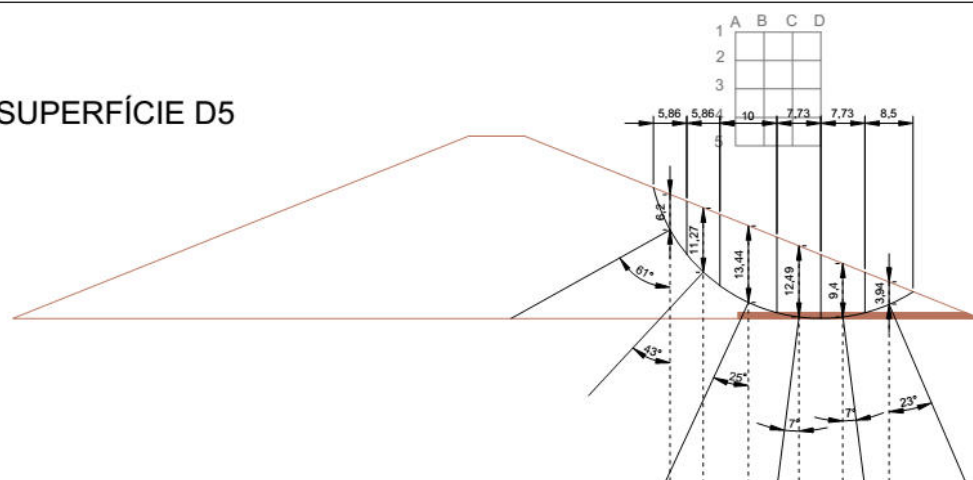


SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1		
D3																	
Maciço	1	8,91	6,87	56,00	18,20	1114,05	923,59	105,00	935,55	7,00	0,10	123,11	1058,66	1,65	1751,09	CSa1	2,243
Maciço	2	10,00	12,91	36,00	18,20	2349,62	1381,07	105,00	1050,00	7,00	0,10	259,65	1309,65	1,19	1556,90	CS1	2,243
Maciço	3	10,00	14,29	20,00	18,20	2600,78	889,52	105,00	1050,00	7,00	0,10	287,40	1337,40	1,04	1395,43	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,93	12,73	6,00	18,20	2068,96	216,26	0,00	0,00	30,00	0,10	1075,06	1075,06	0,98	1052,51		
Filtro	5	8,93	9,16	6,00	18,20	1488,74	155,62	0,00	0,00	30,00	0,10	773,57	773,57	0,98	757,34		
Maciço	6	8,80	3,60	-19,00	18,20	576,58	-187,71	105,00	924,00	7,00	0,10	63,72	987,72	1,08	1064,70		
SOMA							3378,35								7577,96		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2		
D3																	
Maciço	1	8,91	6,87	56,00	18,20	1114,05	923,59	105,00	935,55	7,00	0,15	116,27	1051,82	1,65	1737,06	CSa2	2,197
Maciço	2	10,00	12,91	36,00	18,20	2349,62	1381,07	105,00	1050,00	7,00	0,15	245,22	1295,22	1,19	1538,52	CS2	2,197
Maciço	3	10,00	14,29	20,00	18,20	2600,78	889,52	105,00	1050,00	7,00	0,15	271,44	1321,44	1,04	1378,21	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,93	12,73	6,00	18,20	2068,96	216,26	0,00	0,00	30,00	0,15	1015,34	1015,34	0,98	993,49		
Filtro	5	8,93	9,16	6,00	18,20	1488,74	155,62	0,00	0,00	30,00	0,15	730,59	730,59	0,98	714,88		
Maciço	6	8,80	3,60	-19,00	18,20	576,58	-187,71	105,00	924,00	7,00	0,15	60,18	984,18	1,08	1061,30		
SOMA							3378,35								7423,47		
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3}}$	CSa3		
D3																	
Maciço	1	8,91	6,87	56,00	18,20	1114,05	923,59	105,00	935,55	7,00	0,20	109,43	1044,98	1,65	1722,96	CSa3	2,152
Maciço	2	10,00	12,91	36,00	18,20	2349,62	1381,07	105,00	1050,00	7,00	0,20	230,80	1280,80	1,19	1520,13	CS3	2,152
Maciço	3	10,00	14,29	20,00	18,20	2600,78	889,52	105,00	1050,00	7,00	0,20	255,47	1305,47	1,04	1360,98	CS-CSa	0,000
Filtro	4	8,93	12,73	6,00	18,20	2068,96	216,26	0,00	0,00	30,00	0,20	955,61	955,61	0,98	944,52		
Filtro	5	8,93	9,16	6,00	18,20	1488,74	155,62	0,00	0,00	30,00	0,20	687,62	687,62	0,98	672,44		
Maciço	6	8,80	3,60	-19,00	18,20	576,58	-187,71	105,00	924,00	7,00	0,20	56,64	980,64	1,08	1057,93		
SOMA							3378,35								7268,96		

(r)

SUPERFÍCIE D4																
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1}}$	CSa1	
D4																
Maciço	1	5,35	5,20	61,00	18,20	506,32	442,84	105,00	561,75	7,00	0,10	55,95	617,70	1,90	1176,17	CSa1 2,660
Maciço	2	10,00	11,73	41,00	18,20	2134,86	1400,59	105,00	1050,00	7,00	0,10	235,92	1285,92	1,27	1638,12	CS1 2,660
Maciço	3	10,00	13,92	22,00	18,20	2533,44	949,04	105,00	1050,00	7,00	0,10	279,96	1329,96	1,06	1408,15	CS-CSa 0,000
Filtro	4	8,35	12,62	7,00	18,20	1917,86	233,73	0,00	0,00	30,00	0,10	996,55	996,55	0,98	977,97	
Filtro	5	8,35	9,28	-7,00	18,20	1410,28	-171,87	0,00	0,00	30,00	0,10	732,80	732,80	1,04	758,52	
Maciço	6	8,69	3,76	-21,00	18,20	594,67	-213,11	105,00	912,45	7,00	0,10	65,72	978,17	1,09	1066,66	
SOMA							2641,22								7025,59	
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa2}}$	CSa2	
D4																
Maciço	1	5,35	5,20	61,00	18,20	506,32	442,84	105,00	561,75	7,00	0,15	52,84	614,59	1,90	1168,38	CSa2 2,606
Maciço	2	10,00	11,73	41,00	18,20	2134,86	1400,59	105,00	1050,00	7,00	0,15	222,81	1272,81	1,27	1620,13	CS2 2,606
Maciço	3	10,00	13,92	22,00	18,20	2533,44	949,04	105,00	1050,00	7,00	0,15	264,41	1314,41	1,06	1391,15	CS-CSa 0,000
Filtro	4	8,35	12,62	7,00	18,20	1917,86	233,73	0,00	0,00	30,00	0,15	941,19	941,19	0,98	923,14	
Filtro	5	8,35	9,28	-7,00	18,20	1410,28	-171,87	0,00	0,00	30,00	0,15	692,09	692,09	1,04	716,79	
Maciço	6	8,69	3,76	-21,00	18,20	594,67	-213,11	105,00	912,45	7,00	0,15	62,06	974,51	1,09	1063,07	
SOMA							2641,22								6882,66	
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot (1-B) \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa3}}$	CSa3	
D4																
Maciço	1	5,35	5,20	61,00	18,20	506,32	442,84	105,00	561,75	7,00	0,20	49,74	611,49	1,90	1160,54	CSa3 2,552
Maciço	2	10,00	11,73	41,00	18,20	2134,86	1400,59	105,00	1050,00	7,00	0,20	209,70	1259,70	1,27	1602,11	CS3 2,552
Maciço	3	10,00	13,92	22,00	18,20	2533,44	949,04	105,00	1050,00	7,00	0,20	248,85	1298,85	1,06	1374,14	CS-CSa 0,000
Filtro	4	8,35	12,62	7,00	18,20	1917,86	233,73	0,00	0,00	30,00	0,20	885,82	885,82	0,98	868,35	
Filtro	5	8,35	9,28	-7,00	18,20	1410,28	-171,87	0,00	0,00	30,00	0,20	651,38	651,38	1,04	675,03	
Maciço	6	8,69	3,76	-21,00	18,20	594,67	-213,11	105,00	912,45	7,00	0,20	58,41	970,86	1,09	1059,51	
SOMA							2641,22								6739,68	

SUPERFÍCIE D5

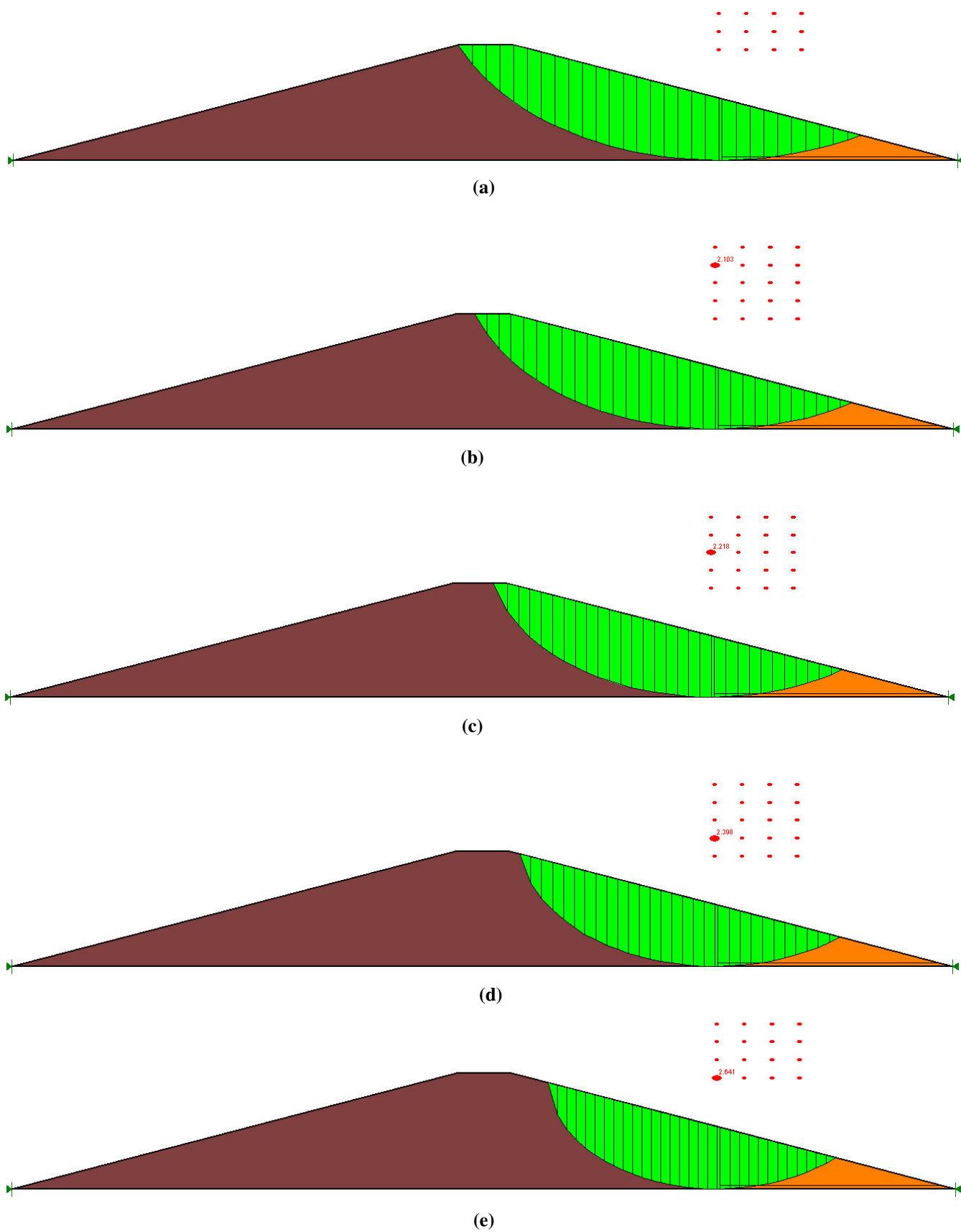


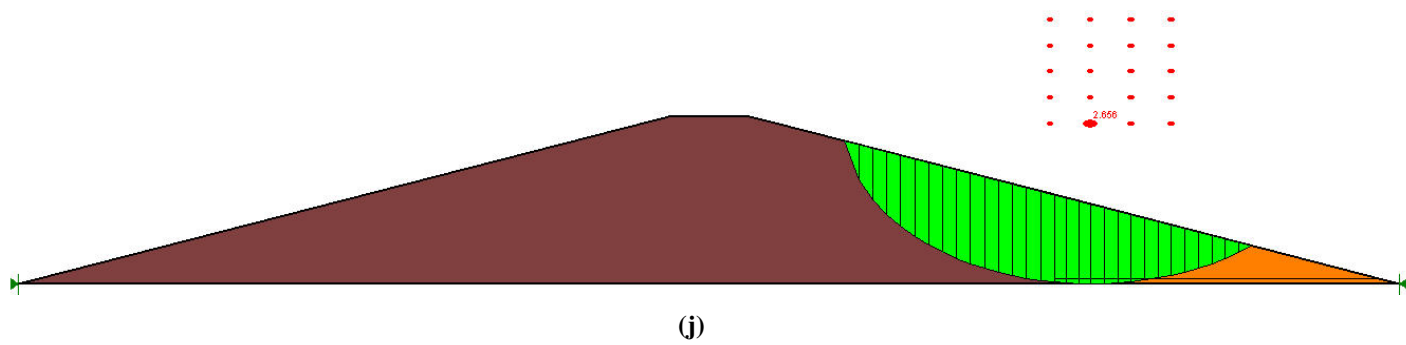
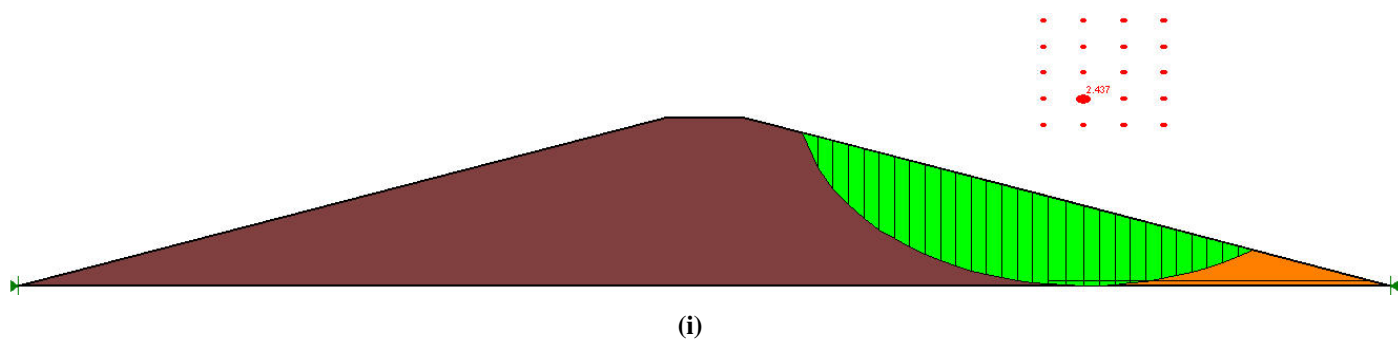
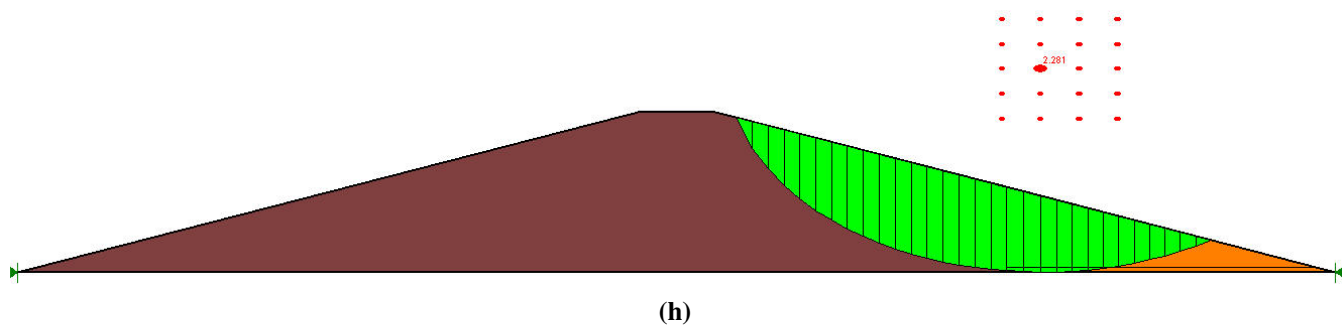
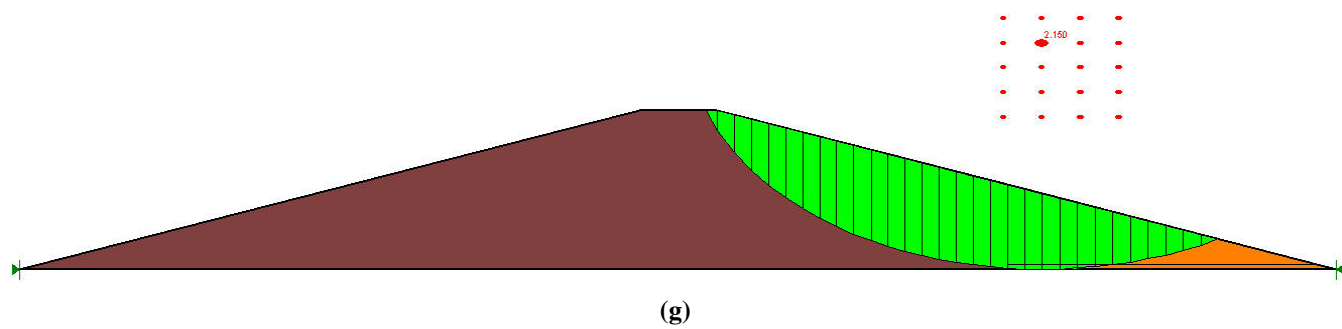
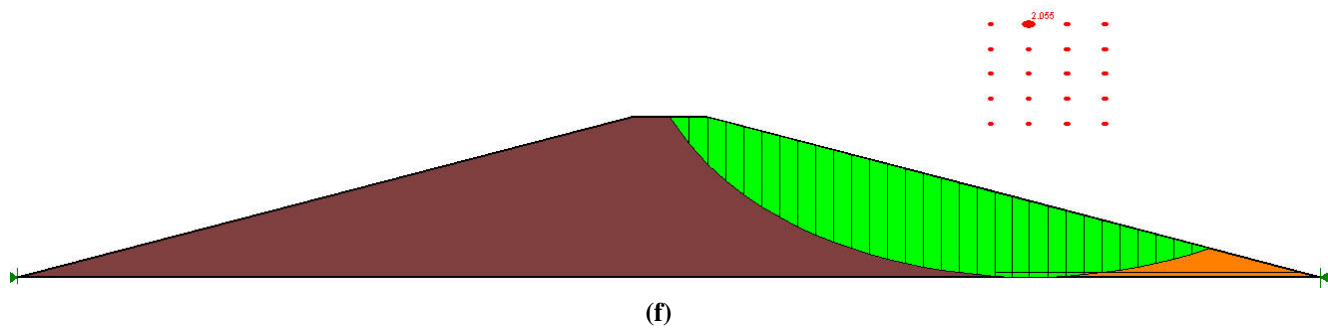
SR	Fatia	Base b (m)	Altura h (m)	α (°)	γ_s (kN/m³)	P (kN)	$P \cdot \sin(\alpha)$	c	$c \cdot b$	ϕ	B	$P \cdot [1-B] \cdot \tan(\phi)$	$c \cdot b + P \cdot [1-B] \cdot \tan(\phi)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \left(\frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa1} \right)}$	CSa1		
D5																	
Maciço	1	5,86	6,20	61,00	18,20	661,24	578,34	105,00	615,30	7,00	0,10	73,07	688,37	1,91	1317,42	CSa1	2,848
Maciço	2	5,86	11,27	43,00	18,20	1201,97	819,74	105,00	615,30	7,00	0,10	132,82	748,12	1,31	983,40	CS1	2,848
Maciço	3	10,00	13,44	25,00	18,20	2446,08	1033,76	105,00	1050,00	7,00	0,10	270,31	1320,31	1,08	1428,09	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	12,49	7,00	18,20	1757,17	214,14	0,00	0,00	30,00	0,10	913,05	913,05	0,98	897,57		
Filtro	5	7,73	9,40	-7,00	18,20	1322,45	-161,17	0,00	0,00	30,00	0,10	687,16	687,16	1,03	710,00		
Maciço	6	8,50	3,94	-23,00	18,20	609,52	-238,16	105,00	892,50	7,00	0,10	67,36	959,86	1,11	1062,19		
SOMA							2246,66								6398,65		
D5																	
Maciço	1	5,86	6,20	61,00	18,20	661,24	578,34	105,00	615,30	7,00	0,15	69,01	684,31	1,91	1307,69	CSa2	2,790
Maciço	2	5,86	11,27	43,00	18,20	1201,97	819,74	105,00	615,30	7,00	0,15	125,45	740,75	1,31	972,92	CS2	2,790
Maciço	3	10,00	13,44	25,00	18,20	2446,08	1033,76	105,00	1050,00	7,00	0,15	255,29	1305,29	1,08	1411,27	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	12,49	7,00	18,20	1757,17	214,14	0,00	0,00	30,00	0,15	862,33	862,33	0,98	847,27		
Filtro	5	7,73	9,40	-7,00	18,20	1322,45	-161,17	0,00	0,00	30,00	0,15	648,99	648,99	1,03	670,91		
Maciço	6	8,50	3,94	-23,00	18,20	609,52	-238,16	105,00	892,50	7,00	0,15	63,61	956,11	1,11	1058,46		
SOMA							2246,66								6268,51		
D5																	
Maciço	1	5,86	6,20	61,00	18,20	661,24	578,34	105,00	615,30	7,00	0,20	64,95	680,25	1,91	1297,90	CSa3	2,732
Maciço	2	5,86	11,27	43,00	18,20	1201,97	819,74	105,00	615,30	7,00	0,20	118,07	733,37	1,31	962,42	CS3	2,732
Maciço	3	10,00	13,44	25,00	18,20	2446,08	1033,76	105,00	1050,00	7,00	0,20	240,27	1290,27	1,08	1394,43	CS-CSa	0,000
Filtro	4	7,73	12,49	7,00	18,20	1757,17	214,14	0,00	0,00	30,00	0,20	811,60	811,60	0,98	797,02		
Filtro	5	7,73	9,40	-7,00	18,20	1322,45	-161,17	0,00	0,00	30,00	0,20	610,81	610,81	1,03	631,79		
Maciço	6	8,50	3,94	-23,00	18,20	609,52	-238,16	105,00	892,50	7,00	0,20	59,87	952,37	1,11	1054,74		
SOMA							2246,66								6138,30		

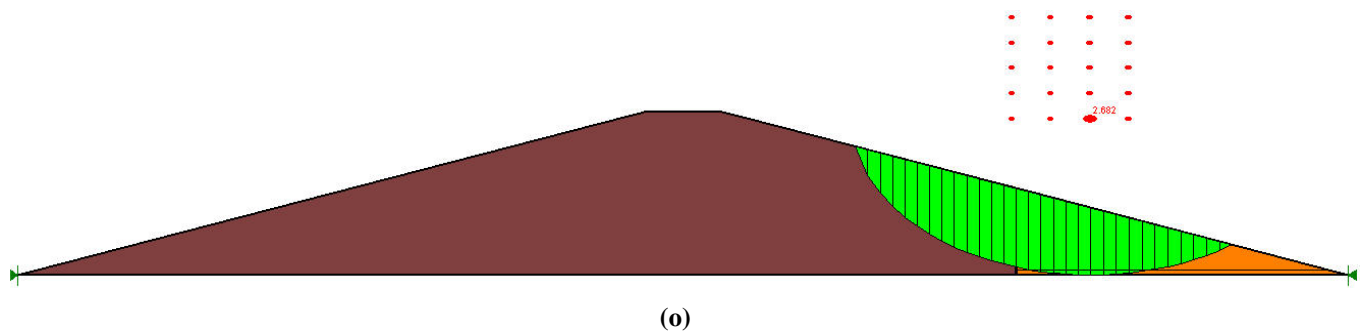
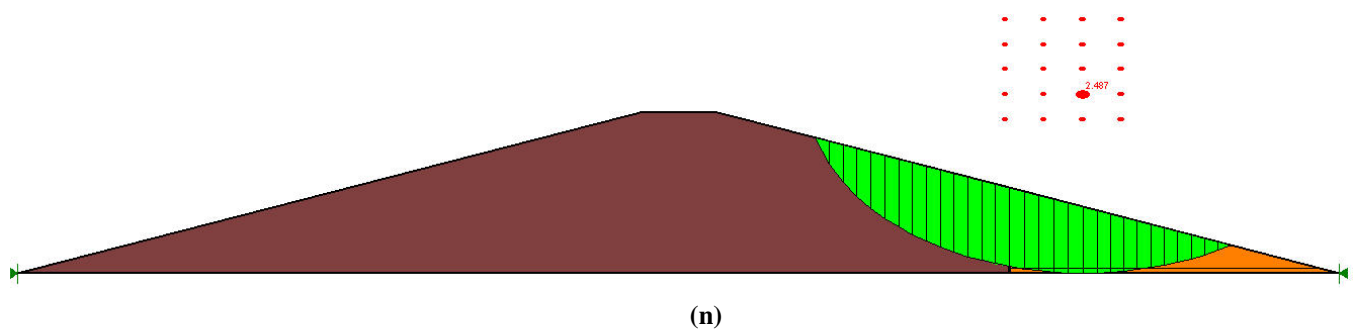
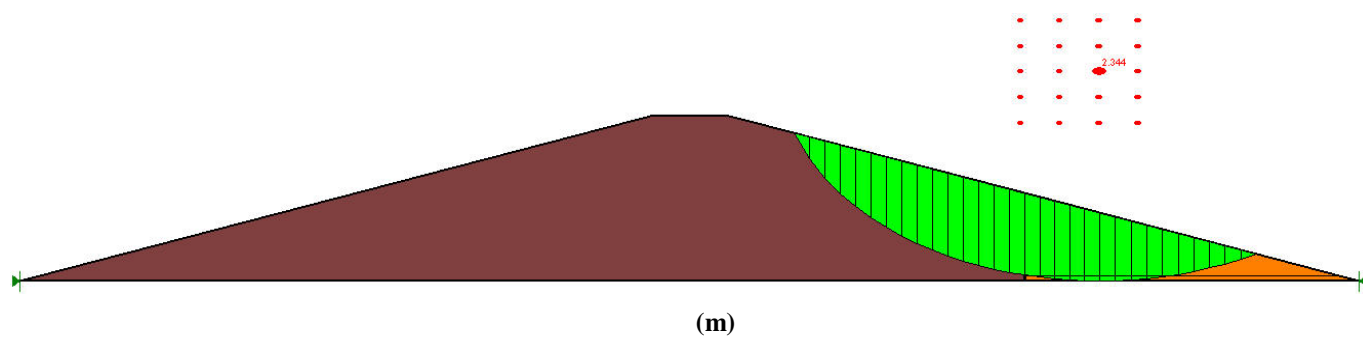
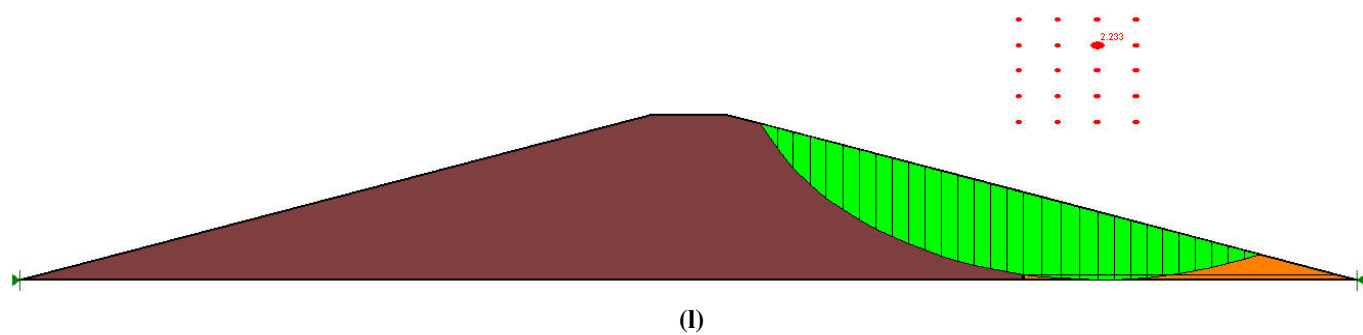
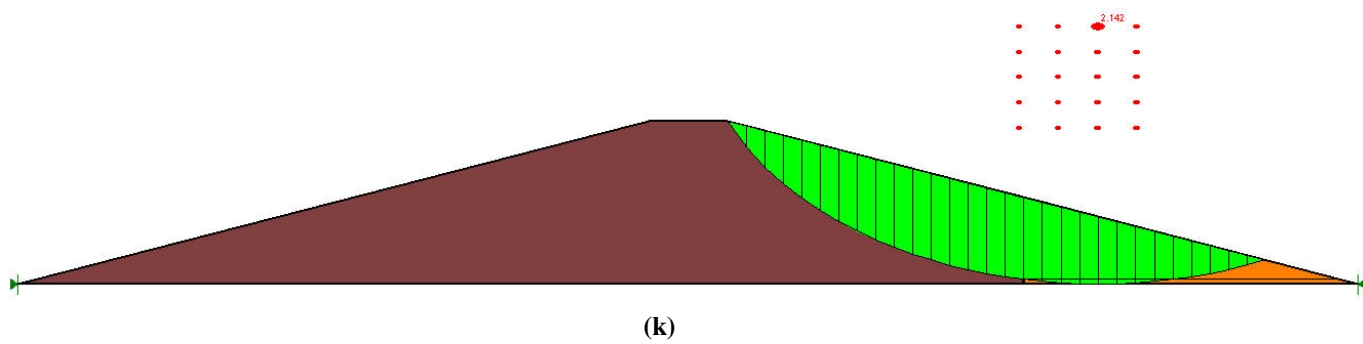
(t)

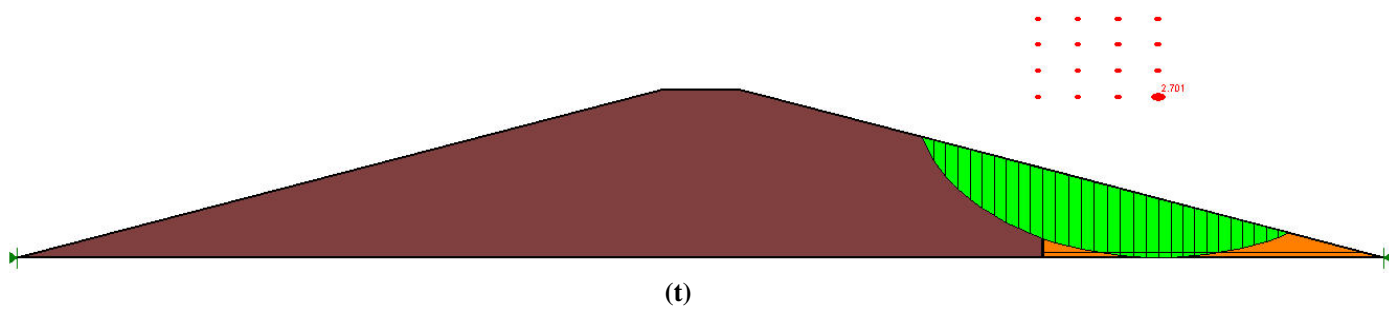
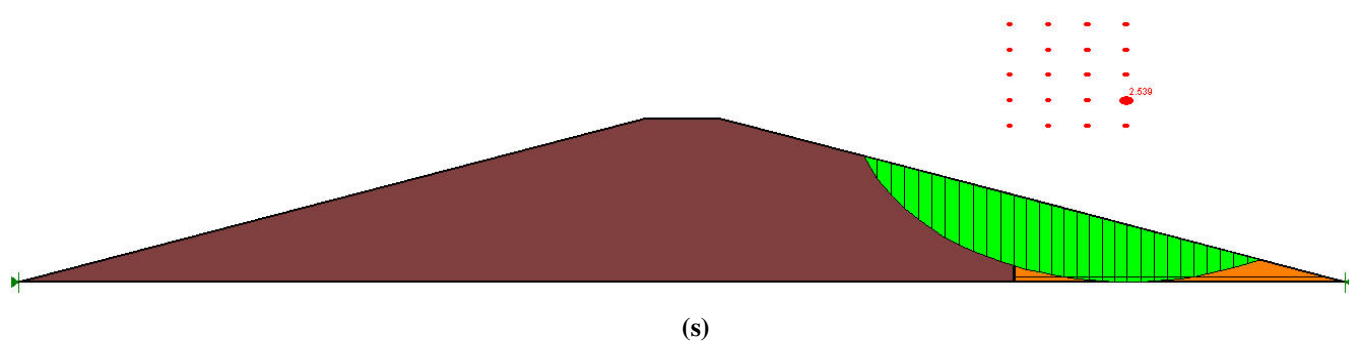
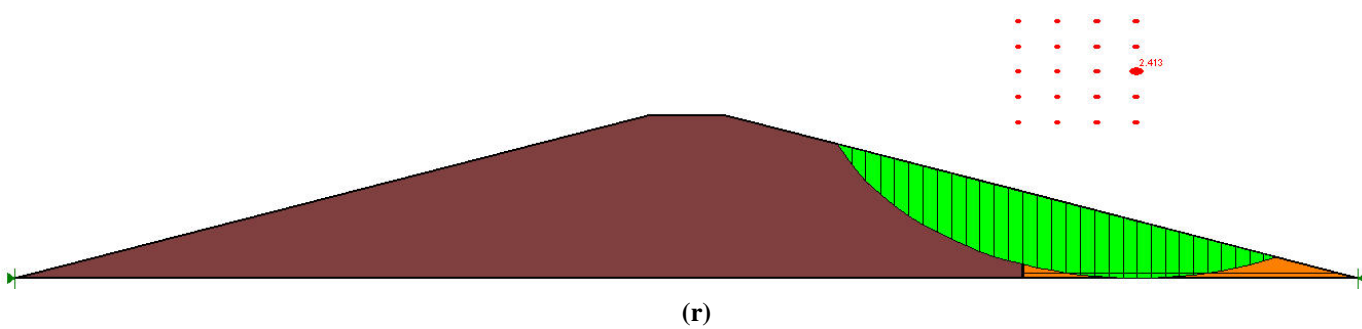
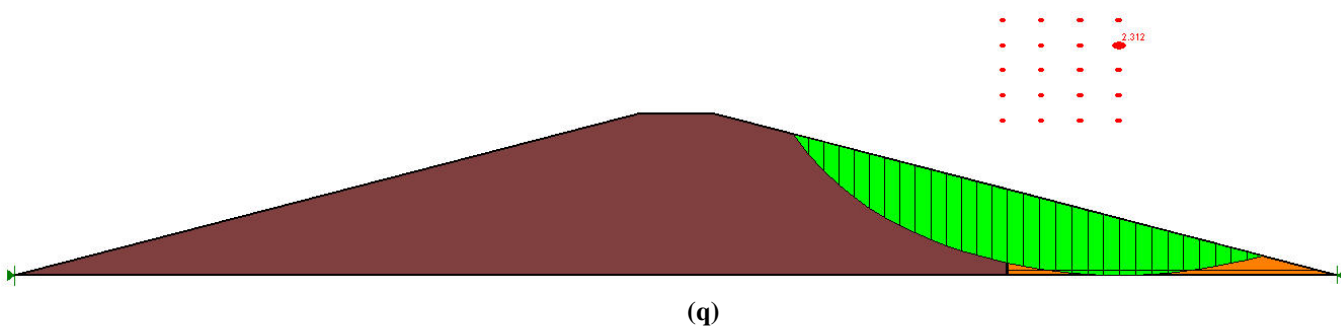
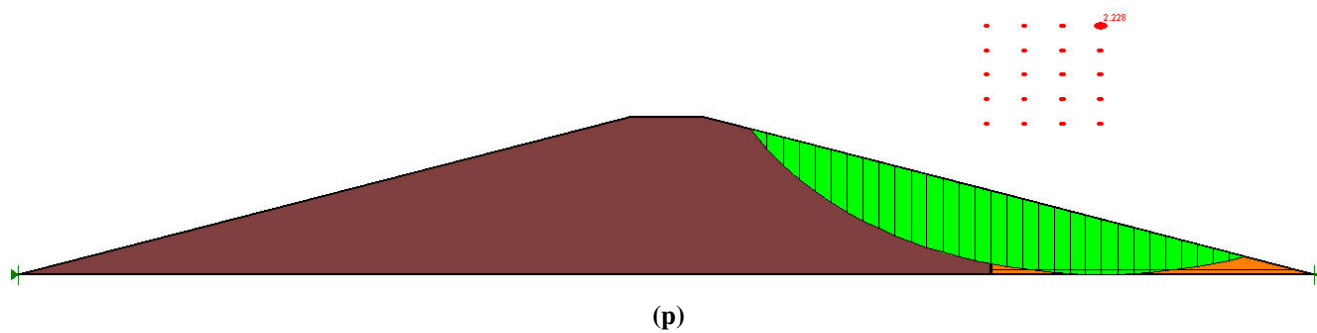
Fonte: O autor (2015).

Figura B2 – Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase final de construção obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.









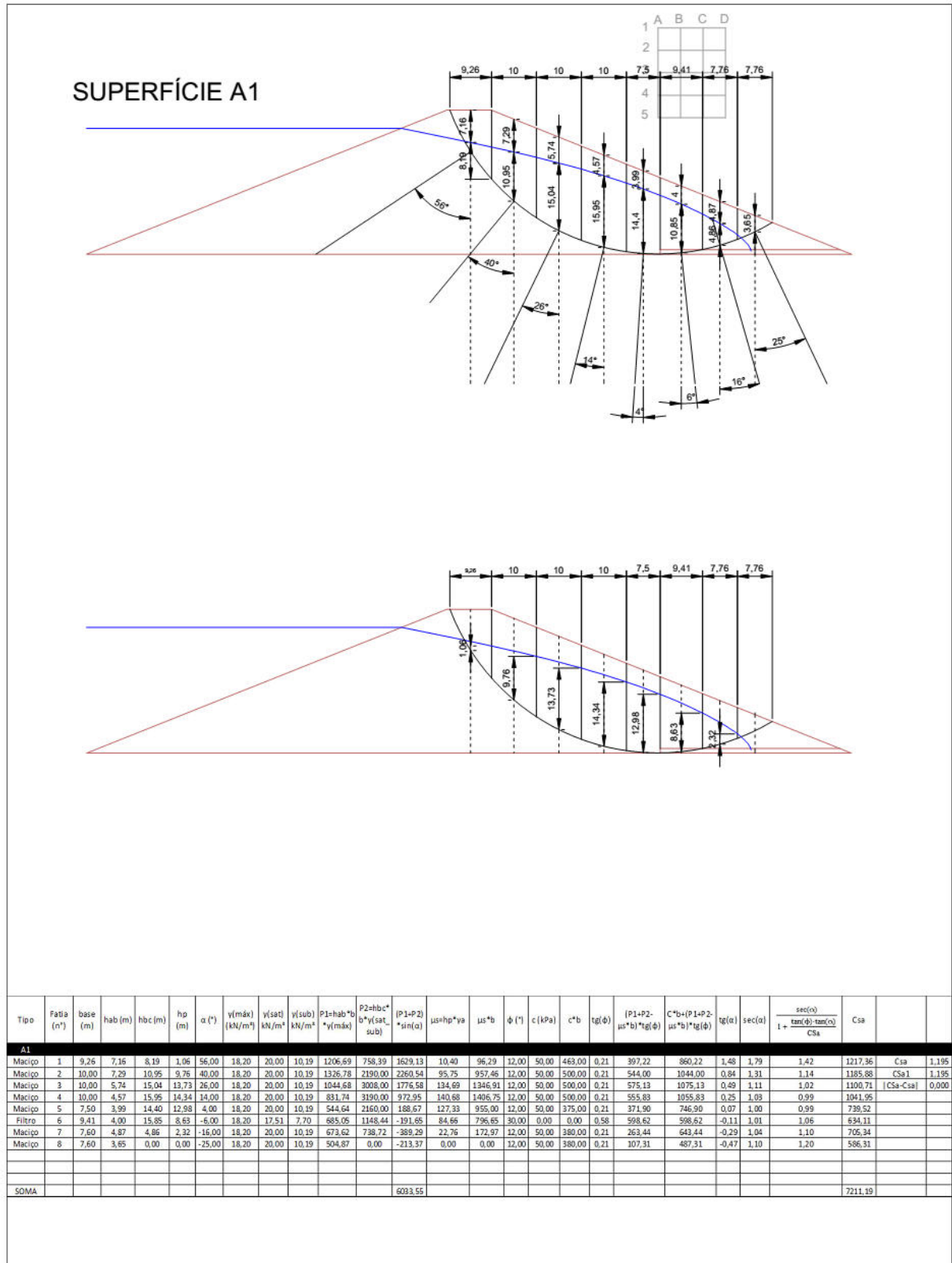
Fonte: O autor (2015).

ANEXO C

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE DE JUSANTE FASE RESERVATÓRIO CHEIO

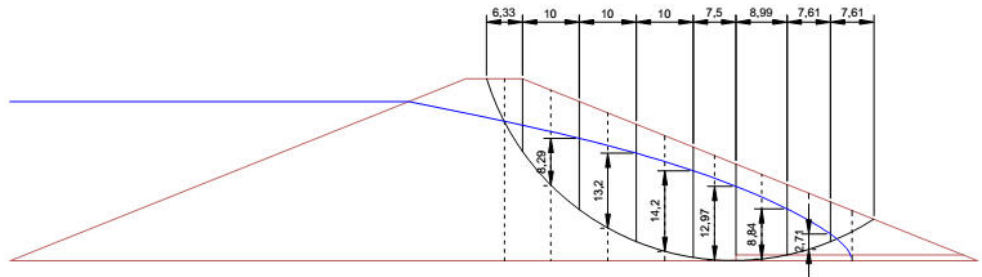
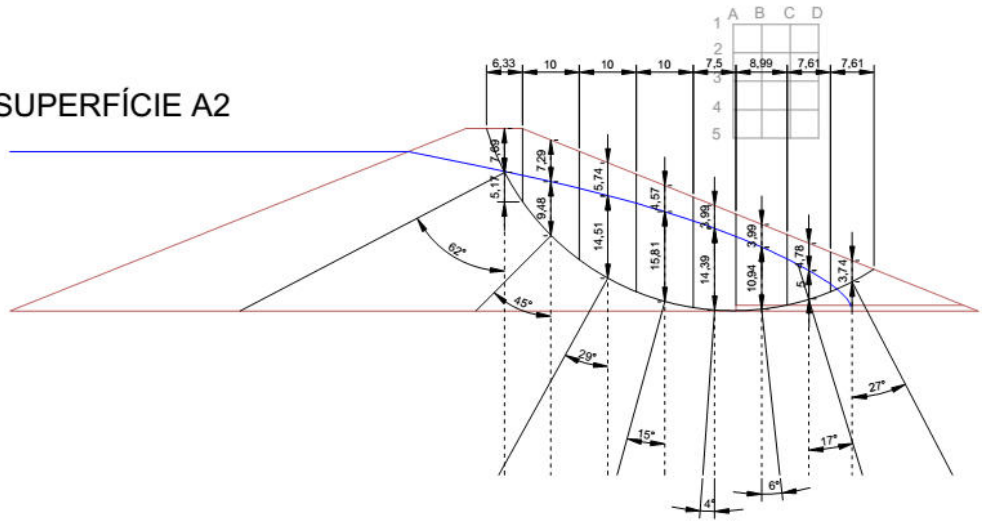
Figura C1 – Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase reservatório cheio obtidas pelo autor.

a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.



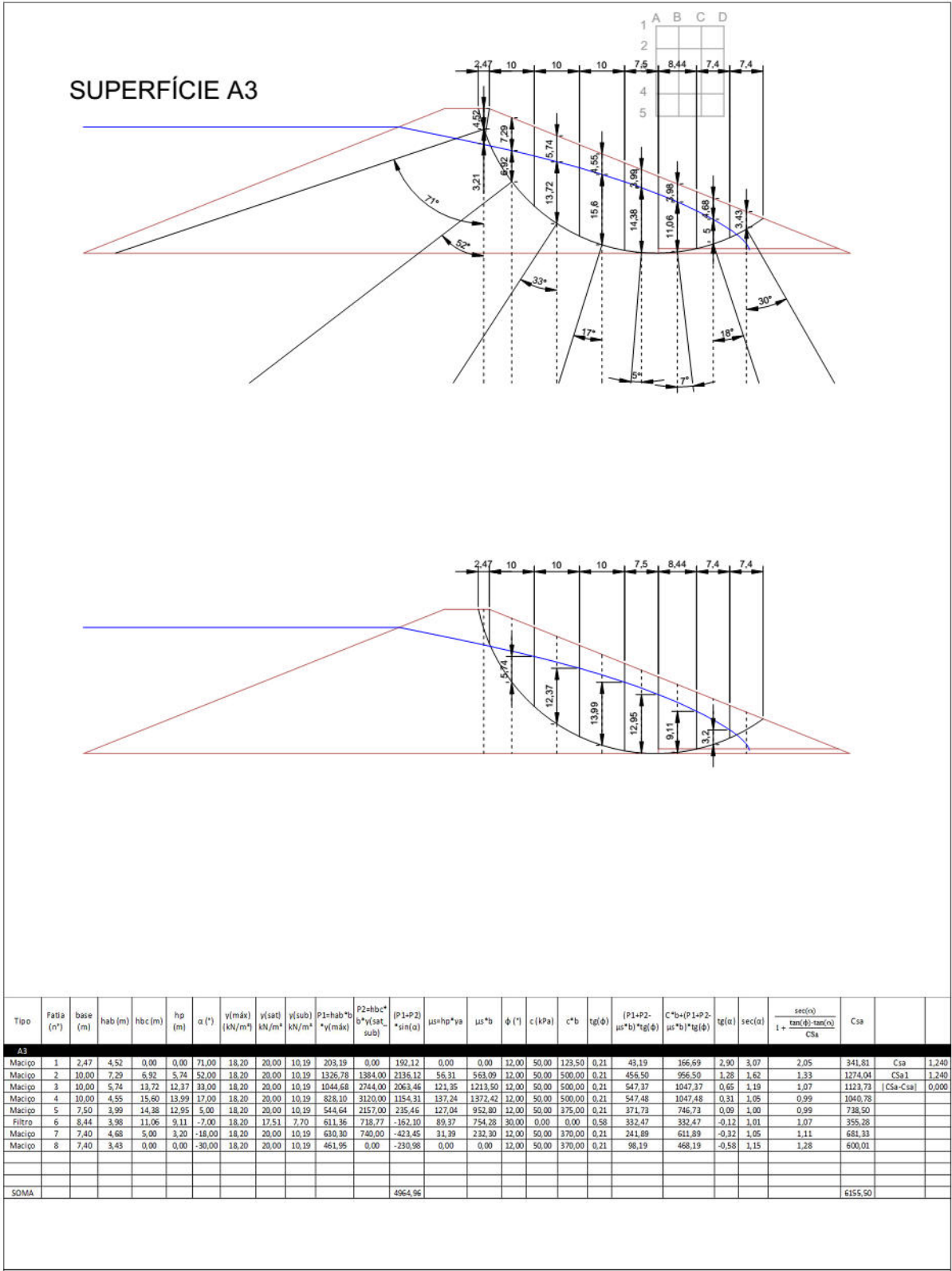
(a)

SUPERFÍCIE A2

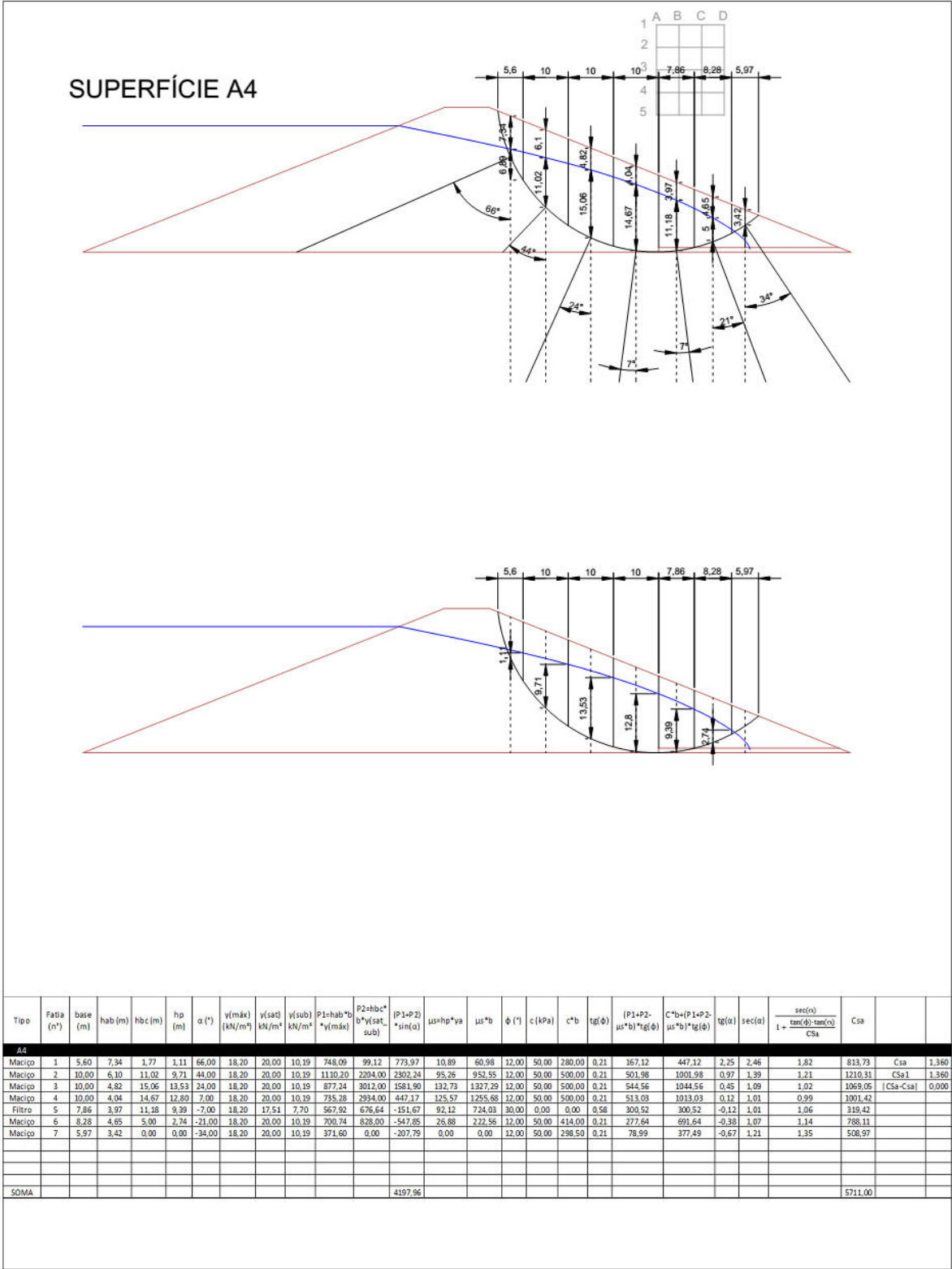


Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ (máx) (kN/m³)	γ (sat) kN/m³	γ (sub) kN/m³	$P1=hab \cdot \gamma$ *(máx)	$P2=hbc \cdot \gamma$ *(sat,sub)	$(P1+P2) \cdot \sin(\alpha)$	$\mu s=hp \cdot \gamma s$	$\mu s \cdot b$	ϕ (°)	c (kPa)	$c \cdot b$	$tg(\phi)$	$(P1+P2) \cdot \mu s \cdot b \cdot tg(\phi)$	$C \cdot b=(P1+P2) \cdot \mu s \cdot b \cdot tg(\phi)$	$tg(\alpha)$	$\sec(\alpha)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa		
A2																										
Maciço	1	6,33	7,69	5,17	0,00	62,00	18,20	20,00	10,19	885,93	327,26	1071,19	0,00	0,00	12,00	50,00	316,50	0,21	257,87	574,37	1,88	2,13	1,59	914,06	Csa	1,181
Maciço	2	10,00	7,29	9,48	8,29	45,00	18,20	20,00	10,19	1326,78	1896,00	2278,85	81,32	813,25	12,00	50,00	500,00	0,21	512,16	1012,16	1,00	1,41	1,20	1213,09	Csa1	1,181
Maciço	3	10,00	5,74	14,51	13,20	29,00	18,20	20,00	10,19	1044,68	2902,00	1913,39	129,49	1294,92	12,00	50,00	500,00	0,21	563,65	1063,65	0,55	1,14	1,04	1105,81	Csa-Csa1	0,000
Maciço	4	10,00	4,57	15,58	14,20	15,00	18,20	20,00	10,19	831,74	3116,00	1021,75	139,30	1393,02	12,00	50,00	500,00	0,21	543,02	1043,02	0,27	1,04	0,99	1030,14		
Maciço	5	7,50	3,99	14,39	12,97	4,00	18,20	20,00	10,19	544,64	2158,50	188,56	127,24	954,27	12,00	50,00	375,00	0,21	371,73	746,73	0,07	1,00	0,99	739,25		
Filtro	6	8,99	3,99	10,94	8,84	-6,00	18,20	17,51	7,70	652,84	757,30	-147,40	86,72	779,62	30,00	0,00	0,00	0,58	364,03	364,03	-0,11	1,01	1,06	385,86		
Maciço	7	7,61	4,78	5,00	2,71	-17,00	18,20	20,00	10,19	662,04	761,00	-416,06	26,59	202,31	12,00	50,00	380,50	0,21	259,47	639,97	-0,31	1,05	1,11	708,18		
Maciço	8	7,61	3,74	0,00	0,00	-27,00	18,20	20,00	10,19	518,00	0,00	-235,17	0,00	0,00	12,00	50,00	380,50	0,21	110,10	490,60	-0,51	1,12	1,24	606,21		
SOMA																										
												5675,12												6702,60		

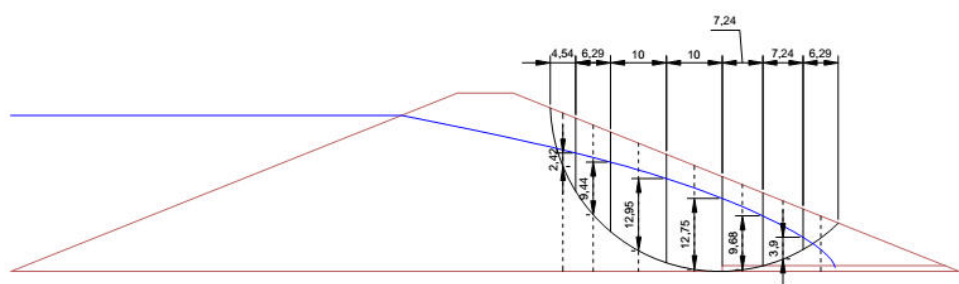
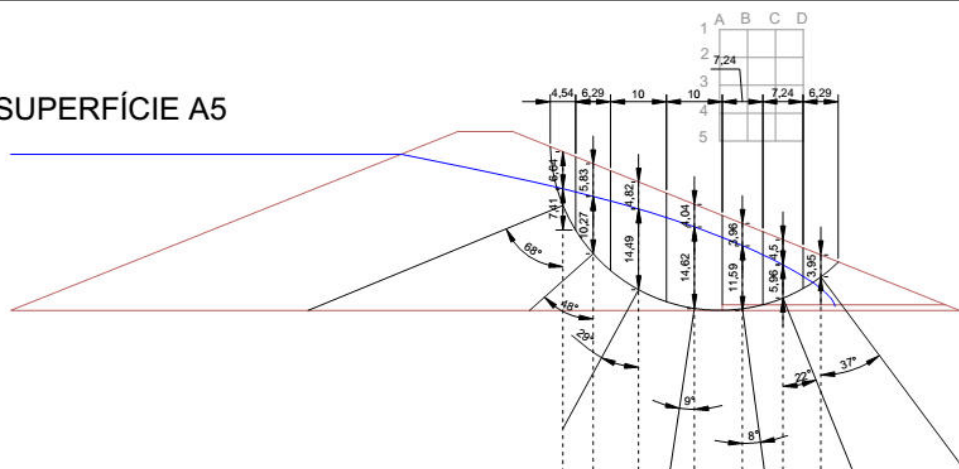
(b)



(c)



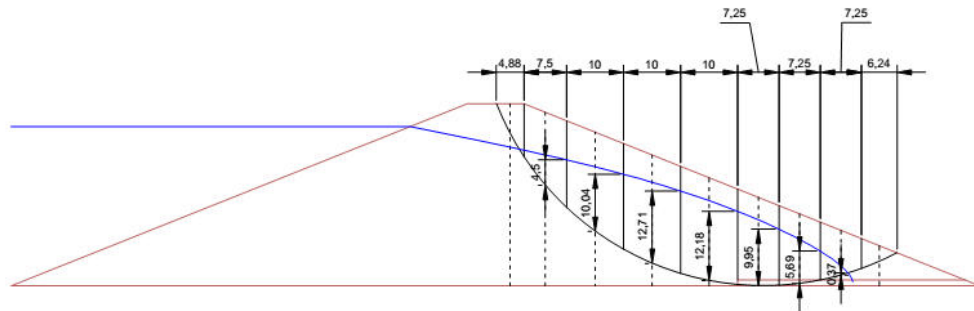
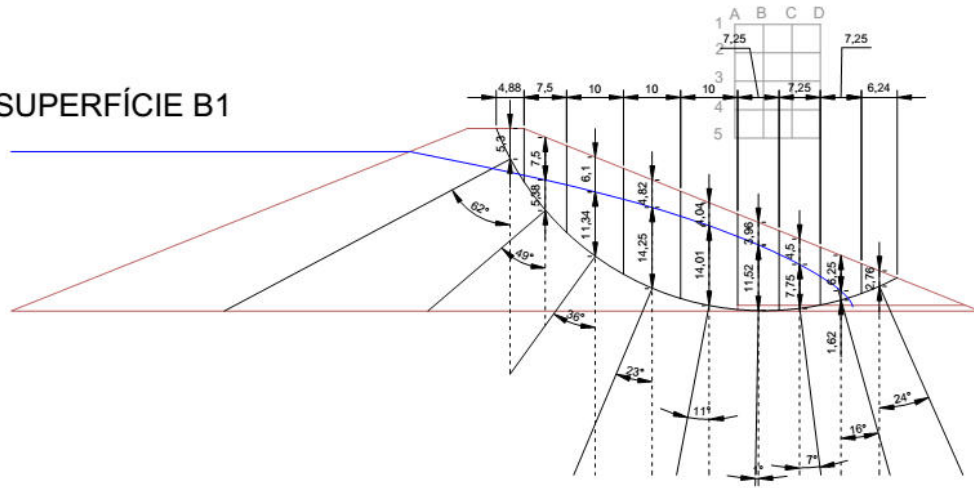
(d)



Tipo	FaSa (°°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hº (m)	α (°)	γ(ma) (kN/m²)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab·b γ(ma)	P2=hbc·b γ(sat) sub	°P1-°P2 °sin(α)	μ±h°γ·va	μ±°b	φ (°)	c (kPa)	c°b	tg(φ)	(P1+P2- μ±°b)°tg(φ)	(P1+P2- μ±°b)°tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{C_{Sa}}}$	Csa	b	Csa	1.408	
AS																												
Macizo	1	4,54	6,64	7,41	2,42	68,00	18,20	20,00	10,19	548,66	336,41	820,62	23,74	107,78	12,00	50,00	227,00	0,21	165,22	392,22	2,48	2,67	1,94	762,28	Csa	1.408		
Macizo	2	5,29	5,83	10,27	9,44	48,00	18,20	20,00	10,19	667,41	1291,97	1456,10	92,61	582,49	12,00	50,00	314,50	0,21	292,66	607,16	1,11	1,49	1,28	777,14	Csa	1.408		
Macizo	3	10,00	4,82	14,49	12,95	29,00	18,20	20,00	10,19	877,24	2898,00	3830,27	127,04	1270,40	12,00	50,00	500,00	0,21	532,42	1032,42	0,55	1,14	1,06	1089,30	Csa-Csa	1.408		
Macizo	4	10,00	4,04	14,62	12,75	9,00	18,20	20,00	10,19	735,28	2924,00	572,44	125,08	1250,78	12,00	50,00	500,00	0,21	511,94	1011,94	0,16	1,01	0,99	1000,64				
Filtra	5	7,24	3,96	11,59	9,68	8,00	18,20	17,51	7,70	521,80	646,12	-162,54	94,96	687,52	30,00	0,00	0,58	277,36	277,36	-0,14	1,01	1,07	297,21					
Macizo	6	7,24	4,50	5,96	3,90	-22,00	18,20	20,00	10,19	592,96	863,01	-545,41	38,26	277,00	12,00	50,00	362,00	0,21	250,60	612,60	-0,40	1,08	1,15	703,61				
Macizo	7	6,29	3,95	0,00	0,00	-37,00	18,20	20,00	10,19	452,19	0,00	-272,13	0,00	0,00	12,00	50,00	314,50	0,21	96,12	410,62	-0,75	1,25	1,41	580,12				
SOMA												3699,39												5210,29				

(e)

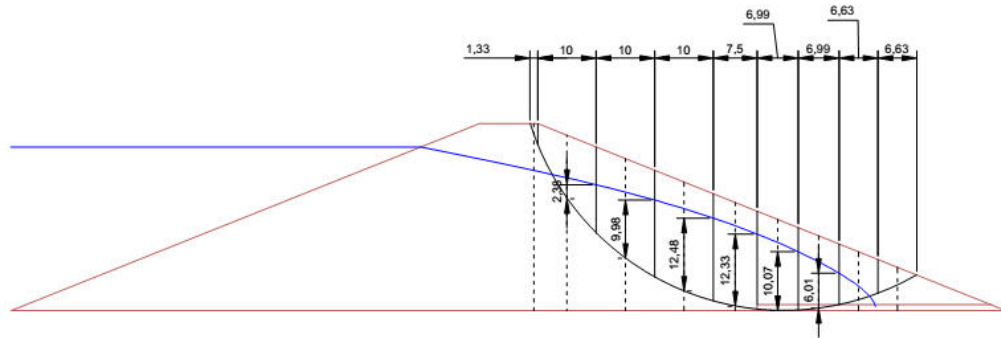
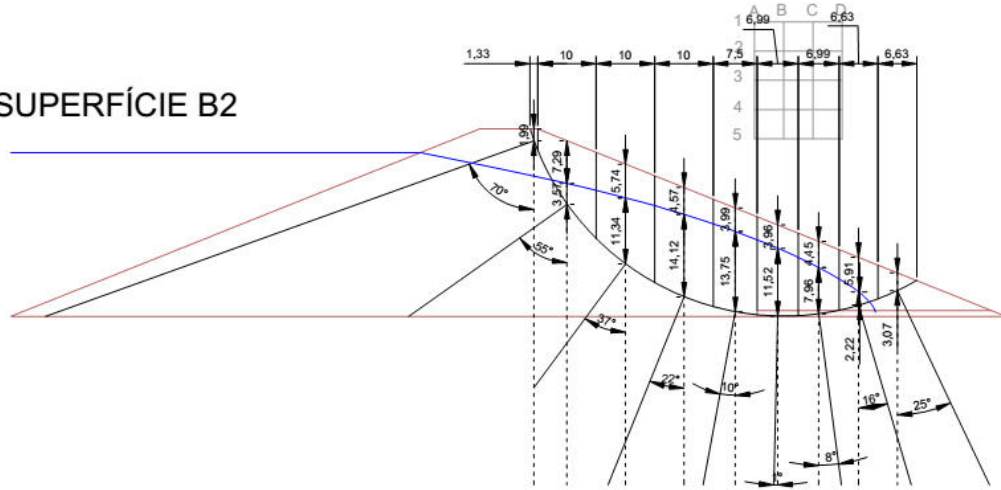
SUPERFÍCIE B1



Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab·b*γ(máx)	P2=hbc·b*γ(sat_sub)	(P1+P2)·sin(α)	μ·hp·γa	μ·b	φ (°)	c (kPa)	c·b	tg(φ)	(P1+P2-μ·b)*tg(φ)	C·b+(P1+P2-μ·b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa					
B1																													
Maciço	1	4,88	5,30	0,00	0,00	62,00	18,20	20,00	10,19	470,72	0,00	415,63	0,00	0,00	12,00	50,00	244,00	0,21	100,06	344,06	1,88	2,13	1,59	545,54	Csa	1,164			
Maciço	2	7,50	7,50	5,38	4,50	49,00	18,20	20,00	10,19	1023,75	807,00	1381,68	44,15	331,09	12,00	50,00	375,00	0,21	318,76	693,76	1,15	1,52	1,26	873,92	Csa1	1,164			
Maciço	3	10,00	6,10	11,34	10,04	36,00	18,20	20,00	10,19	1110,20	2268,00	1965,66	98,49	984,92	12,00	50,00	500,00	0,21	508,71	1008,71	0,73	1,24	1,09	1100,81	Csa-Csa1	0,000			
Maciço	4	10,00	4,82	14,25	12,71	23,00	18,20	20,00	10,19	877,24	2850,00	3456,35	124,69	1246,85	12,00	50,00	500,00	0,21	527,22	1027,22	0,42	1,09	1,01	1035,67					
Maciço	5	10,00	4,04	14,01	12,18	11,00	18,20	20,00	10,19	735,28	2802,00	674,94	119,49	1194,96	12,00	50,00	500,00	0,21	497,90	997,90	0,19	1,02	0,98	981,73					
Filtro	6	7,25	3,96	11,52	9,95	1,00	18,20	17,51	7,70	522,52	643,10	20,34	97,61	707,67	30,00	0,00	0,00	0,58	264,40	264,40	0,02	1,00	0,99	262,17					
Filtro	7	7,25	4,50	7,75	5,69	-7,00	18,20	17,51	7,70	593,78	432,64	-125,09	55,82	404,69	30,00	0,00	0,00	0,58	358,96	358,96	-0,12	1,01	1,07	385,10					
Maciço	8	7,25	6,25	1,62	0,37	-16,00	18,20	20,00	10,19	824,69	234,90	-292,06	3,63	26,32	12,00	50,00	362,50	0,21	219,63	582,13	-0,29	1,04	1,10	639,04					
Maciço	9	6,24	2,76	0,00	0,00	-24,00	18,20	20,00	10,19	313,45	0,00	-127,49	0,00	0,00	12,00	50,00	312,00	0,21	66,63	378,63	-0,45	1,09	1,19	451,13					
SOMA												5389,96														6275,12			

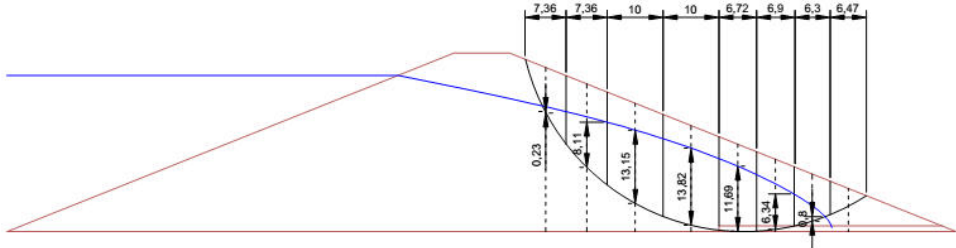
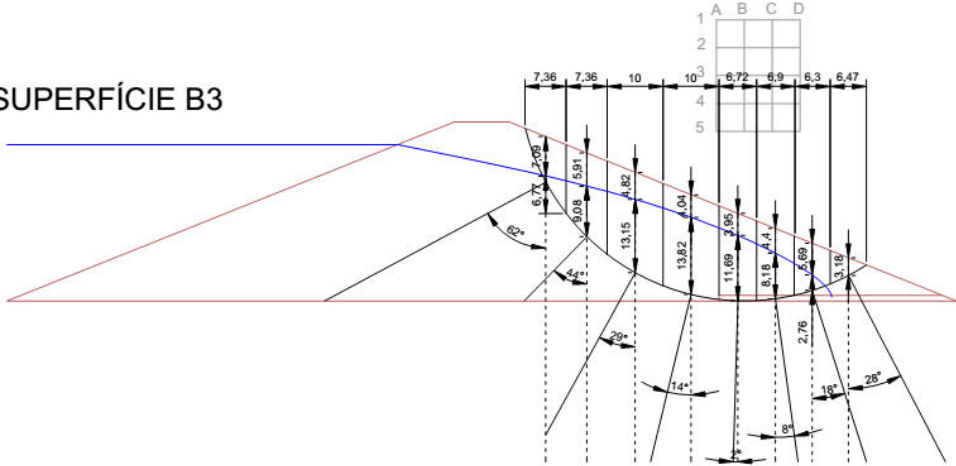
(f)

SUPERFÍCIE B2



Tipo	Fatia (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab* γ*(máx)	P2=hbc* γ*(sat_sub)	(P1+P2)*sin(α)	μ*hp*γa	μ*b	φ (°)	c (kPa)	c*b	tg(φ)	(P1+P2- μ*b)*tg(φ)	C*b+(P1+P2- μ*b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{sec(\alpha)}{1 + \frac{tan(\phi) \cdot tan(\alpha)}{CSa}}$	CSa					
B2																													
Maciço	1	1,33	1,99	0,00	0,00	70,00	18,20	20,00	10,19	48,17	0,00	45,26	0,00	0,00	12,00	50,00	66,50	0,21	10,24	76,74	2,75	2,92	1,96	150,55	Csa	1,191			
Maciço	2	10,00	7,29	3,57	2,38	55,00	18,20	20,00	10,19	1326,78	714,00	1671,71	23,35	233,48	12,00	50,00	500,00	0,21	384,15	884,15	1,43	1,74	1,39	1228,37	Csa1	1,191			
Maciço	3	10,00	5,74	11,34	9,98	37,00	18,20	20,00	10,19	1044,68	2268,00	1993,62	97,90	979,04	12,00	50,00	500,00	0,21	496,03	996,03	0,75	1,25	1,10	1099,32	(CSa-Csa1)	0,000			
Maciço	4	10,00	4,57	14,12	12,48	22,00	18,20	20,00	10,19	831,74	2824,00	1369,46	122,43	1224,29	12,00	50,00	500,00	0,21	516,82	1016,82	0,40	1,08	1,01	1022,91					
Maciço	5	7,50	3,99	13,75	12,33	10,00	18,20	20,00	10,19	544,64	2062,50	452,72	120,96	907,48	12,00	50,00	375,00	0,21	361,34	736,34	0,18	1,02	0,98	724,88					
Filtro	6	6,99	3,96	11,52	10,07	1,00	18,20	17,51	7,70	303,78	620,04	19,61	98,79	690,52	30,00	0,00	0,00	0,58	250,17	250,17	0,02	1,00	0,99	248,11					
Filtro	7	6,99	4,45	7,96	6,01	-8,00	18,20	17,51	7,70	566,12	438,43	-138,44	58,96	412,12	30,00	0,00	0,00	0,58	336,27	336,27	-0,14	1,01	1,08	364,40					
Maciço	8	6,63	5,91	2,22	0,00	-16,00	18,20	20,00	10,19	713,14	294,37	-277,71	0,00	0,00	12,00	50,00	331,50	0,21	214,15	545,65	-0,29	1,04	1,10	598,26					
Maciço	9	6,63	3,07	0,00	0,00	-25,00	18,20	20,00	10,19	370,44	0,00	-156,56	0,00	0,00	12,00	50,00	331,50	0,21	78,74	410,24	-0,47	1,10	1,20	493,74					
SOMA												4979,72														5930,54			

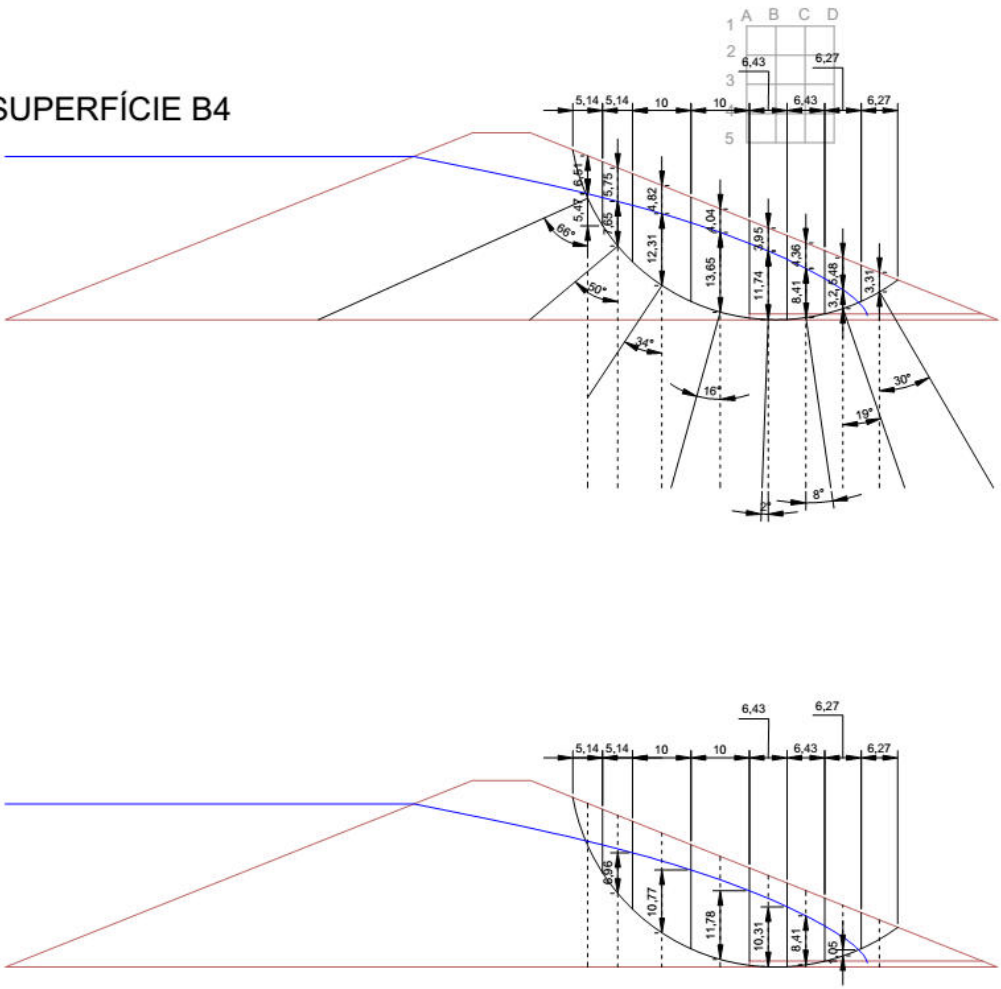
SUPERFÍCIE B3



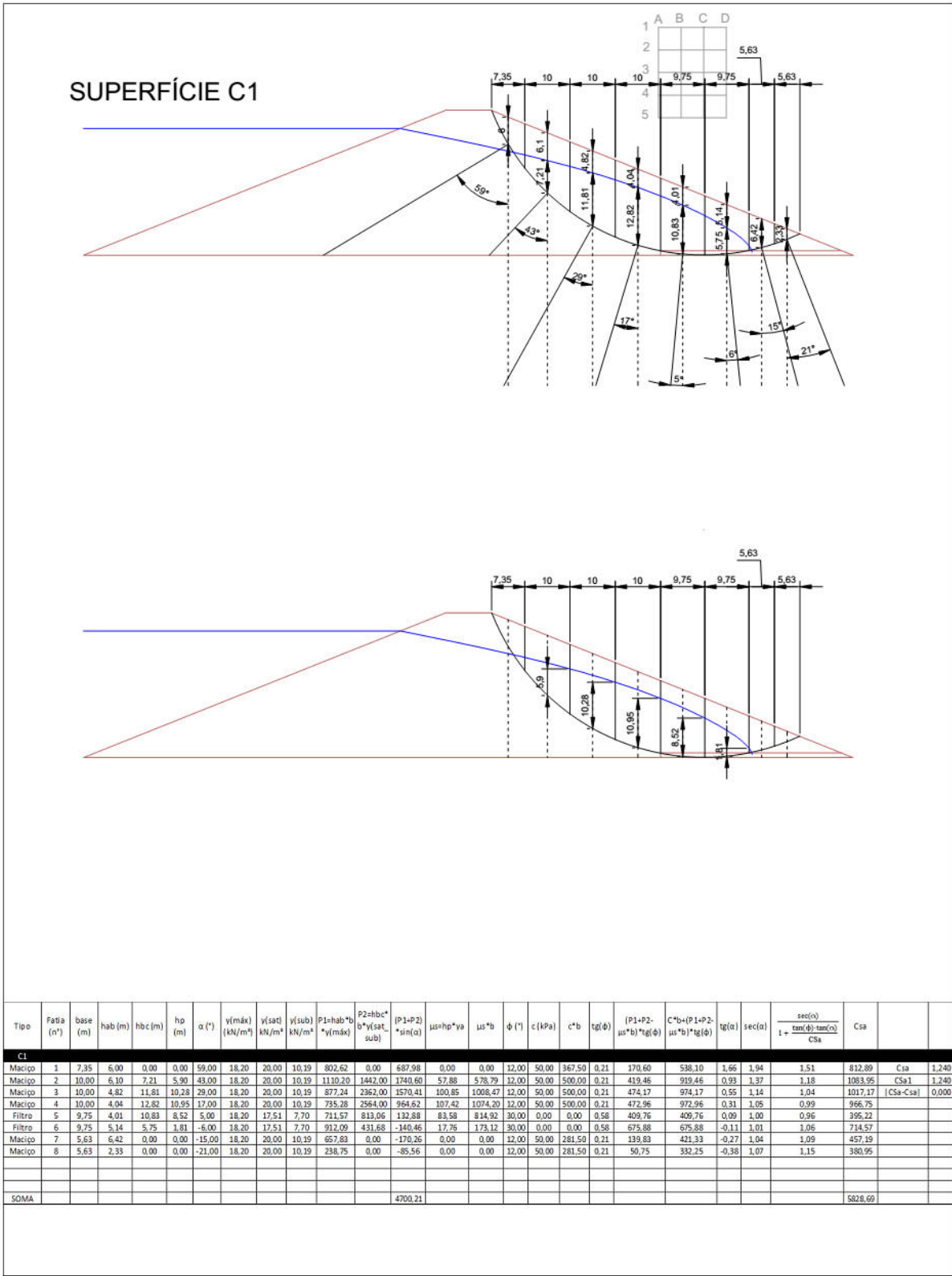
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab*γ*(kN/m²)	P2=hbc*γ*(sat sub) (kN/m²)	(P1+P2)*sin(α)	μs=hp*γa	μs*b	φ (°)	c (kPa)	c*b	tg(φ)	(P1+P2-μs*b)*tg(φ)	C*b=(P1+P2-μs*b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa			
B3																											
Maciço	1	7,36	9,16	0,00	0,23	62,00	18,20	20,00	10,19	1227,00	0,00	1083,38	2,26	16,61	12,00	50,00	368,00	0,21	257,28	625,28	1,88	2,13	1,59	991,69	Csa	1,165	
Maciço	2	7,36	5,91	9,08	8,11	44,00	18,20	20,00	10,19	791,66	1336,58	1478,39	79,56	585,55	12,00	50,00	368,00	0,21	327,91	695,91	0,97	1,39	1,18	822,54	Csa1	1,165	
Maciço	3	10,00	4,82	13,15	13,15	29,00	18,20	20,00	10,19	877,24	2630,00	1700,34	129,00	1290,02	12,00	50,00	500,00	0,21	471,29	971,29	0,55	1,14	1,04	1008,55	[Csa-Csa1]	0,000	
Maciço	4	10,00	4,04	13,82	13,82	14,00	18,20	20,00	10,19	735,28	2764,00	846,55	135,57	1355,74	12,00	50,00	500,00	0,21	455,62	955,62	0,25	1,03	0,99	942,04			
Filtro	5	6,72	3,95	11,69	11,69	2,00	18,20	17,51	7,70	483,10	604,89	37,97	114,68	770,64	30,00	0,00	0,00	0,58	183,22	183,22	0,03	1,00	0,98	180,21			
Filtro	6	6,90	4,40	8,18	6,34	-8,00	18,20	17,51	7,70	552,55	434,60	-137,39	62,20	429,15	30,00	0,00	0,58	322,17	322,17	-0,14	1,01	1,09	349,68				
Maciço	7	6,30	5,69	2,76	8,00	-18,00	18,20	20,00	10,19	652,42	347,76	-309,07	78,48	494,42	12,00	50,00	315,00	0,21	107,50	422,50	-0,32	1,05	1,12	472,23			
Maciço	8	6,47	3,18	0,00	0,00	-28,00	18,20	20,00	10,19	374,46	0,00	-175,80	0,00	0,00	12,00	50,00	323,50	0,21	79,59	403,09	-0,53	1,13	1,25	505,56			
													4524,38												5272,51		
SOMA																											

(h)

SUPERFÍCIE B4

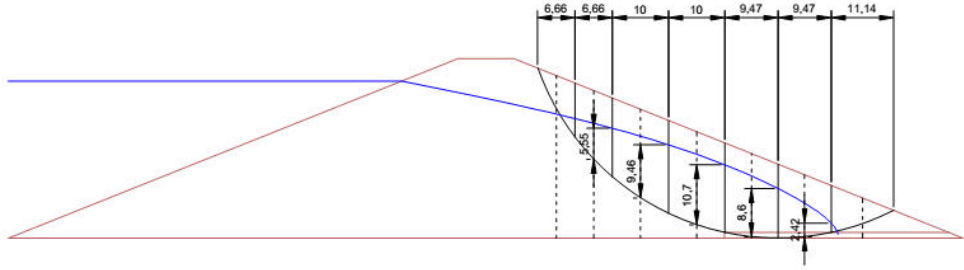
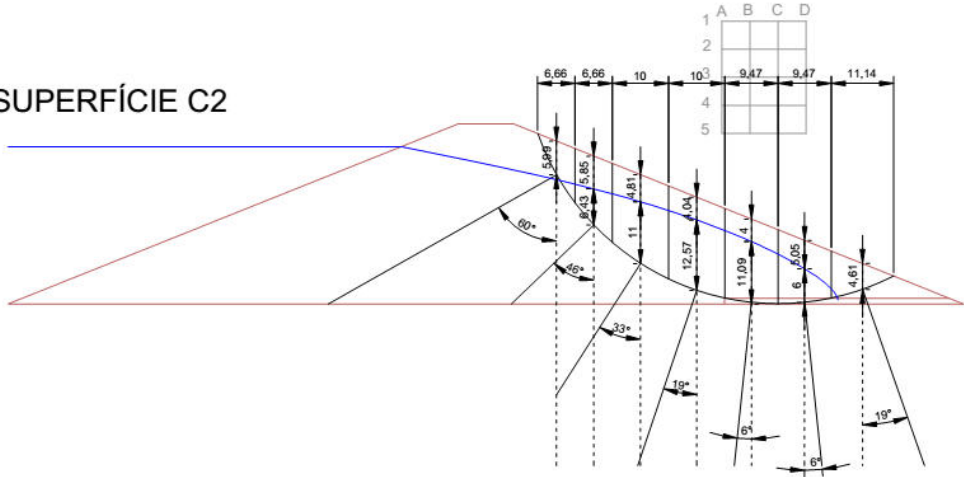


Tipo	FaSa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ (máx) (kN/m³)	γ (sat) kN/m³	γ (sub) kN/m³	$P1=hab \cdot \gamma_b$ (v(máx))	$P2=hbc \cdot \gamma_b$ (v(sat))	$(P1+P2) \cdot \sin(\alpha)$	$\mu \cdot \sin \phi \cdot \gamma_a$	$\mu \cdot \gamma_b$	ϕ (°)	c (kPa)	$c \cdot b$	tg(ϕ)	$(P1+P2 - \mu \cdot \gamma_b) \cdot \text{tg}(\phi)$	$C \cdot b + (P1+P2 - \mu \cdot \gamma_b) \cdot \text{tg}(\phi)$	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{CSa}}$	CSa			
B4																											
Maciço	1	5,14	7,27	0,00	0,00	66,00	18,20	20,00	10,19	660,09	0,00	621,30	0,00	0,00	12,00	50,00	257,00	0,21	344,56	401,56	2,25	2,46	1,79	719,49	Csa	1,283	
Maciço	2	5,14	5,75	7,65	6,96	50,00	18,20	20,00	10,19	537,90	786,42	1014,49	68,28	350,95	12,00	50,00	257,00	0,21	206,90	463,90	1,19	1,56	1,30	602,68	CSa1	1,283	
Maciço	3	10,00	4,82	12,31	10,77	34,00	18,20	20,00	10,19	877,24	2462,00	1867,28	106,65	1066,54	12,00	50,00	500,00	0,21	485,20	985,20	0,67	1,21	1,08	1068,90	[CSa-Csa]	0,000	1,283
Maciço	4	10,00	4,04	13,65	11,78	16,00	18,20	20,00	10,19	735,28	2730,00	955,16	115,56	1155,62	12,00	50,00	500,00	0,21	490,93	990,93	0,29	1,04	0,99	984,11			0,99
Filtro	5	6,43	3,95	11,74	10,31	2,00	18,20	17,51	7,70	462,25	581,26	36,42	101,14	650,34	30,00	0,00	0,00	0,58	227,00	227,00	0,03	1,00	0,99	223,62			0,99
Filtro	6	6,43	4,36	8,41	8,41	-8,00	18,20	17,51	7,70	510,23	416,39	-128,96	82,50	530,49	30,00	0,00	0,00	0,58	228,71	228,71	-0,14	1,01	1,08	246,55			1,08
Maciço	7	6,27	5,48	3,20	1,05	-19,00	18,20	20,00	10,19	625,34	401,28	-334,24	10,30	64,58	12,00	50,00	313,50	0,21	204,49	517,99	-0,34	1,06	1,12	580,98			1,12
Maciço	8	6,27	3,31	0,00	0,00	-30,00	18,20	20,00	10,19	377,72	0,00	-188,66	0,00	0,00	12,00	50,00	313,50	0,21	80,29	393,79	-0,58	1,15	1,28	502,81			1,28
SOMA													3842,59												4920,15		



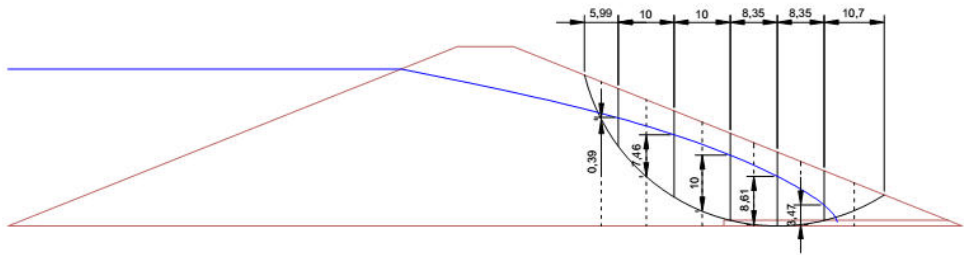
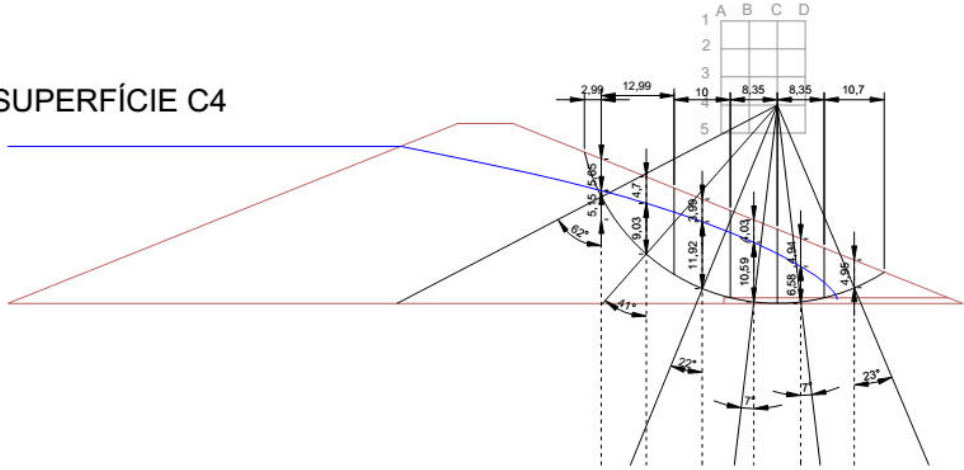
(k)

SUPERFÍCIE C2



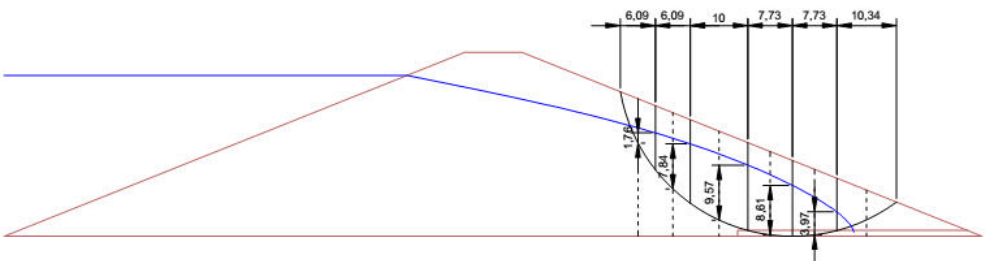
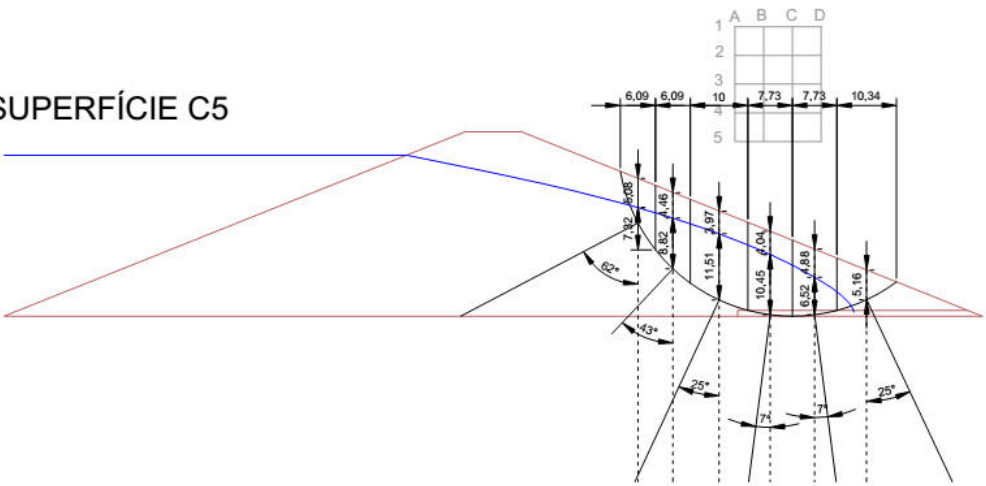
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab(m)	hbc(m)	hp (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab*γ*(máx)	P2=hbc*γ*(sat)	(P1+P2)*sin(α)	μs=hp*γs	us*b	φ (°)	c (kPa)	c*b	tg(φ)	(P1+P2-μs*b)*tg(φ)	C*b+(P1+P2-μs*b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa			
C2																											
Maciço	1	6,66	5,99	0,00	0,00	60,00	18,20	20,00	10,19	726,06	0,00	628,79	0,00	0,00	12,00	50,00	333,00	0,21	154,33	487,33	1,73	2,00	1,56	760,69	Csa	1,309	
Maciço	2	6,66	5,85	6,43	5,55	40,00	18,20	20,00	10,19	709,09	856,48	1006,33	54,45	362,61	12,00	50,00	333,00	0,21	255,70	588,70	0,84	1,31	1,15	676,33	Csa1	1,309	
Maciço	3	10,00	4,81	11,00	9,46	33,00	18,20	20,00	10,19	875,42	2200,00	1674,99	92,80	928,03	12,00	50,00	500,00	0,21	456,44	956,44	0,65	1,19	1,08	1031,63	(Csa-Csa1)	0,000	
Maciço	4	10,00	4,04	12,57	10,07	19,00	18,20	20,00	10,19	735,28	2514,00	1657,86	98,79	987,87	12,00	50,00	500,00	0,21	480,68	980,68	0,34	1,06	1,00	982,26			
Filtro	5	9,47	4,00	11,09	8,60	6,00	18,20	17,51	7,70	689,42	-808,67	-156,59	84,37	798,95	30,00	0,00	0,00	0,58	403,65	403,65	0,11	1,01	0,96	387,89			
Filtro	6	9,47	5,05	6,00	2,42	-6,00	18,20	17,51	7,70	870,39	-437,51	-136,71	23,74	224,82	30,00	0,00	0,00	0,58	625,32	625,32	-0,11	1,01	1,05	659,33			
Maciço	6	11,14	4,61	0,00	0,00	-19,00	18,20	20,00	10,19	934,67	0,00	-304,30	0,00	0,00	12,00	50,00	557,00	0,21	198,67	755,67	-0,34	1,06	1,12	846,55			
SOMA												4083,55													5344,67		

SUPERFÍCIE C4



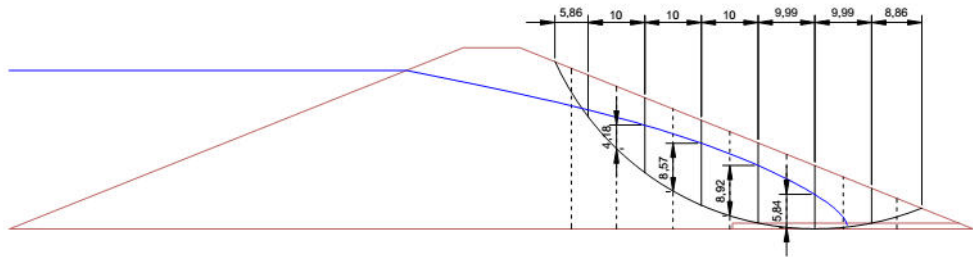
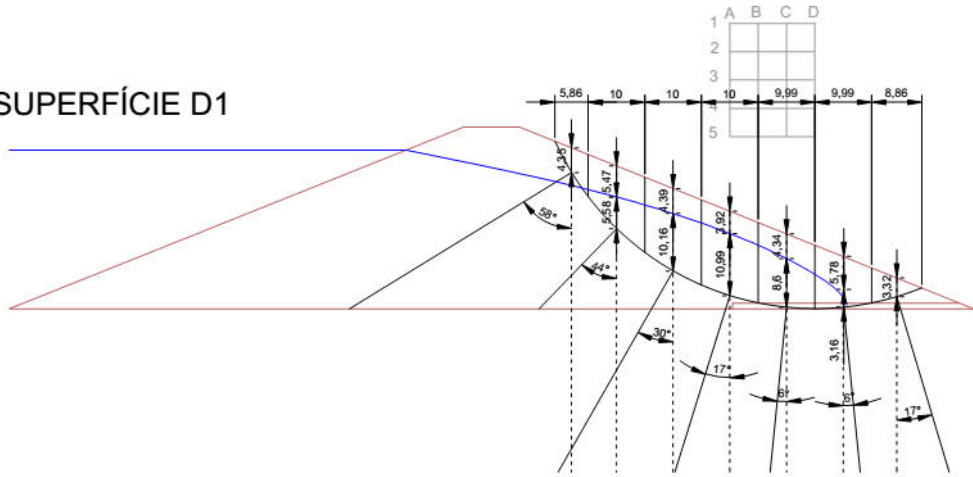
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab*γ*(máx)	P2=hbc*γ(sat)	(P1+P2) *sin(α)	μ=hp*γ*va	μ*γ ^b	φ (°)	c (kPa)	c* ^b	tg(φ)	(P1+P2-μ*γ ^b)*tg(φ)	C* ^b =(P1+P2-μ*γ ^b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1+\frac{\tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa		
C4																										
Maciço	1	5,99	6,74	0,00	0,39	62,00	18,20	20,00	10,19	734,78	0,00	648,77	3,83	22,92	12,00	50,00	299,50	0,21	151,31	450,81	1,88	2,13	1,66	748,26	Csa	1,411
Maciço	2	10,00	4,70	9,03	7,46	41,00	18,20	20,00	10,19	855,40	1806,00	1746,04	73,18	731,83	12,00	50,00	500,00	0,21	410,14	910,14	0,87	1,33	1,17	1096,32	Csa1	1,411
Maciço	3	10,00	3,99	11,92	10,00	22,00	18,20	20,00	10,19	726,18	2384,00	1665,09	98,10	981,00	12,00	50,00	500,00	0,21	452,57	952,57	0,40	1,08	1,02	968,44	Csa-Csa	0,000
Filtro	4	8,35	4,03	10,59	8,61	7,00	18,20	17,51	7,70	612,44	680,88	157,62	84,46	705,28	30,00	0,00	0,58	339,51	339,51	0,12	1,01	0,96	375,70			
Filtro	5	8,35	4,94	6,58	3,47	-7,00	18,20	17,51	7,70	750,73	-423,06	-143,06	34,04	284,24	30,00	0,00	0,58	513,58	513,58	-0,12	1,01	1,06	544,81			
Maciço	6	10,70	4,95	0,00	0,00	-23,00	18,20	20,00	10,19	963,96	0,00	-376,65	0,00	0,00	12,00	50,00	535,00	0,21	204,90	739,90	-0,42	1,09	1,16	858,70		

SUPERFÍCIE C5



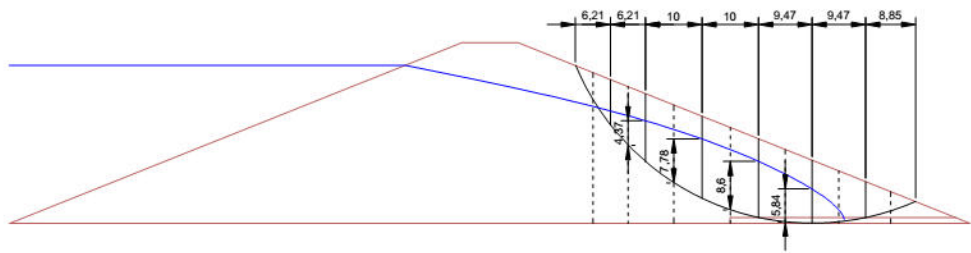
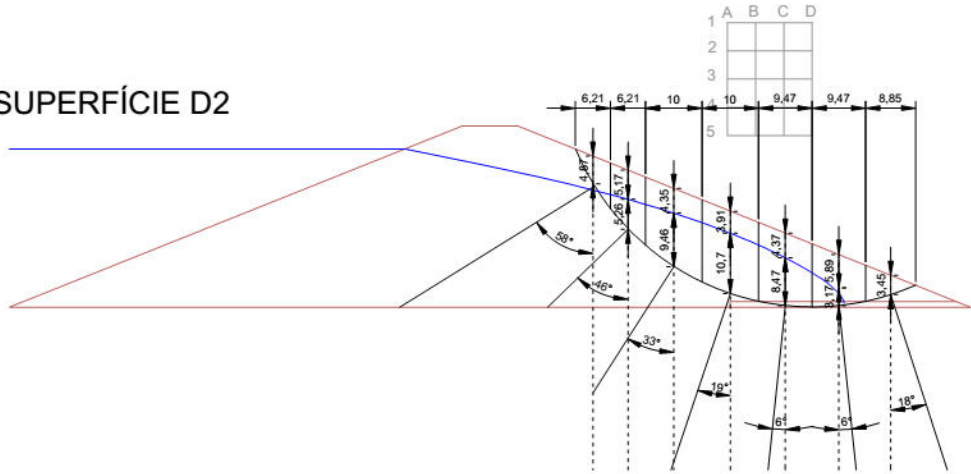
Tipo	Fatia (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	γ (máx) (kN/m³)	γ (sat) kN/m³	γ (sub) kN/m³	P1=hab· γ (máx)	P2=hbc· γ (sat) b· γ (sat)	(P1+P2) ·sin(α)	μ =hp· γ	μ ·b	ϕ (°)	c (kPa)	c·b	tg(ϕ)	(P1+P2- μ ·b)·tg(ϕ)	C·b+(P1+P2- μ ·b)·tg(ϕ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{sec(\alpha)}{1 + \frac{tan(\phi) \cdot tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa			
C5																											
Macizo	1	6.09	5.08	7.32	1.76	62.00	18.20	20.00	10.19	563.06	445.79	890.76	17.27	105.15	12.00	50.00	304.50	0.21	192.09	496.59	1.88	2.13	1.67	827.17	Csa	1.434	
Macizo	2	6.09	4.46	8.82	7.84	43.00	18.20	20.00	10.19	494.34	1074.28	1069.79	76.91	468.38	12.00	50.00	304.50	0.21	233.86	538.36	0.93	1.37	1.20	646.72	Csa1	1.434	
Macizo	3	10.00	3.97	11.51	9.57	25.00	18.20	20.00	10.19	722.54	2302.00	1278.23	93.88	938.82	12.00	50.00	500.00	0.21	443.33	943.33	0.47	1.10	1.03	973.56	Csa-Csa1	0.000	
Filtro	4	7.73	4.04	10.45	8.61	7.00	18.20	17.51	7.70	568.37	621.99	145.07	84.46	652.91	30.00	0.00	0.00	0.58	310.30	310.30	0.12	1.01	0.96	297.91			
Filtro	5	7.73	4.88	6.52	3.97	-7.00	18.20	17.51	7.70	686.55	388.08	-130.96	38.95	301.05	30.00	0.00	0.00	0.58	446.62	446.62	-0.12	1.01	1.06	473.38			
Macizo	6	10.34	5.16	0.00	0.00	-25.00	18.20	20.00	10.19	971.05	0.00	-410.38	0.00	0.00	12.00	50.00	517.00	0.21	206.40	723.40	-0.47	1.10	1.19	857.45			
SOMA																											
													2842.50													4076.19	

SUPERFÍCIE D1



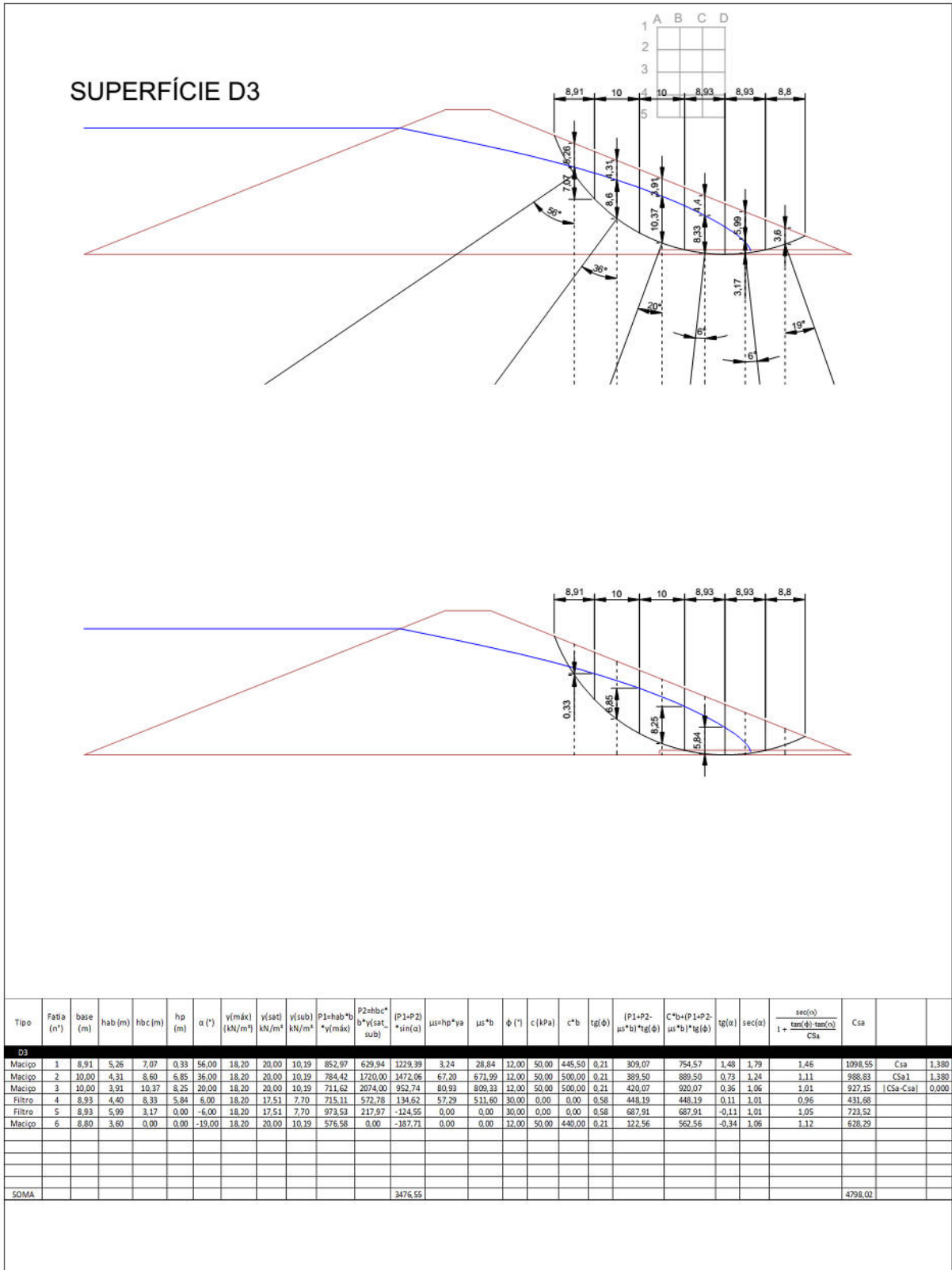
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	$\gamma(\text{máx})$ (kN/m³)	$\gamma(\text{sat})$ (kN/m³)	$\gamma(\text{sub})$ (kN/m³)	$P1=\text{hab} \cdot \gamma$ (kN/m²)	$P2=\text{hbc} \cdot \gamma$ (kN/m²)	$(P1+P2) \cdot \sin(\alpha)$	$\mu \cdot \text{hp} \cdot \gamma$	$\mu \cdot \text{b}$	ϕ (°)	c (kPa)	c' b	$\text{tg}(\phi)$	$(P1+P2) \cdot \mu \cdot \text{b} \cdot \text{tg}(\phi)$	$C' \cdot \text{b} + (P1+P2) \cdot \mu \cdot \text{b} \cdot \text{tg}(\phi)$	$\text{tg}(\alpha)$	$\sec(\alpha)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa		
D1																										
Maciço	1	5,86	4,35	0,00	0,00	58,00	18,20	20,00	10,19	463,94	0,00	399,44	0,00	0,00	32,00	50,00	299,00	0,21	98,61	391,61	1,60	1,89	1,51	502,62	Csa	1,377
Maciço	2	10,00	5,47	5,58	4,18	44,00	18,20	20,00	10,19	995,54	1116,00	1465,80	41,01	410,06	12,00	50,00	500,00	0,21	361,66	861,66	0,97	1,39	1,21	1042,46	Csa1	1,377
Maciço	3	10,00	4,39	10,16	5,87	30,00	18,20	20,00	10,19	798,98	2032,00	1415,49	57,58	575,85	12,00	50,00	500,00	0,21	478,34	978,34	0,58	1,15	1,06	1018,32	Csa-Csa1	0,000
Maciço	4	10,00	3,32	10,99	8,32	17,00	18,20	20,00	10,19	713,44	2188,00	851,22	87,51	875,05	12,00	50,00	500,00	0,21	432,85	932,85	0,31	1,05	1,00	931,51		
Filtro	5	9,99	4,34	8,60	5,84	6,00	18,20	17,51	7,70	789,09	661,54	151,63	57,29	572,33	30,00	0,00	0,00	0,98	507,08	507,08	0,11	1,01	0,96	488,36		
Filtro	6	9,99	5,78	3,16	0,00	-6,00	18,20	17,51	7,70	1050,91	243,08	-135,26	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,58	747,08	747,08	-0,11	1,01	1,05	785,83		
Maciço	7	8,86	3,32	0,00	0,00	-17,00	18,20	20,00	10,19	535,36	0,00	-156,52	0,00	0,00	12,00	50,00	443,00	0,21	113,79	556,79	-0,31	1,05	1,10	611,07		
SOMA												3985,80												5490,17		

SUPERFÍCIE D2



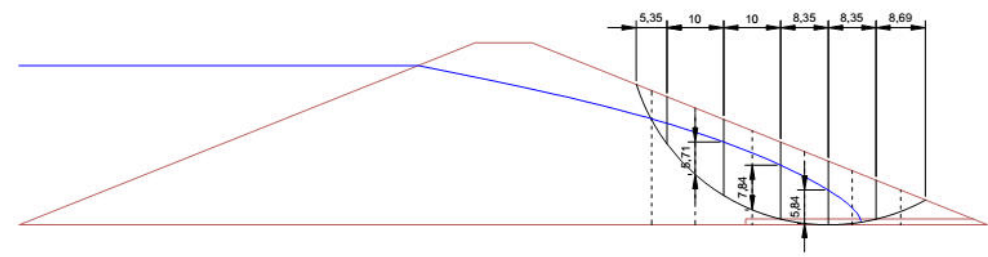
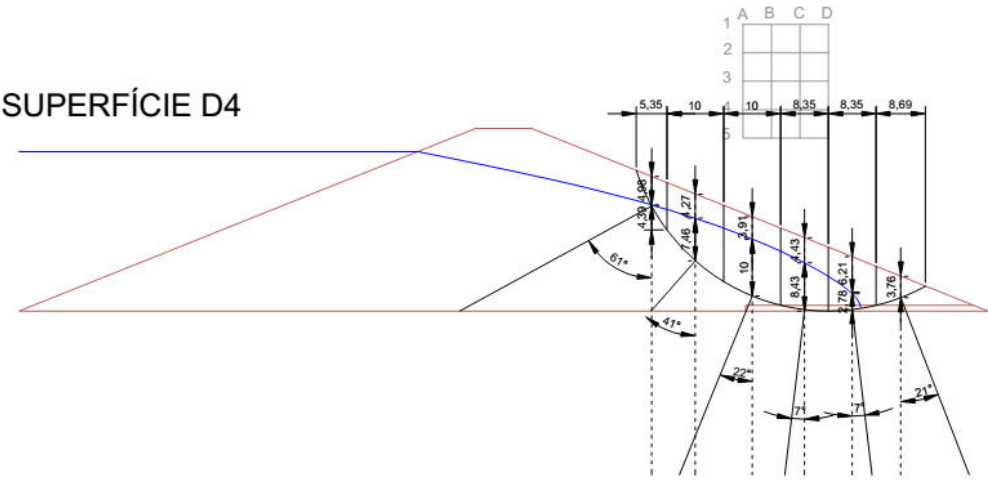
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	h0 (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab*γ*(máx)	P2=hbc*γ*(sat-sub)	(P1+P2)*sin(α)	μ+hp*γa	μ*γb	φ (°)	c (kPa)	c*b	tg(φ)	(P1+P2-μ*γb)*tg(φ)	C*γb+(P1+P2-μ*γb)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa		
D2																										
Maciço	1	6,21	4,87	0,00	0,00	58,00	18,20	20,00	10,19	550,42	0,00	466,78	0,00	0,00	12,00	50,00	310,50	0,21	116,99	427,49	1,60	1,89	1,52	649,63	Csa	1,407
Maciço	2	6,21	5,17	5,28	4,37	46,00	18,20	20,00	10,19	584,32	653,29	890,27	42,87	266,22	12,00	50,00	310,50	0,21	206,48	516,98	1,04	1,44	1,24	643,53	Csa1	1,407
Maciço	3	10,00	4,35	9,46	7,78	33,00	18,20	20,00	10,19	791,70	1892,00	1461,65	76,32	763,22	12,00	50,00	500,00	0,21	408,21	908,21	0,65	1,19	1,09	986,15	[Csa-Csa]	0,000
Maciço	4	10,00	3,91	10,70	8,60	19,00	18,20	20,00	10,19	711,62	2140,00	928,40	84,37	843,66	12,00	50,00	500,00	0,21	426,81	926,81	0,34	1,06	1,01	931,73		
Filtro	5	9,47	4,37	8,47	5,84	6,00	18,20	17,51	7,70	753,19	617,62	143,29	57,29	542,54	30,00	0,00	0,58	478,20	478,20	0,11	1,01	0,96	460,95			
Filtro	6	9,47	5,89	3,17	0,00	-6,00	18,20	17,51	7,70	1015,17	231,15	-130,28	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	58	719,56	719,56	-0,11	1,01	1,05	756,14		
Maciço	7	8,85	3,45	0,00	0,00	-18,00	18,20	20,00	10,19	555,69	0,00	-171,72	0,00	0,00	12,00	50,00	442,50	0,21	118,12	560,62	-0,32	1,05	1,11	619,90		
												3588,39										5048,04				
SOMA																										

(q)



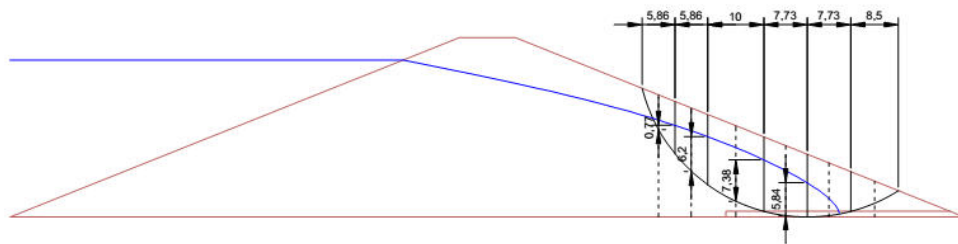
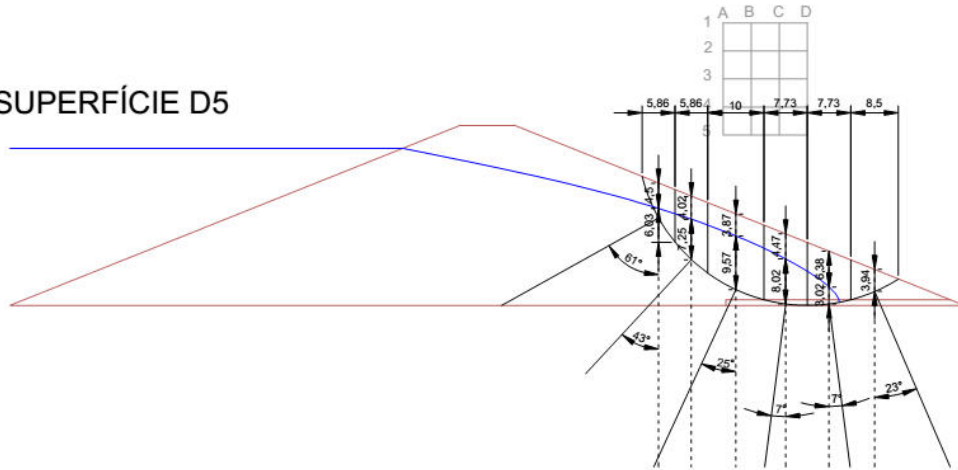
(r)

SUPERFÍCIE D4



Tipo	Fatía (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hº (m)	α (°)	γ(máx) (kN/m³)	γ(sat) kN/m³	γ(sub) kN/m³	P1=hab·b *γ(máx)	P2=hbc·b *γ(sat) o·b	(P1+P2) *sin(α)	μ+hp*γa	μ*b	φ (°)	c (kPa)	c*b	tg(φ)	(P1+P2- μ*b)*tg(φ)	C*b+(P1+P2- μ*b)*tg(φ)	tg(α)	sec(α)	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\alpha)}{C_{Sa}}}$	Csa		
D4																										
Maciço	1	5,35	4,98	4,39	0,00	61,00	18,20	20,00	10,19	484,90	234,87	629,52	0,00	0,00	12,00	50,00	267,50	0,21	152,99	420,49	1,80	2,06	1,64	689,80	Csa	1,490
Maciço	2	10,00	4,27	7,46	5,71	41,01	18,20	20,00	10,19	777,14	1492,00	1488,69	56,02	560,15	12,00	50,00	500,00	0,21	363,26	863,26	0,87	1,33	1,18	1017,62	Csa1	1,490
Maciço	3	10,00	3,91	10,00	7,84	22,00	18,20	20,00	10,19	711,62	2000,00	1015,79	76,91	769,10	12,00	50,00	500,00	0,21	412,89	912,89	0,40	1,08	1,02	930,93	[Csa-Csa]	0,000
Filtro	4	8,35	4,43	8,43	5,84	7,00	18,20	17,51	7,70	673,23	542,01	148,10	57,29	478,37	30,00	0,00	0,00	0,58	425,43	425,43	0,12	1,01	0,96	409,15		
Filtro	5	8,35	6,21	2,78	0,00	-7,00	18,20	17,51	7,70	943,73	178,74	-136,80	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,58	648,06	648,06	-0,12	1,01	1,06	685,55		
Maciço	6	8,69	3,76	0,00	0,00	-21,00	18,20	20,00	10,19	594,67	0,00	-213,11	0,00	0,00	12,00	50,00	434,50	0,21	126,40	560,90	-0,38	1,07	1,13	635,62		
SOMA												2932,20												4368,66		

SUPERFÍCIE D5

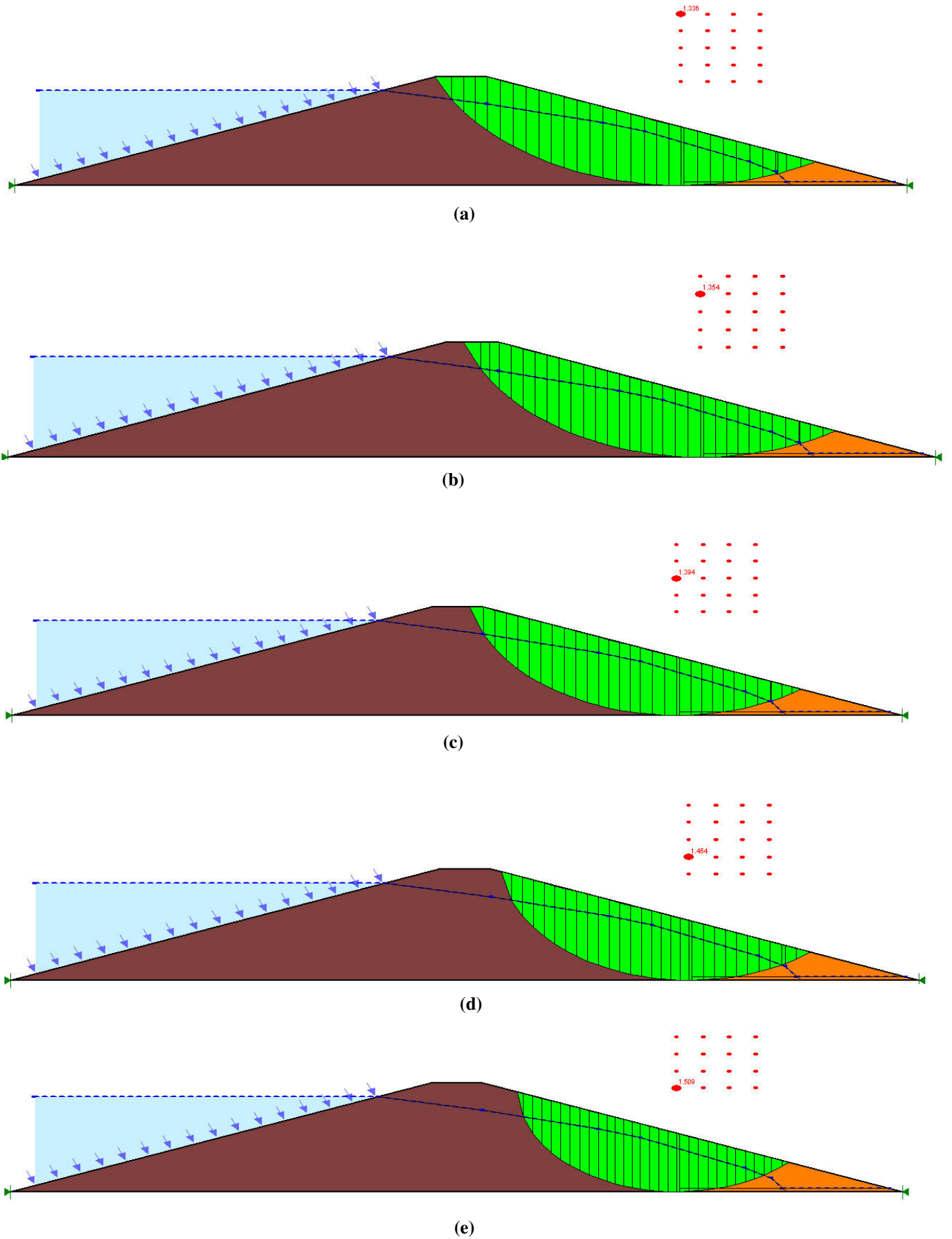


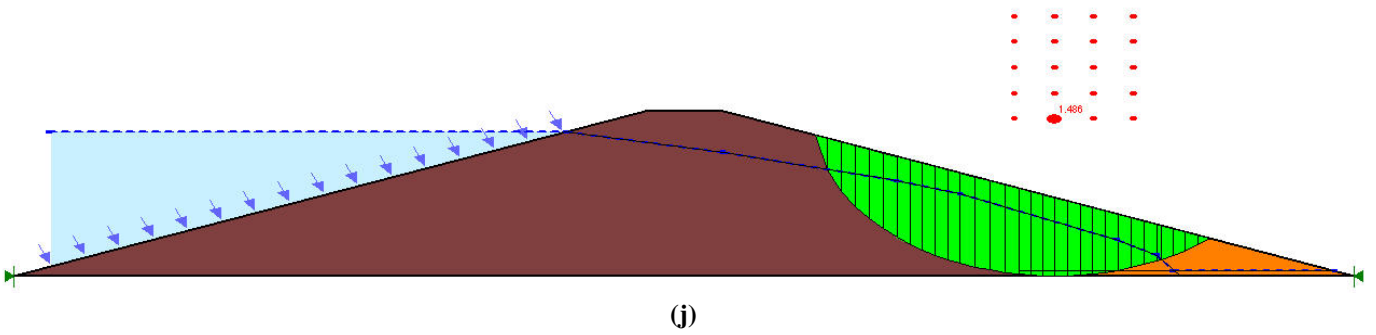
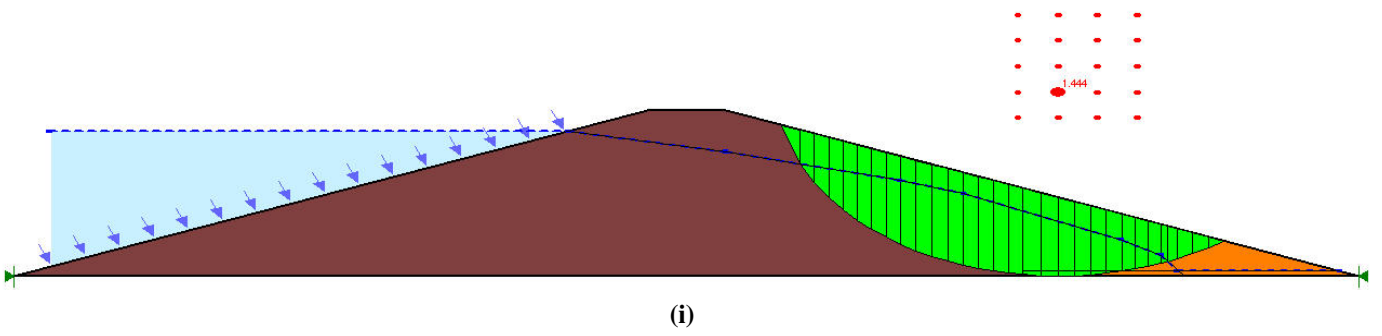
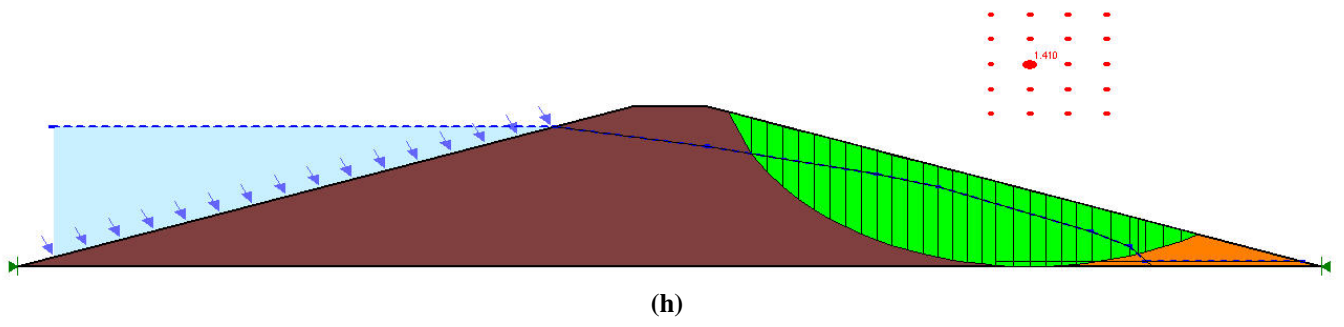
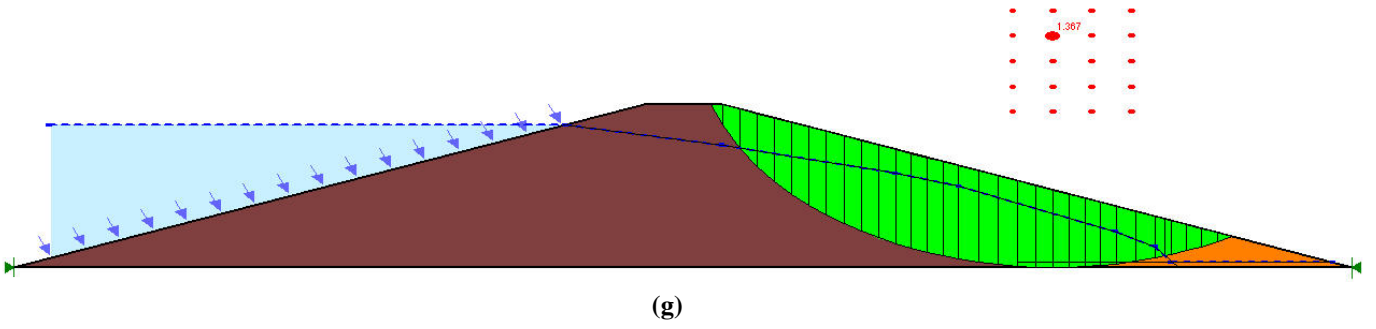
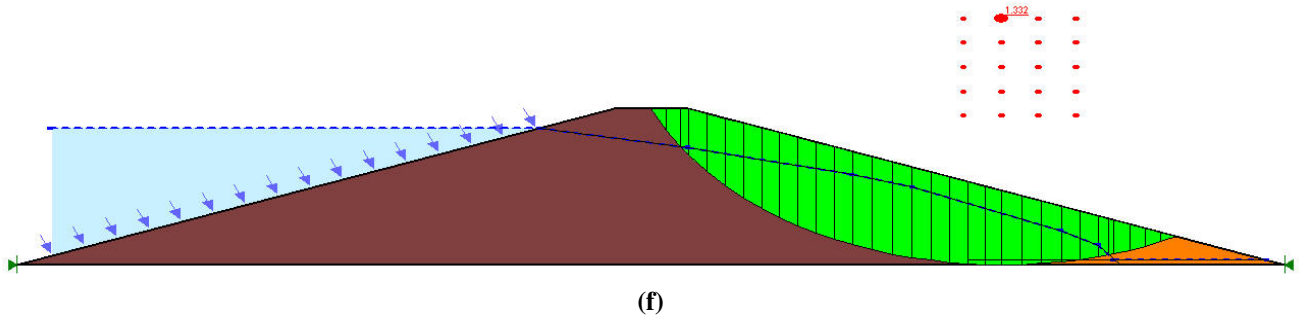
Tipo	Faixa (n°)	base (m)	hab (m)	hbc (m)	hp (m)	α (°)	$\gamma(\text{máx})$ (kN/m³)	$\gamma(\text{sat})$ (kN/m³)	$\gamma(\text{sub})$ (kN/m³)	$P1=\text{hab} \cdot \gamma$ (kN/m²)	$P2=\text{hbc} \cdot \gamma$ (kN/m²)	$(P1+P2) \cdot \sin(\alpha)$	$\mu=\text{hp} \cdot \gamma$	$\mu \cdot b$	ϕ (°)	c (kPa)	c' b	$\tan(\phi)$	$(P1+P2) \cdot \mu \cdot b \cdot \tan(\phi)$	$C' b + (P1+P2) \cdot \mu \cdot b \cdot \tan(\phi)$	$\tan(\alpha)$	$\sec(\alpha)$	$\frac{\sec(\alpha)}{1 + \frac{\tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha)}{Csa}}$	Csa		
D5																										
Maciço	1	5.86	4.50	6.03	0.77	61.00	18.20	20.00	10.19	479.99	353.36	728.81	7.55	44.26	12.00	50.00	293.00	0.21	167.71	460.71	1.80	2.06	1.66	766.85	Csa	1.603
Maciço	2	5.86	4.02	7.25	6.20	43.00	18.20	20.00	10.19	428.74	849.70	871.89	60.82	356.42	12.00	50.00	293.00	0.21	195.98	488.98	0.93	1.37	1.22	595.02	Csa	1.603
Maciço	3	10.00	3.87	9.57	7.38	25.00	18.20	20.00	10.19	704.34	1914.00	1106.56	72.40	723.38	12.00	50.00	500.00	0.21	402.66	902.66	0.47	1.10	1.04	937.97	(Csa-Csa)	0.000
Filtro	4	7.73	4.67	8.02	5.84	7.00	18.20	17.51	7.70	618.87	477.36	134.81	57.29	442.85	30.00	0.00	0.00	0.58	303.00	303.00	0.13	1.01	0.96	369.53		
Filtro	5	7.73	6.38	3.02	0.00	-23.00	18.20	17.51	7.70	897.58	179.75	-131.29	0.00	0.00	30.00	0.00	0.00	0.58	622.00	622.00	-0.12	1.01	1.05	655.67		
Maciço	6	8.50	3.94	0.00	0.00	-23.00	18.20	20.00	10.19	609.52	0.00	-238.16	0.00	0.00	12.00	50.00	425.00	0.21	129.56	554.56	-0.42	1.09	1.15	638.38		
SOMA												2472.63													3963.42	

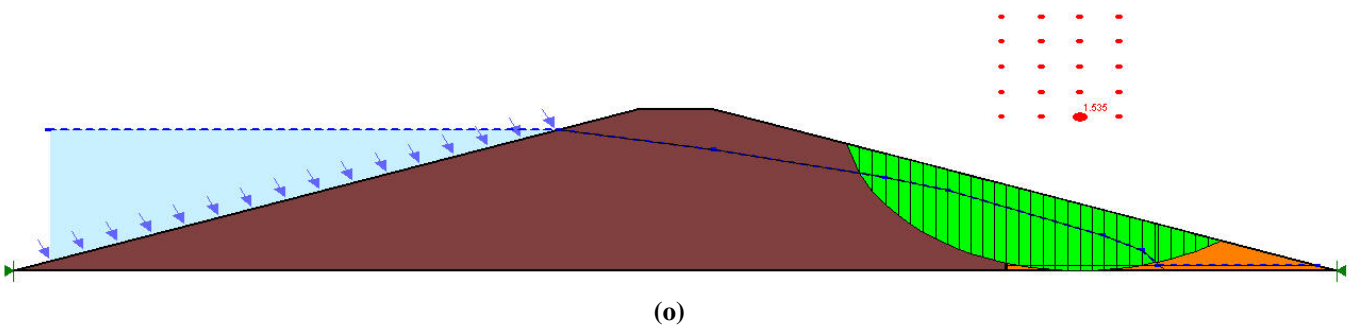
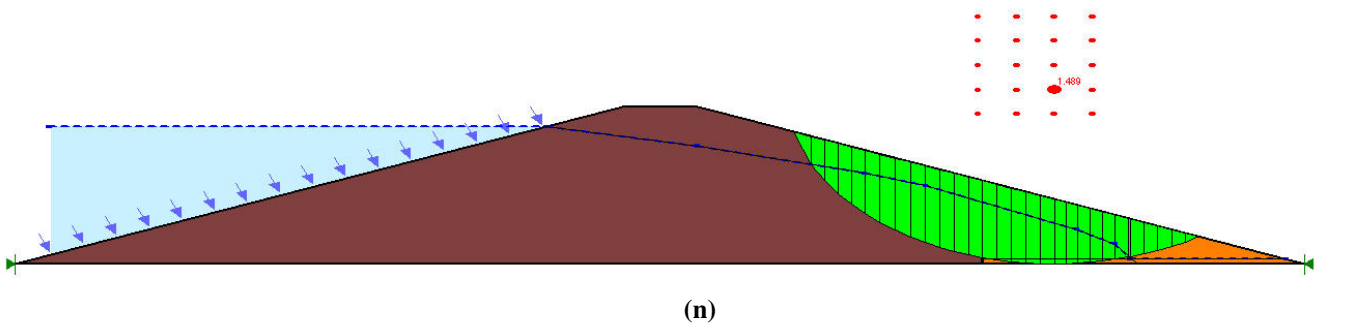
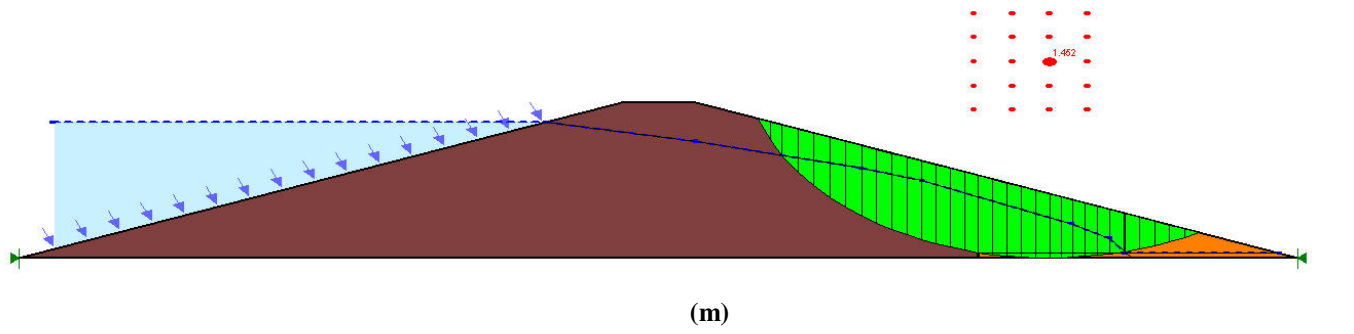
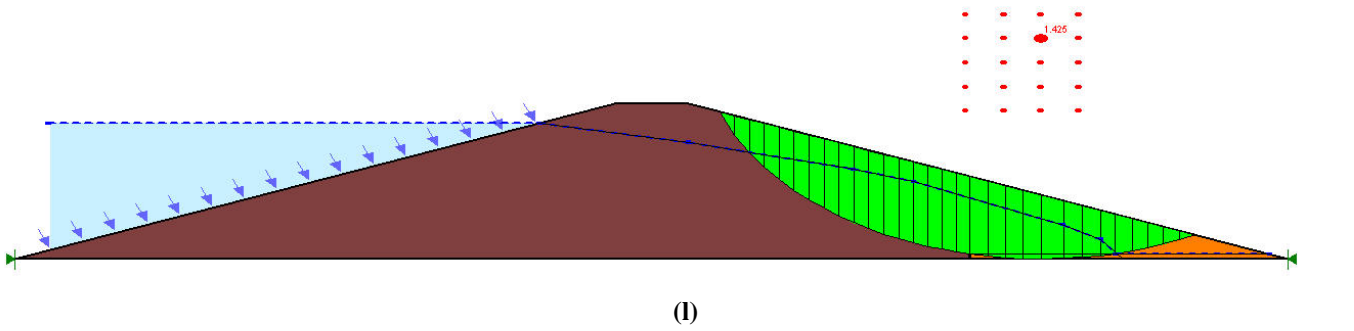
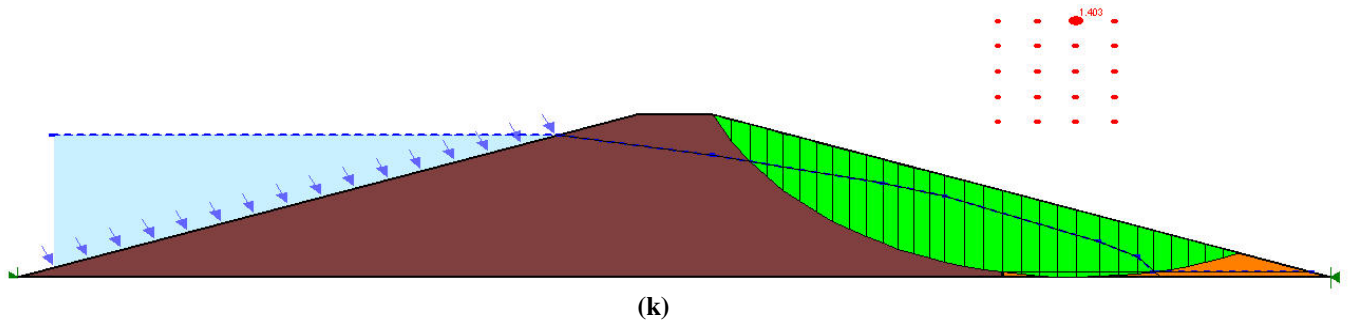
(t)

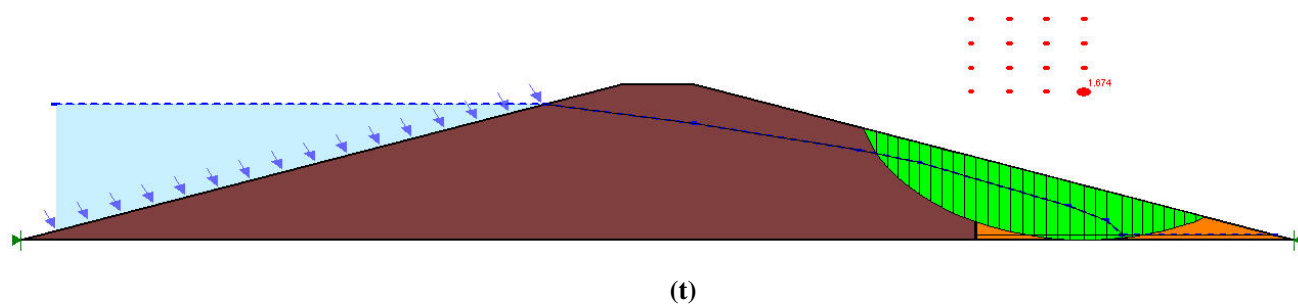
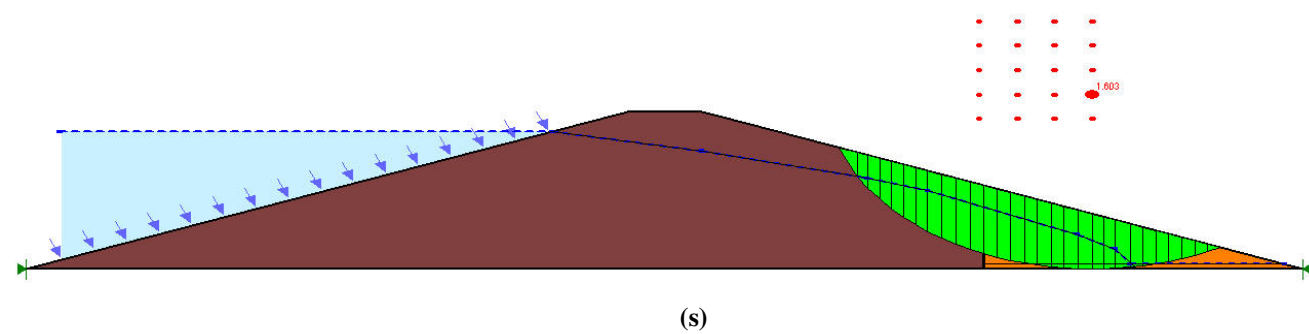
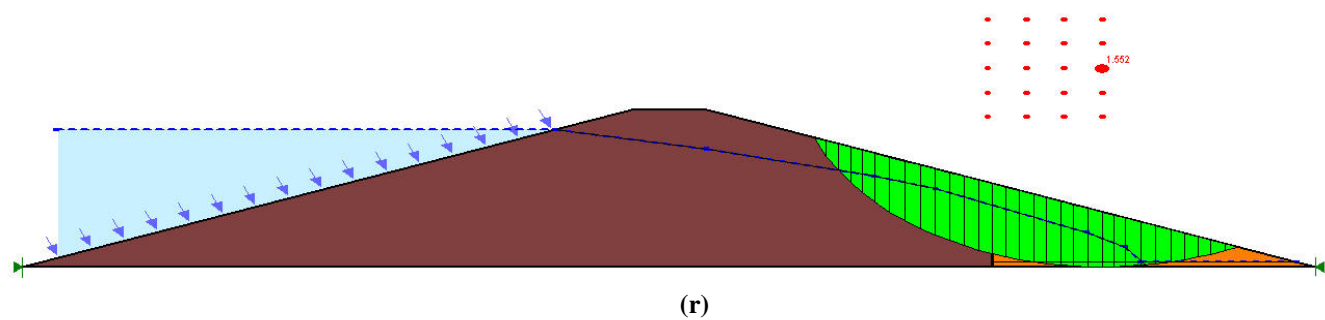
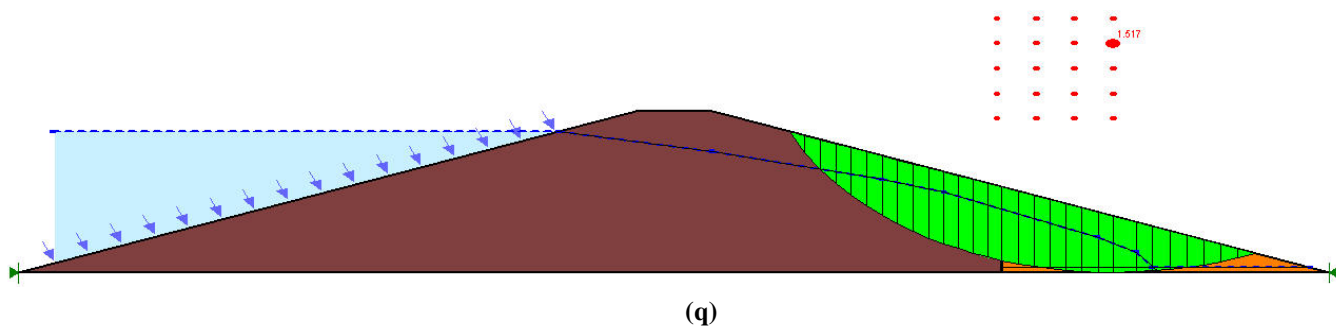
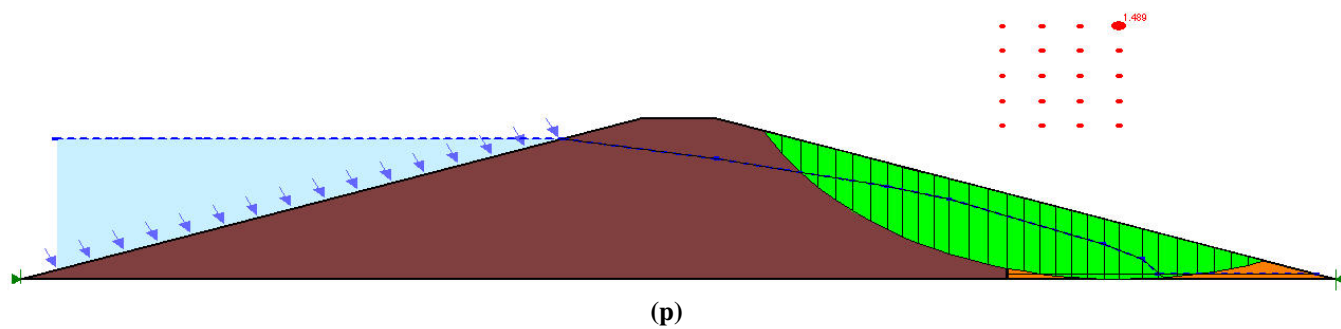
Fonte: O autor (2015).

Figura C2 – Superfícies de ruptura do talude de jusante para fase reservatório cheio obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.







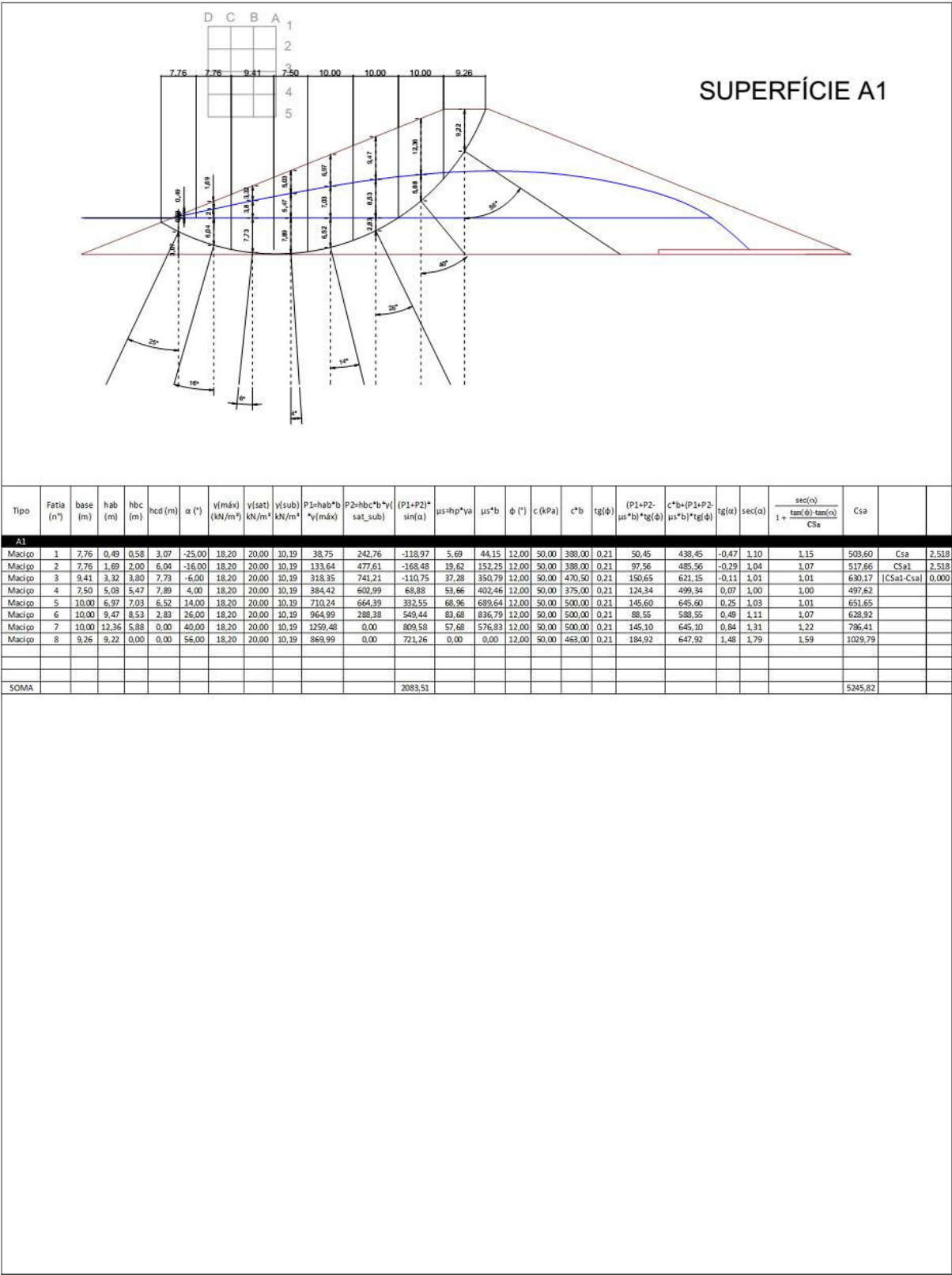


Fonte: O autor (2015).

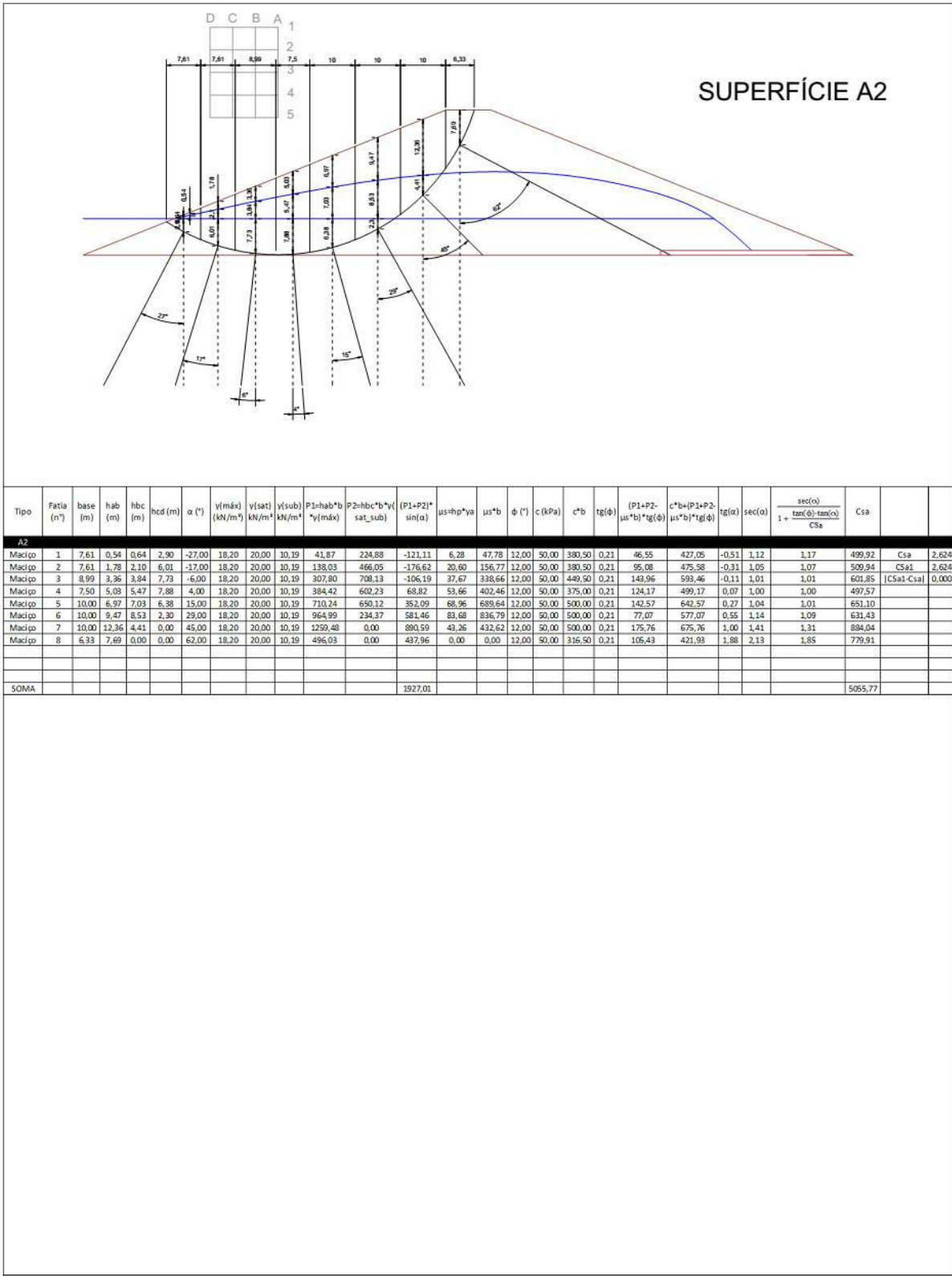
ANEXO D

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADES DO TALUDE DE MONTANTE FASE ESVAZIAMENTO RÁPIDO

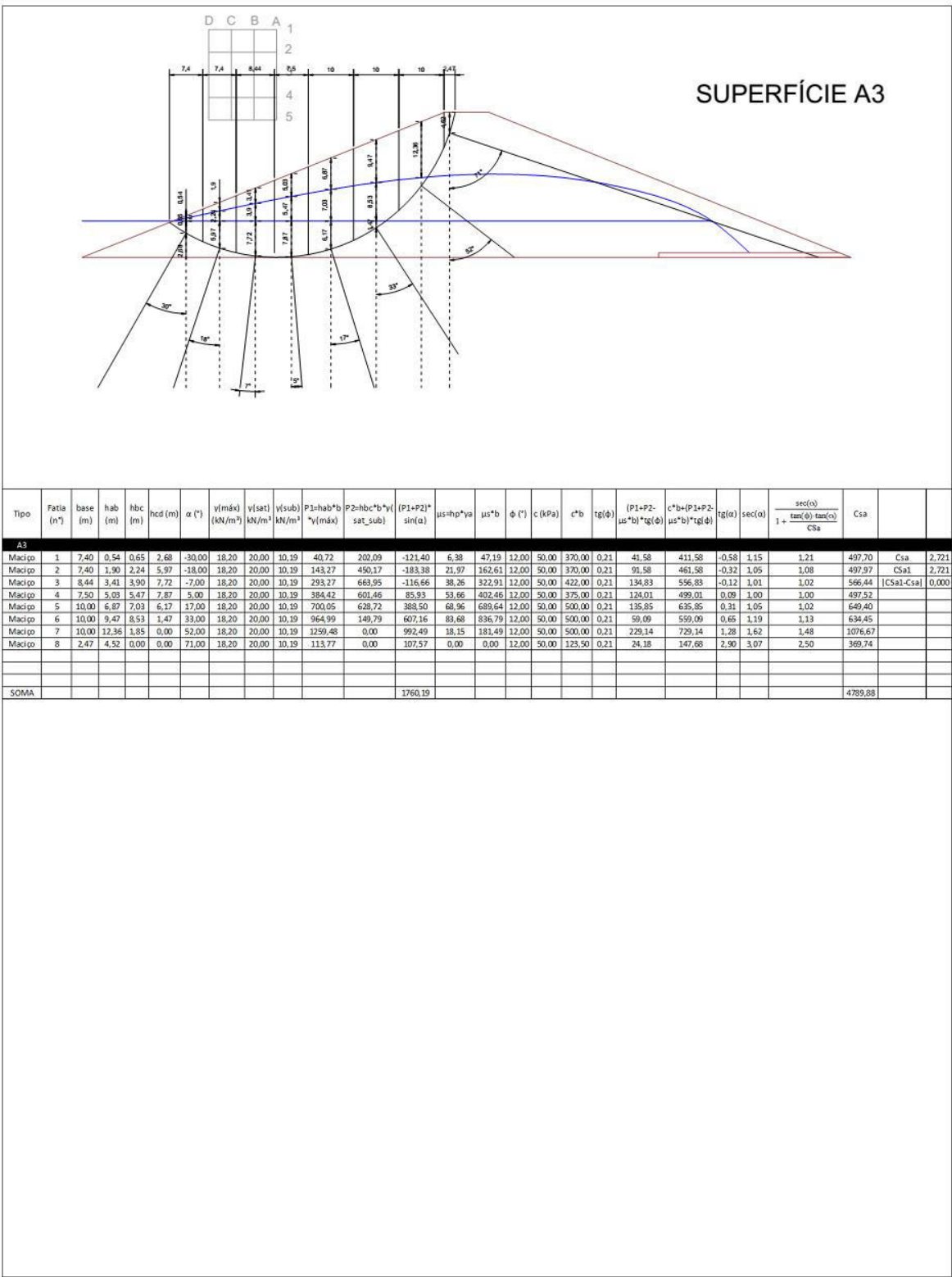
Figura D1 – Superfícies de ruptura do talude de montante para fase esvaziamento rápido obtidas pelo autor. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.

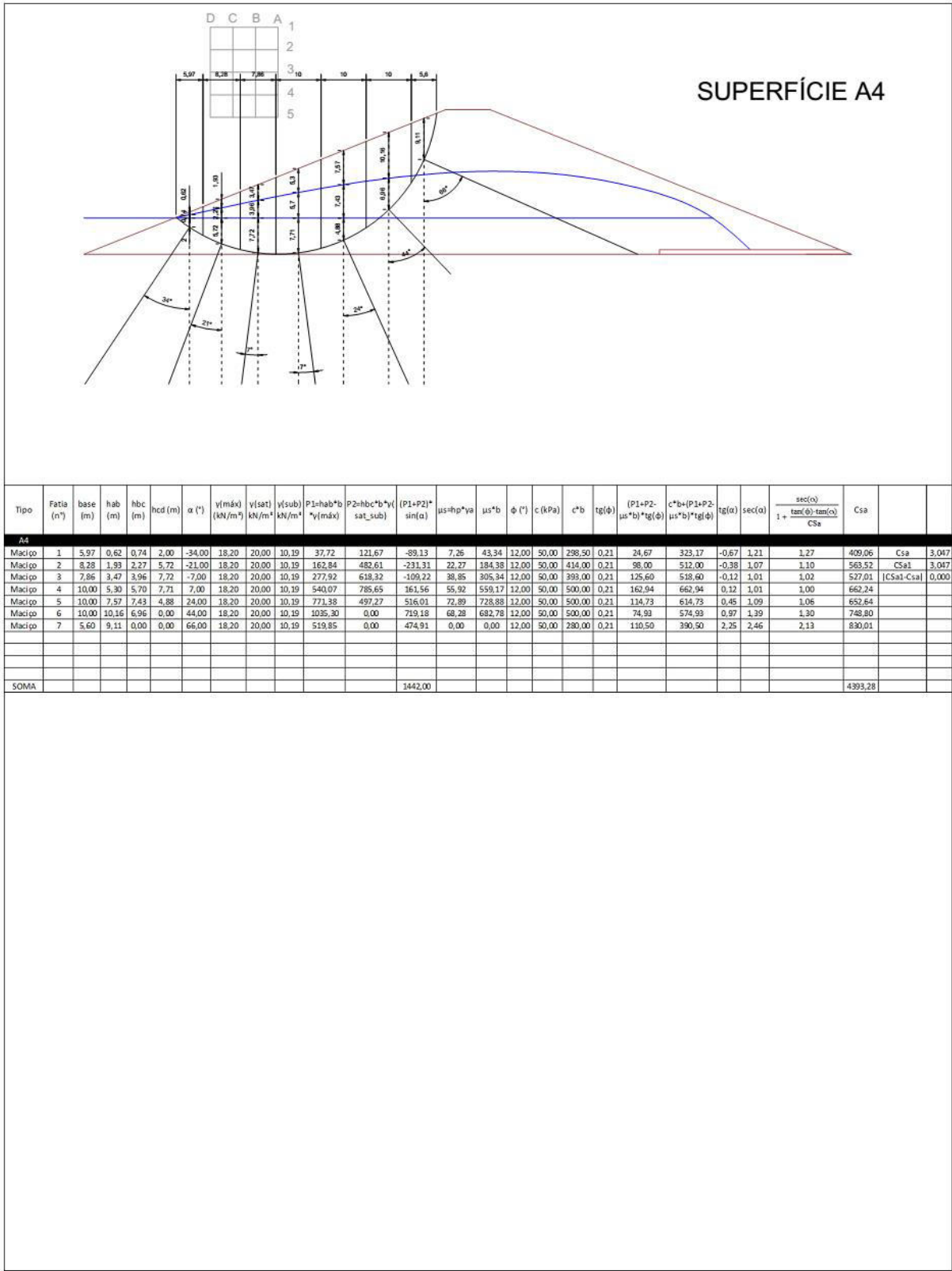


(a)

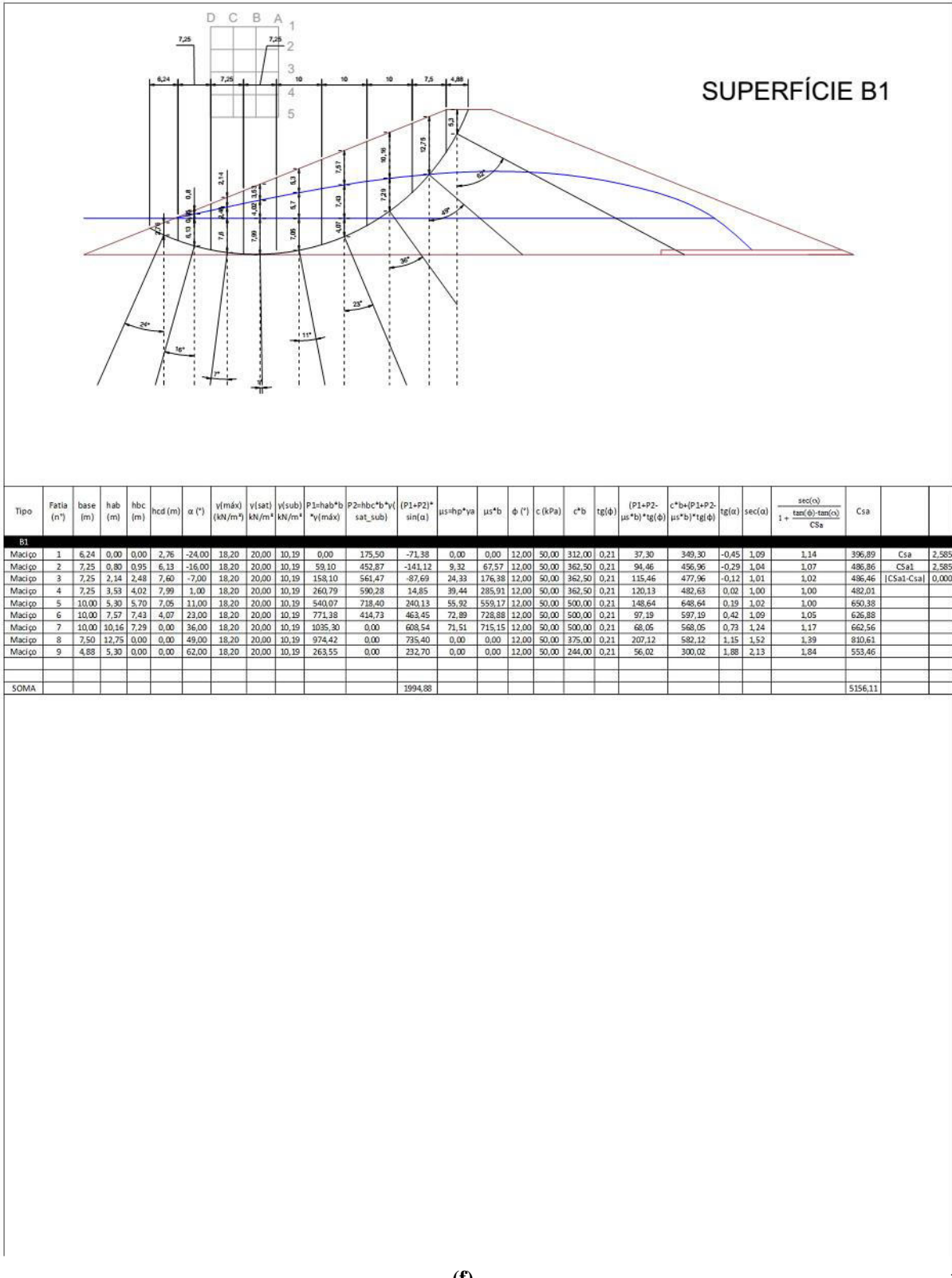


(b)

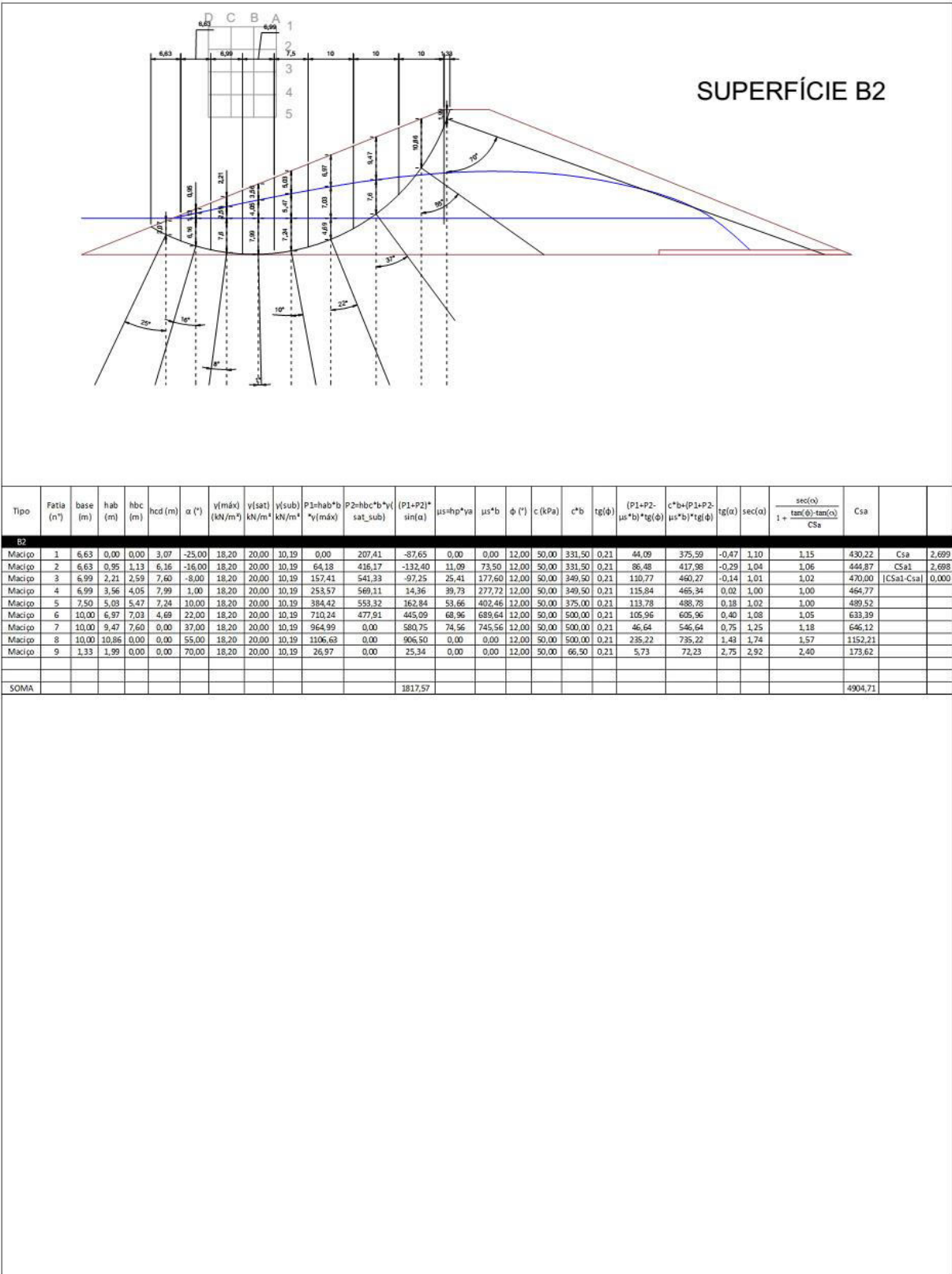




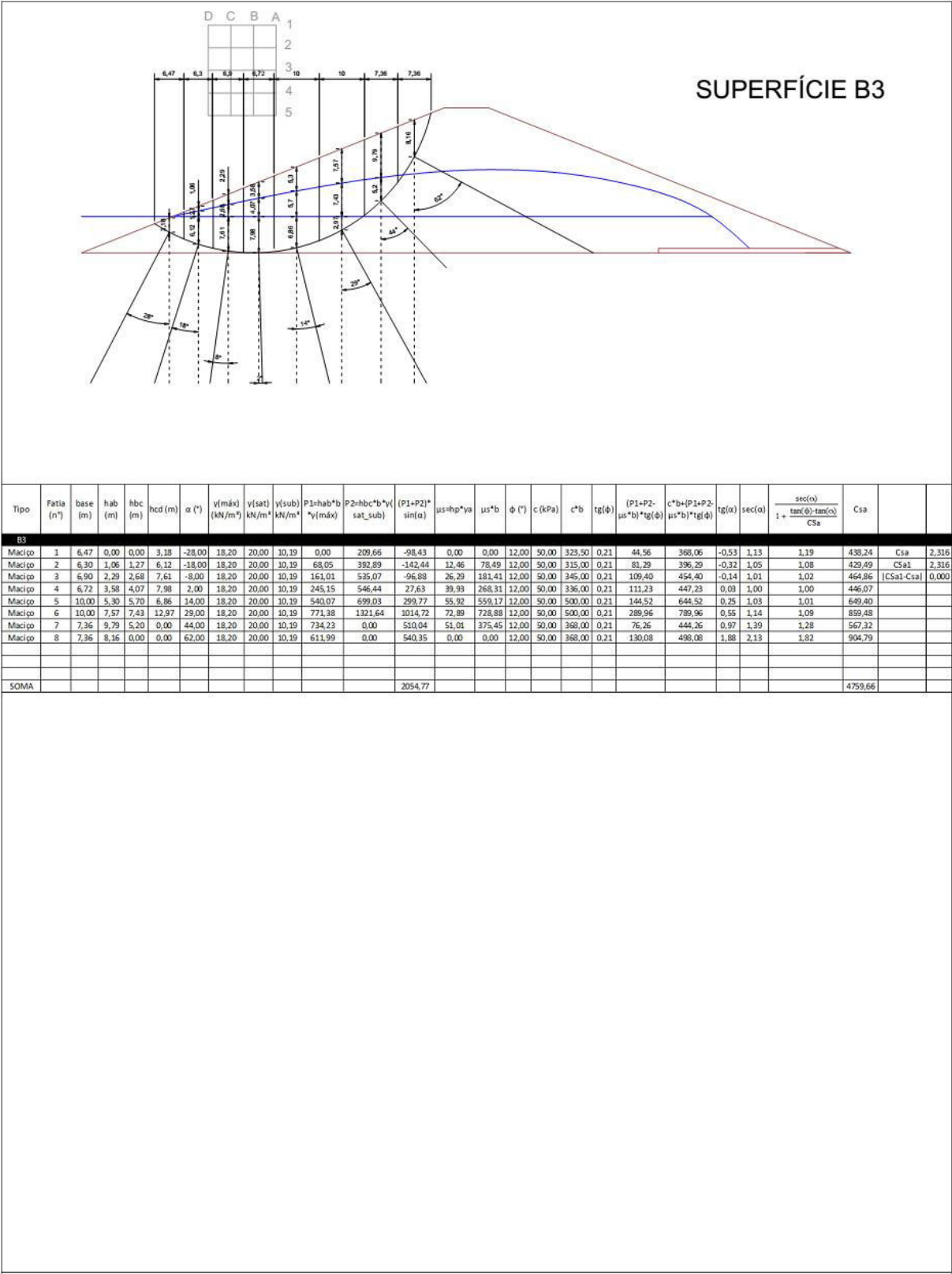
(d)



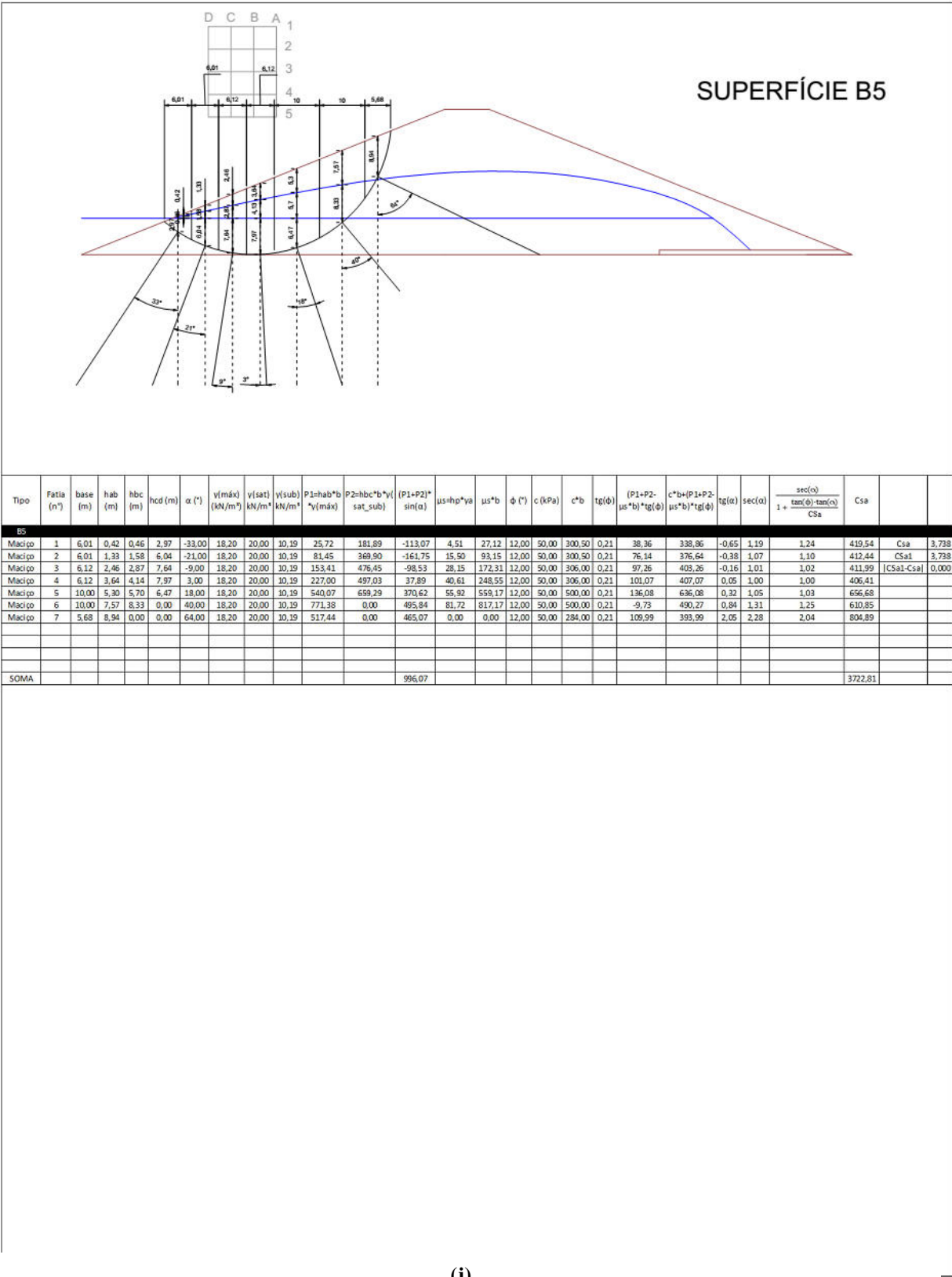
(f)

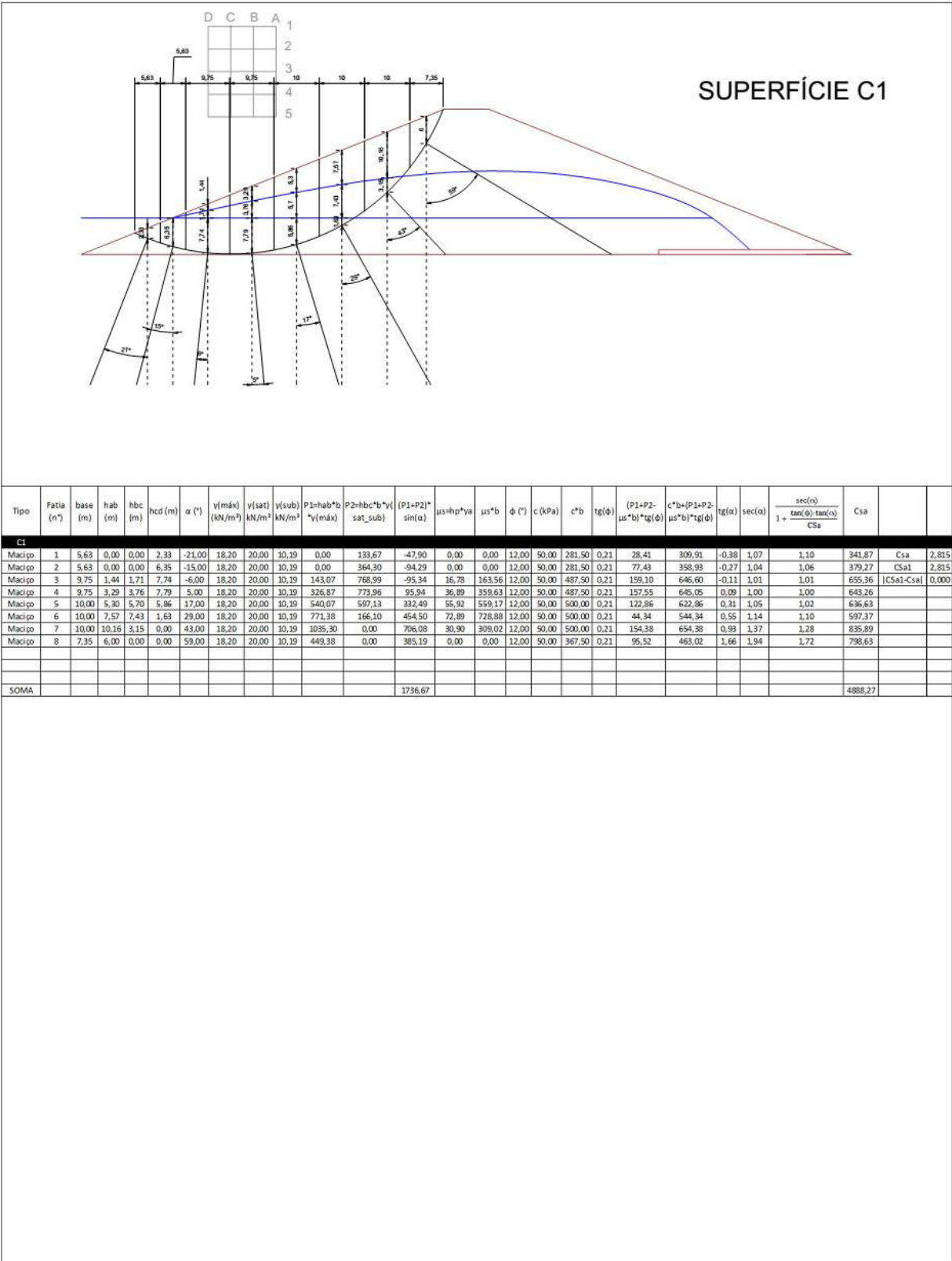


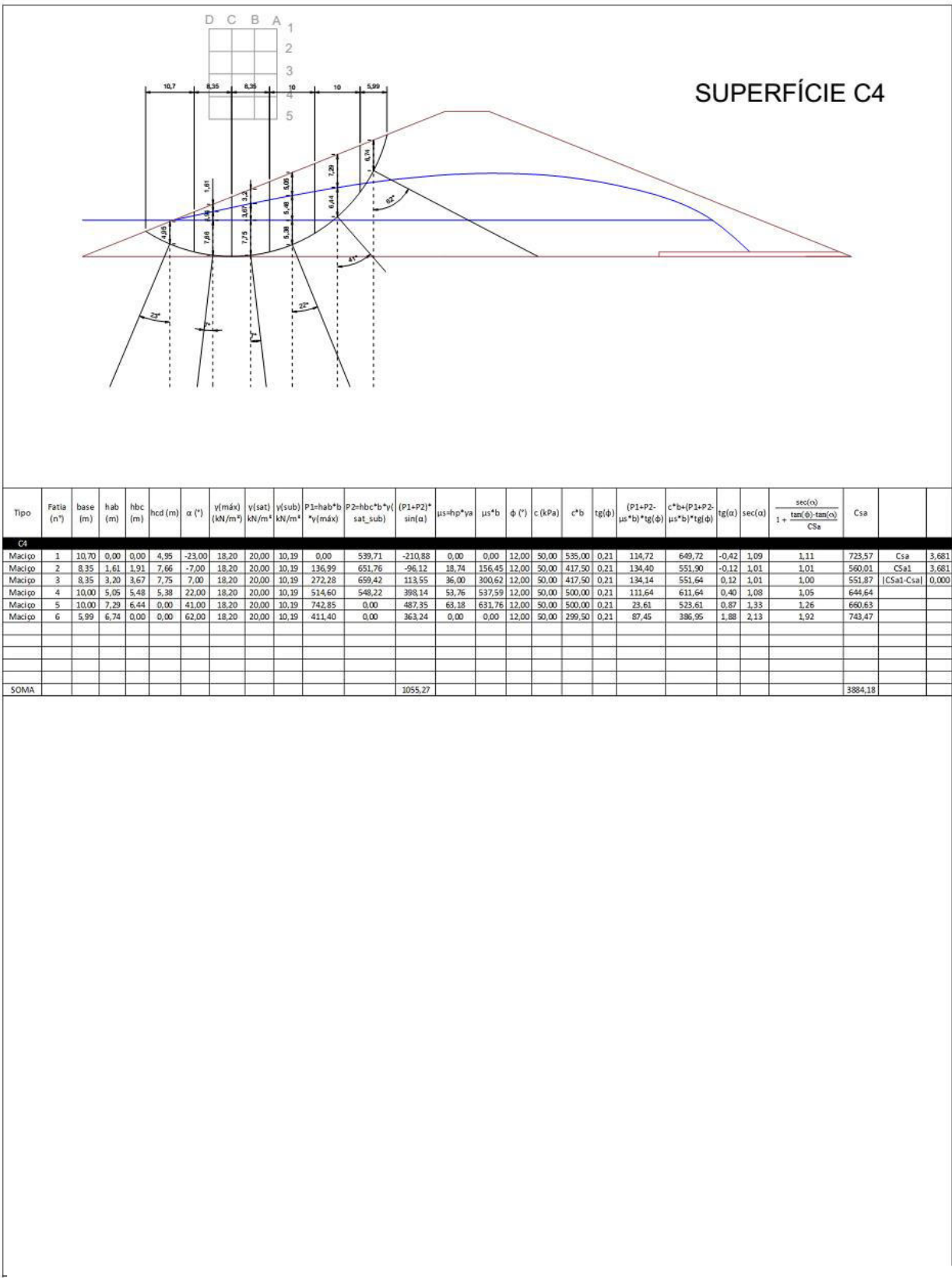
(g)

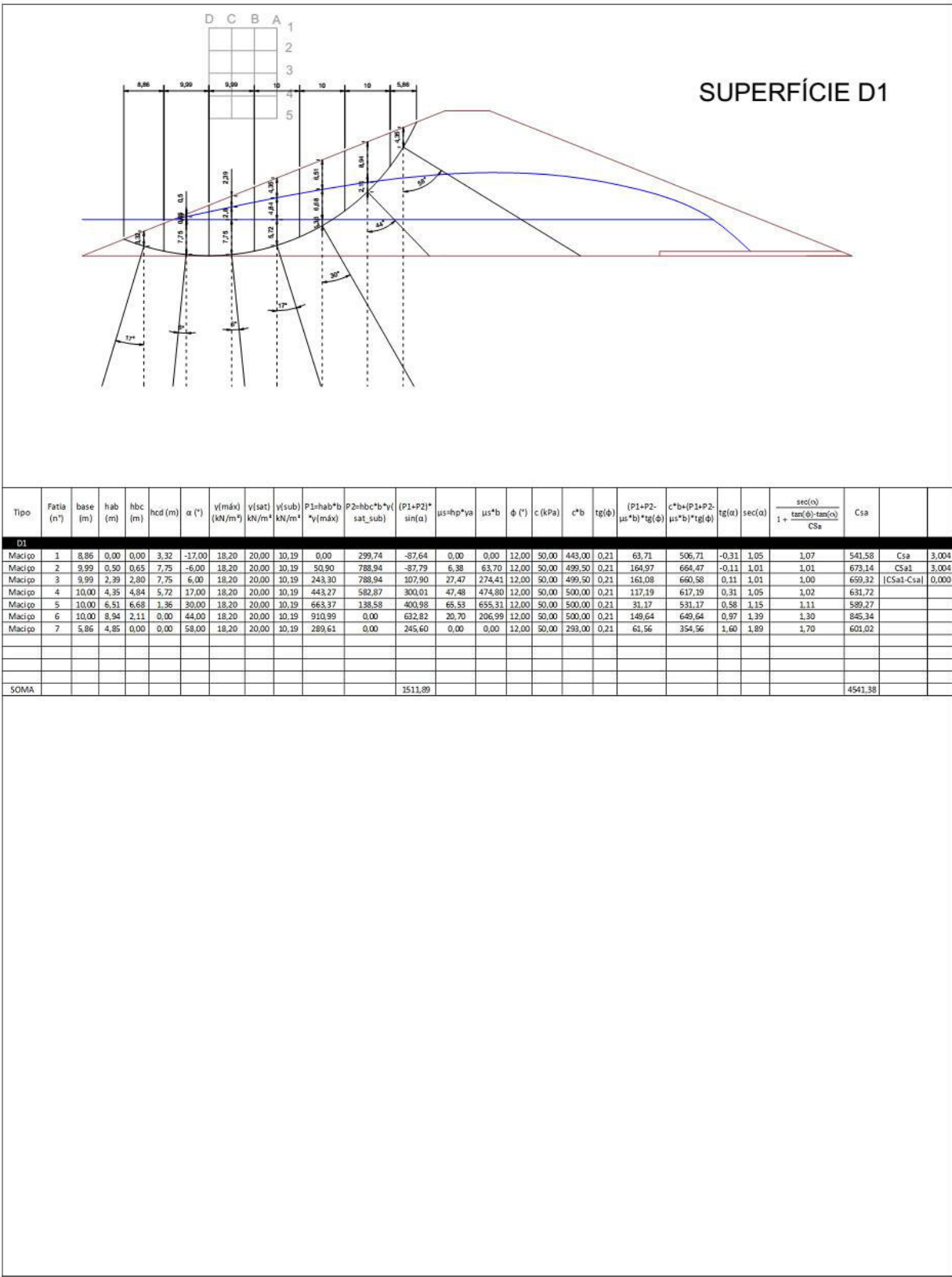


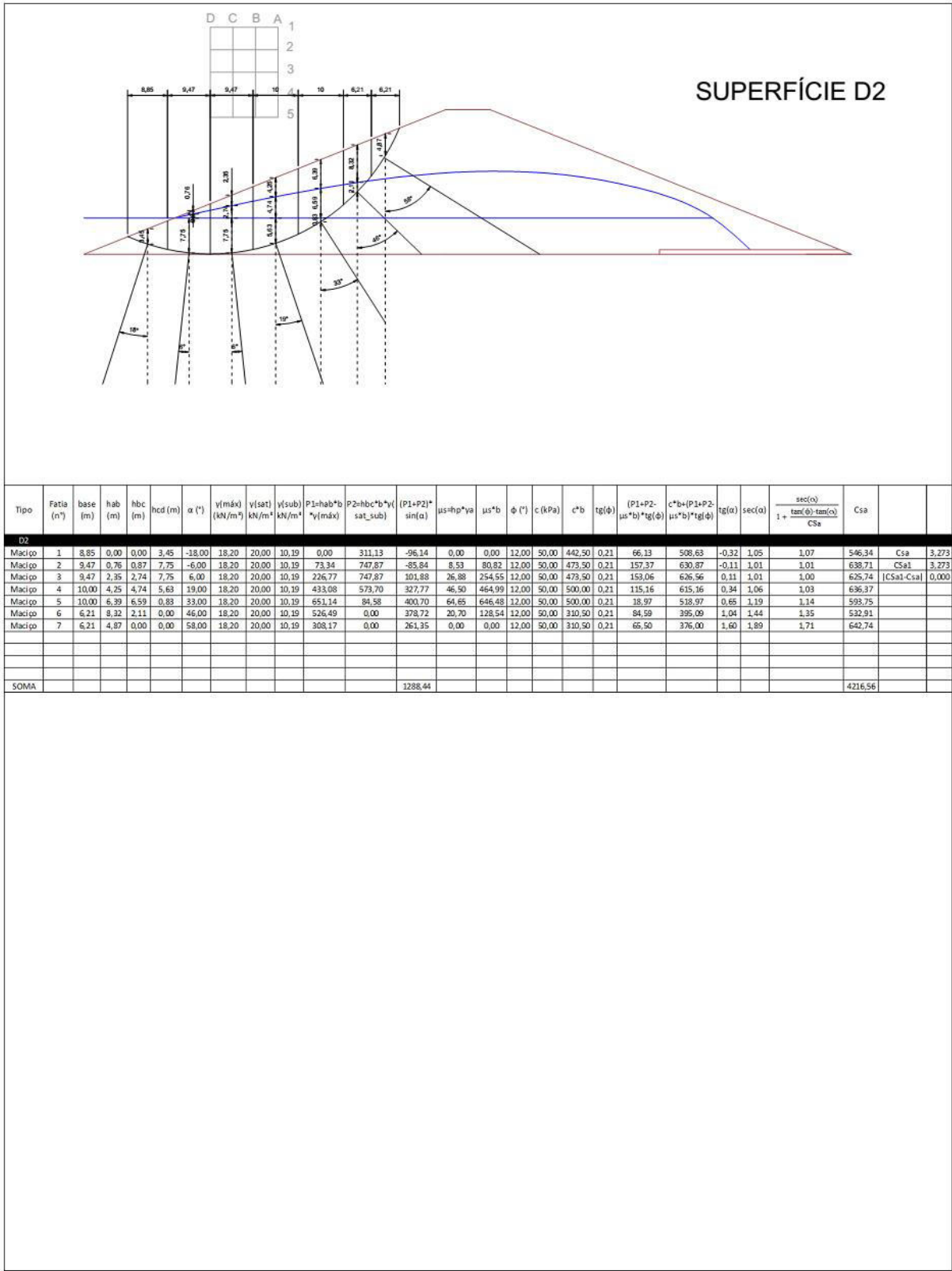
(h)

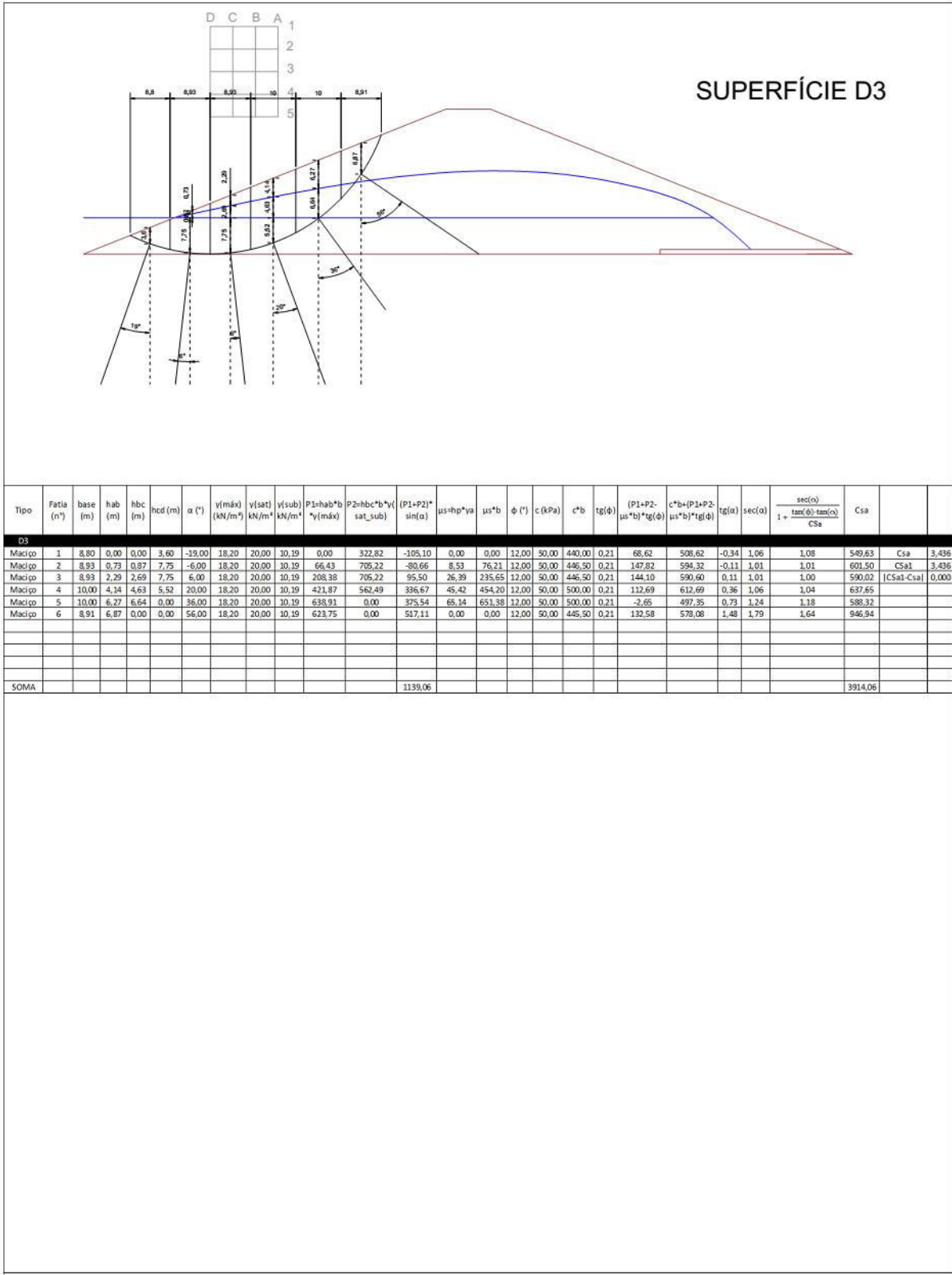






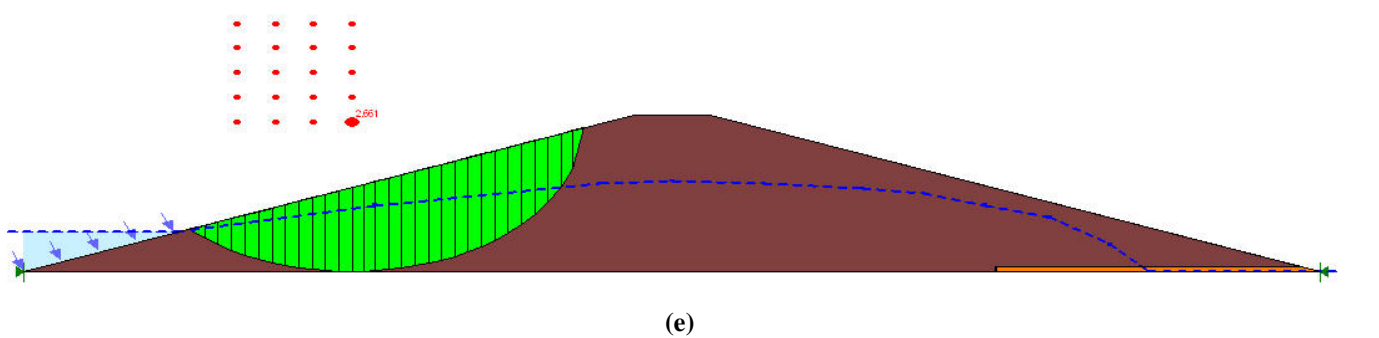
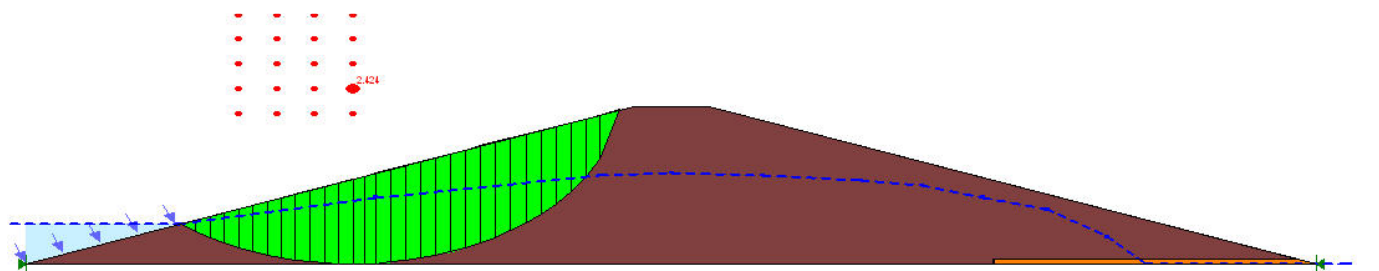
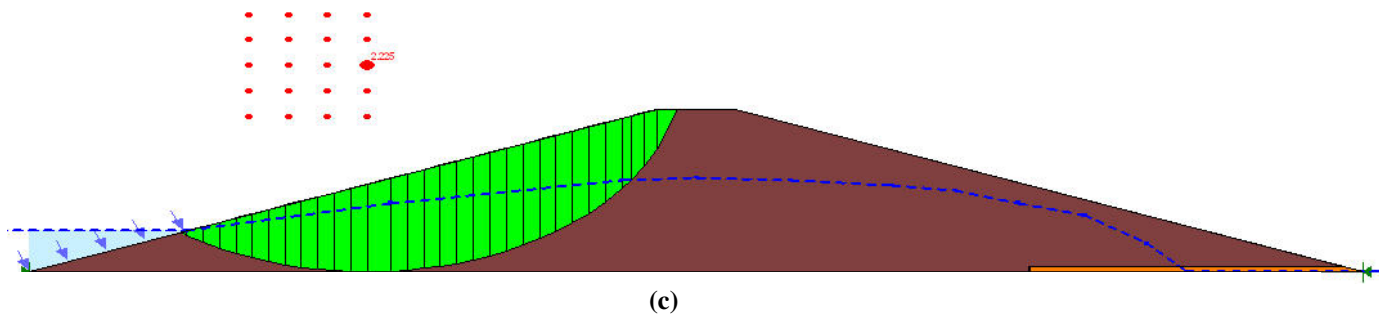
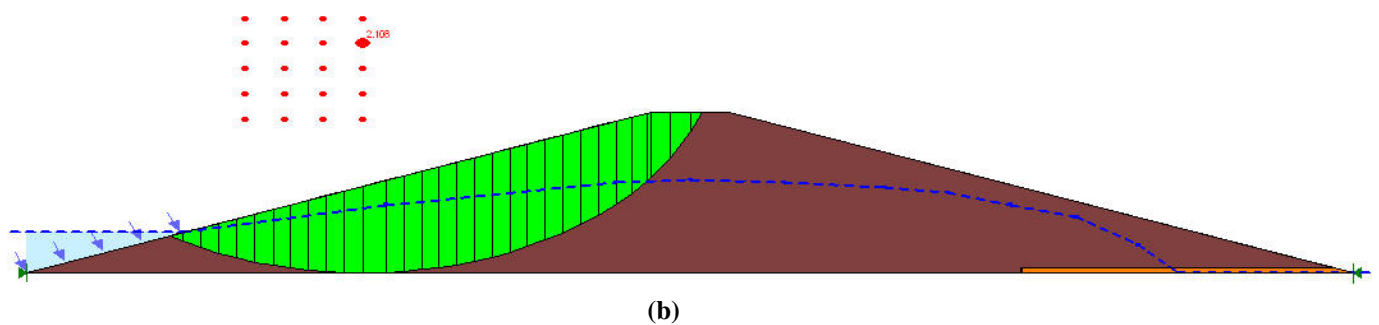
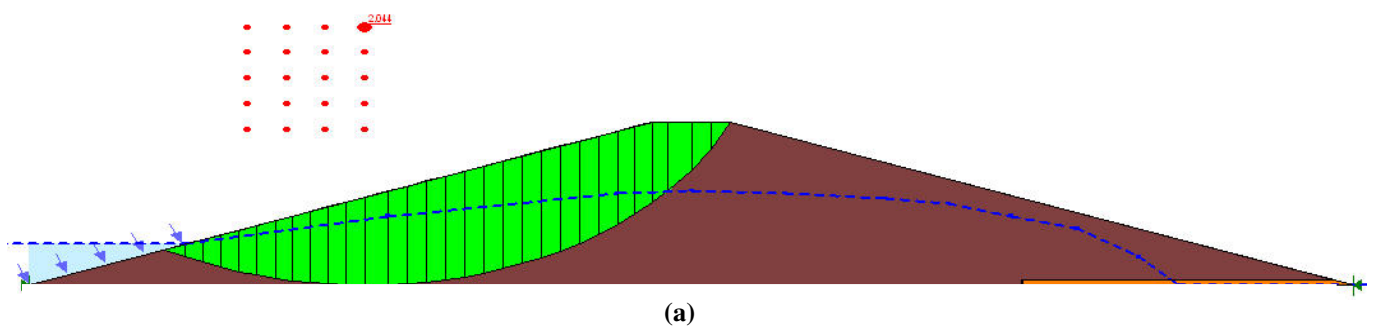


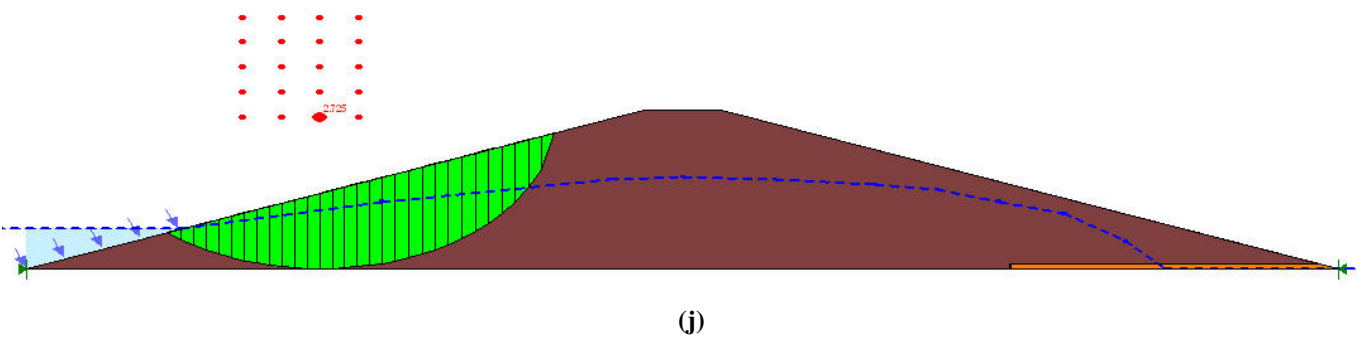
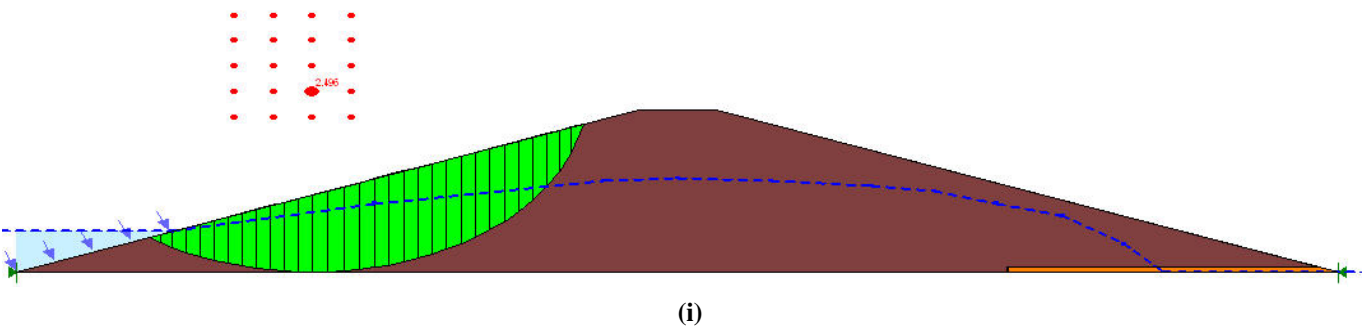
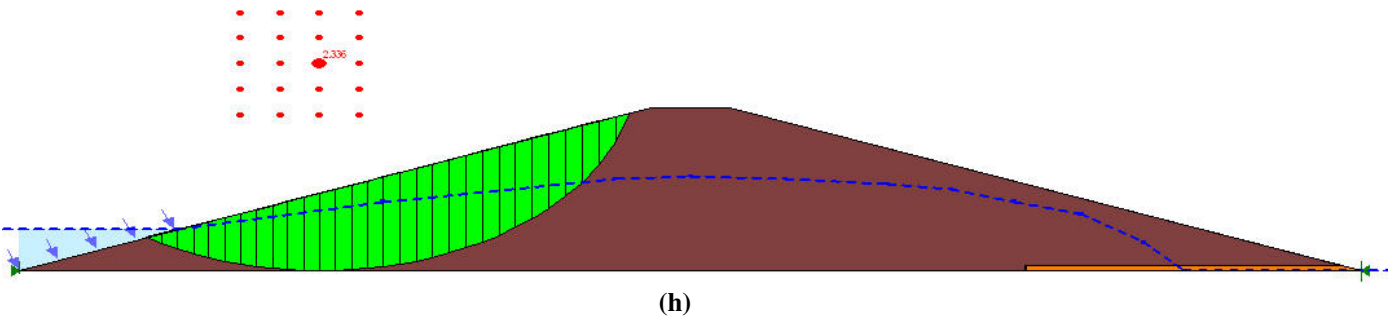
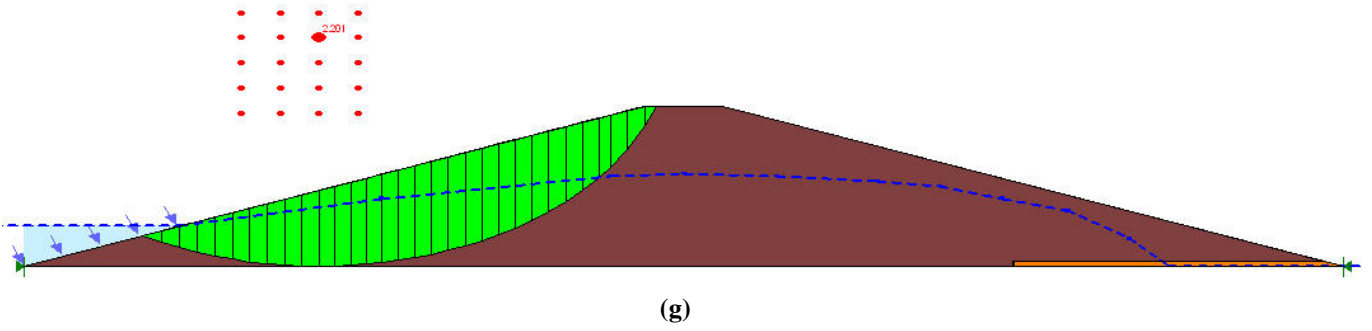
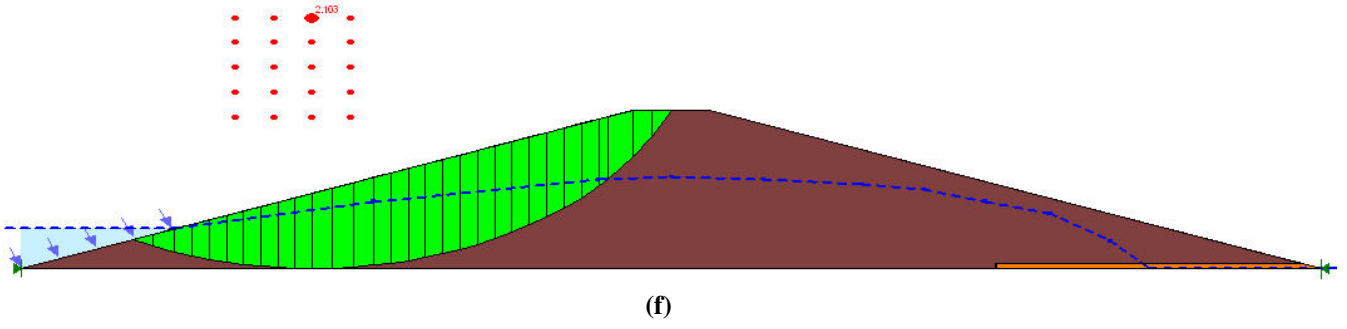


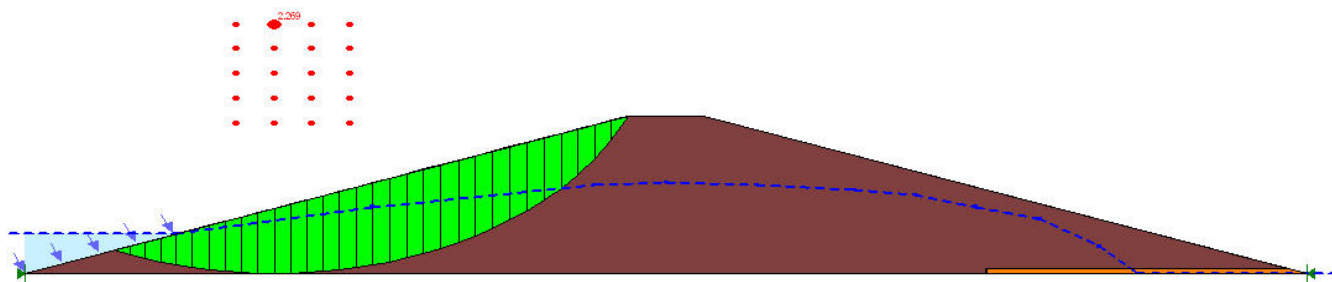


Fonte: O autor (2015).

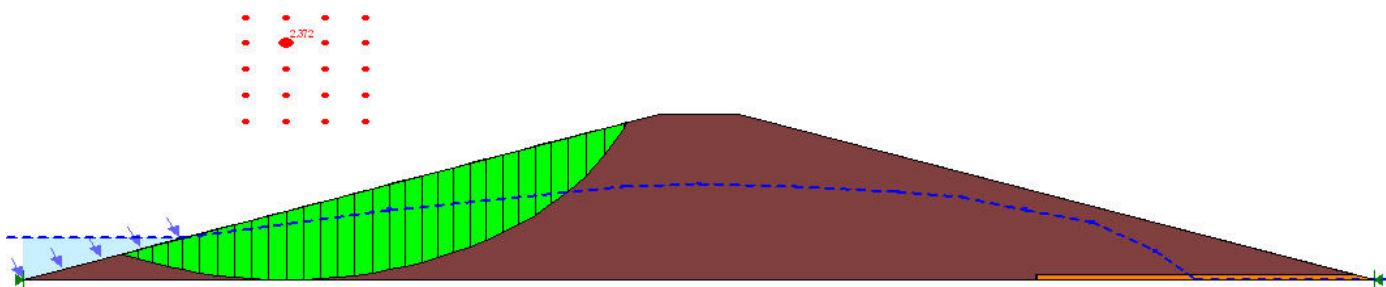
Figura D2 – Superfícies de ruptura do talude de montante para fase esvaziamento rápido obtidas pelo SLOPE/W. a) A1; b) A2; c) A3; d) A4; e) A5; f) B1; g) B2; h) B3; i) B4; j) B5; k) C1; l) C2; m) C3; n) C4; o) C5; p) D1; q) D2; r) D3; s) D4; t) D5.



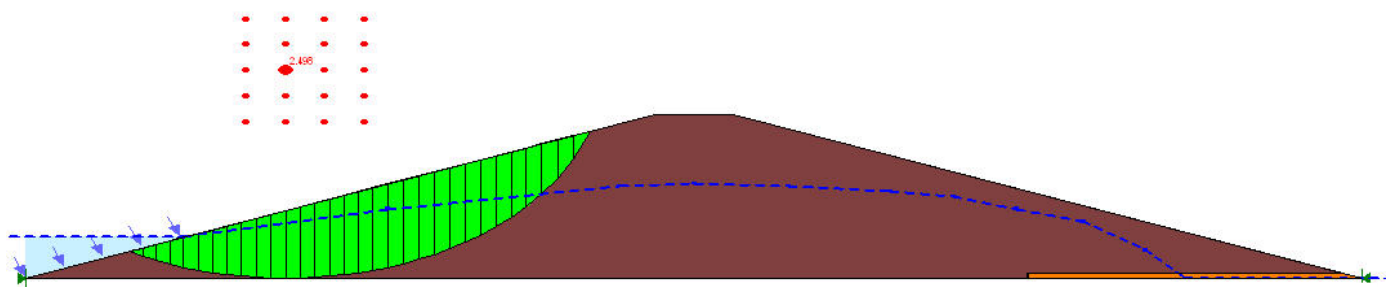




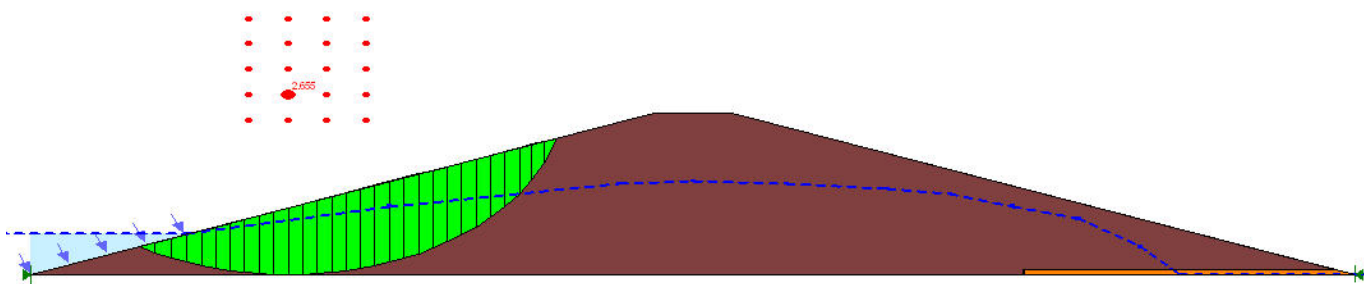
(k)



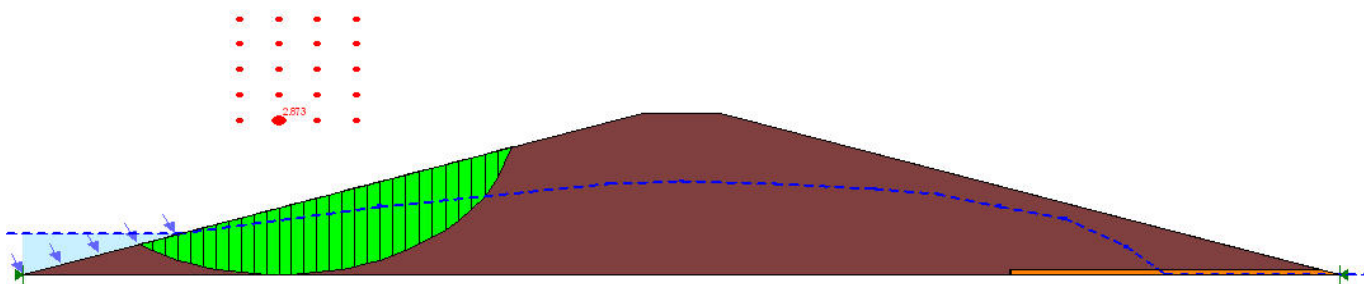
(l)



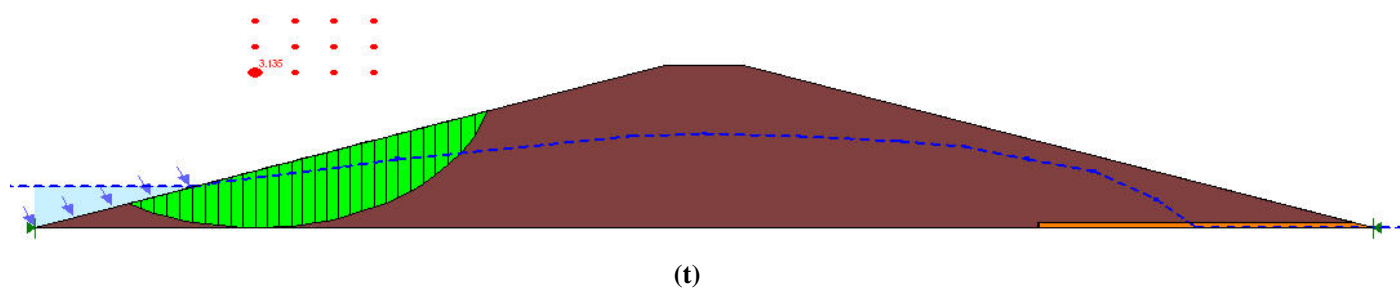
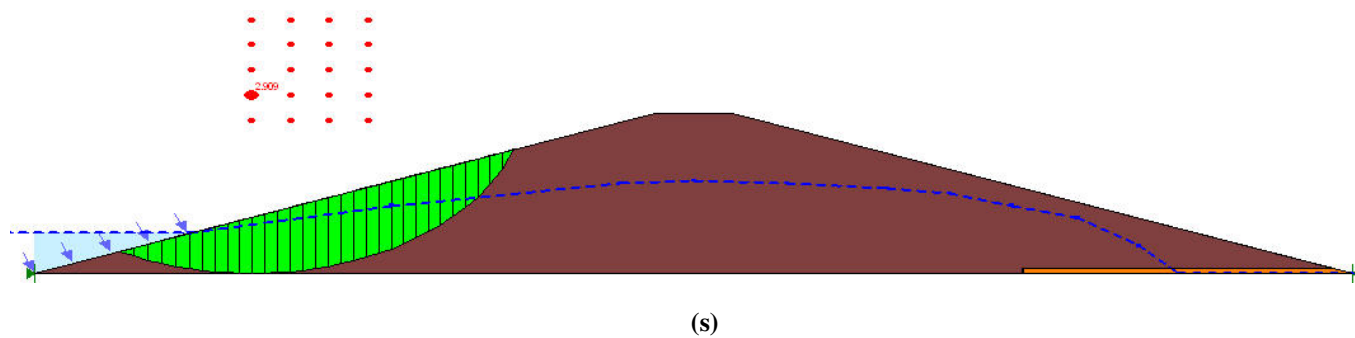
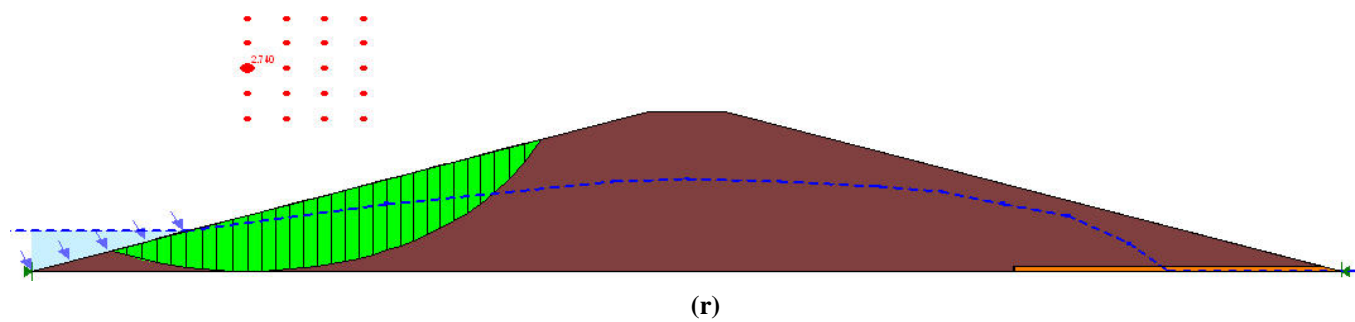
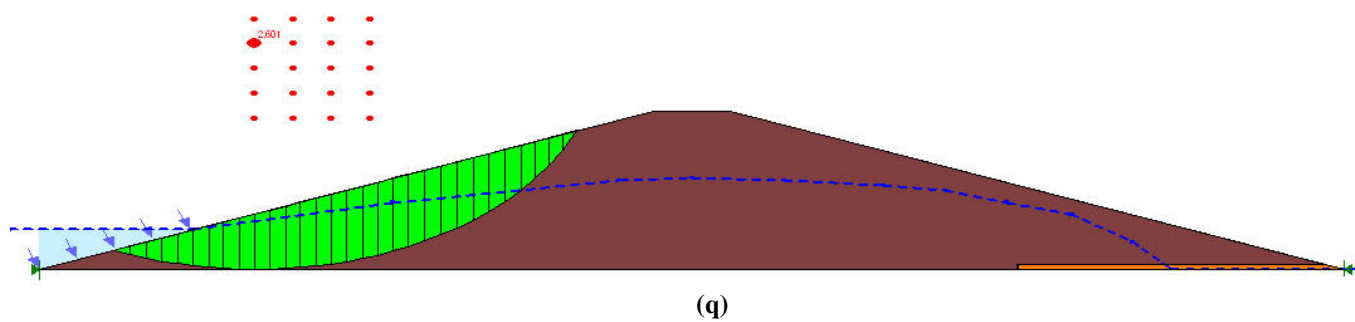
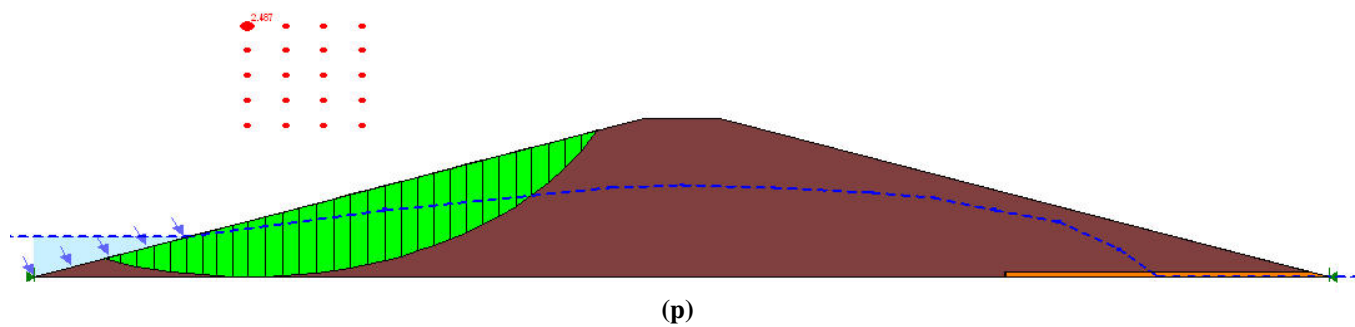
(m)



(n)



(o)



Fonte: O autor (2015).