

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE
REJEITOS PELO MÉTODO DE OLSON**

JOÃO PAULO TAVARES SOUZA

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO G.DM-388/2023

BRASÍLIA – DF, FEVEREIRO DE 2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS PELO
MÉTODO DE OLSON**

JOÃO PAULO TAVARES SOUZA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO BARBOSA, DSc (UFMG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA - DF, 08 DE FEVEREIRO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVARES, JOÃO PAULO.

Análise de Descaracterização de Barragens de Rejeitos pelo Método de Olson.

[Distrito Federal] 2023.

xv, 108 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragens de Rejeitos 2. Metodologia Construtiva

3. Método de Olson 4. Fator de Segurança

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TAVARES, J.P. (2023) Análise de Descaracterização de Barragens de Rejeitos pelo Método de Olson. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-388/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Paulo Tavares Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise de Descaracterização de Barragens de Rejeitos pelo Método de Olson

GRAU/ANO: Mestre em Geotecnia/ 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado, e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

João Paulo Tavares Souza

Rua 145,120 - Apto 2104

74170-080, Goiânia-GO, Brasil

jptavs@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valdelino e Keila, e ao meu irmão, Matheus, por serem meu porto seguro.

Ao meu orientador, Prof. André Assis, pela orientação impecável e por todo suporte, paciência e conhecimento transmitido.

Ao Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro. Espero que esse trabalho honre a sua trajetória de contribuição para a Universidade de Brasília e para a Geotecnia.

Aos demais professores, funcionários e colegas da UnB. Local onde fui acolhido com muito carinho e que contribuiu imensamente para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro em parte da pesquisa.

A todos os meus demais familiares, em especial aos meus avós: Joaquim, Maria, Luza e Valdomiro.

À Universidade Federal de Goiás, minha *alma mater*.

À Geotecnia, área da Engenharia que me fascina cotidianamente e me motiva acadêmica e profissionalmente.

A todos os meus amigos, a família que eu escolhi.

RESUMO – ANÁLISE DE DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS PELO MÉTODO DE OLSON

Após os acidentes na Barragem do Fundão e Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, a Lei N° 14.066, de 30/09/2020, decretou a necessidade de descaracterização de todas as barragens de rejeito a montante em operação no país até 25/02/2022, prazo atualmente postergado, devido as complexidades do tema. Por tratar-se de uma atividade ainda pouco estudada e com definições incipientes de processos construtivos, mapear alternativas de metodologias executivas para a realização de descaracterização de barragens de rejeitos é de suma importância. Nesse contexto, buscou-se avaliar a suscetibilidade a liquefação, utilizando o Método de Olson, de uma seção típica de barragem de rejeito alteada a montante, considerando como metodologia de descaracterização a remoção total de material da estrutura. O Método de Olson é uma técnica empírica que utiliza correlações de resultados de ensaios dos tipos SPT e CPT para análise de potencial de liquefação de solos. Esse método é dividido em três etapas: na primeira, busca-se verificar a suscetibilidade de liquefação do material, na segunda, avalia-se a possibilidade de disparo de gatilho de liquefação e, na última etapa, pretende-se obter o Fator de segurança do material liquefeito. Foi avaliado duas metodologias construtivas distintas: retirando material da barragem no sentido de jusante para montante e no sentido oposto, de montante para jusante. Os resultados indicam Fatores de segurança ligeiramente superiores nas análises considerando remoção de material de jusante para montante. As cotas mais elevadas apresentaram Fatores de segurança menores nos dois cenários, onde há grande relevância da razão de resistência do rejeito na estabilidade global da estrutura. Na medida que a escavação ocorre, os parâmetros de resistência do dique e alteamento passaram a ser preponderantes, aumentando os Fatores de segurança em todos os tipos de análise e fazendo com que os resultados das análises liquefeitas se aproximassem dos valores de cenários de pico. Verifica-se, portanto, que com o avanço da descaracterização, não há influência do rejeito na estabilidade global da estrutura. Desse modo, as análises corroboram com as práticas de campo, já que a escavação é a técnica atualmente em execução na maior parte das obras de descaracterização no país.

ABSTRACT - ANALYSIS OF THE DECHARACTERIZATION OF TAILINGS DAMS USING THE OLSON METHOD

After the accidents at Fundão Dam and Dam 1 of the Córrego do Feijão Mine, Law No. 14,066, of September 30, 2020, decreed the need to decharacterize all upstream tailings dams in operation in the country until February 25, 2022. Since this is an activity that has been poorly studied and with incipient definitions of construction processes, mapping alternative executive methodologies for the decharacterization of tailings dams is of utmost importance. In this context, the aim is to evaluate the susceptibility to liquefaction, using the Olson Method, of a typical section of a tailings dam raised upstream, considering the total removal of material from the structure as the decharacterization methodology. The Olson Method is an empirical technique that uses correlations of SPT and CPT test results to analyze the liquefaction potential of soils. This method is divided into three steps: in the first, it aims to verify the susceptibility of liquefaction of the material, then, it aims to verify the possibility of triggering liquefaction and, finally, the Safety Factor of the liquefied material. Two different construction methodologies were evaluated: removing material from the dam in the downstream to upstream direction and in the opposite direction, from upstream to downstream. The results indicate slightly higher Safety Factors in the analyses considering material removal from downstream to upstream. The higher elevations present lower Factors of Safety in both scenarios, where there is a high relevance of the tailings strength ratio in the overall stability of the structure. with most of the decharacterization works currently being executed in the country. As excavation occurs, the parameters of dam strength and raising became predominant, increasing the Safety Factors in all types of analysis and causing the results of the liquefied analyses to approach the peak scenario values. It can be seen, therefore, that with the advance of decharacterization, there is no influence of the tailings on the global stability of the structure. Thus, the analyses corroborate field practices, since excavation is the technique currently in execution in most of the decharacterization works in Brazil.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.2.	OBJETIVOS	3
1.3.	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	4
2.	BARRAGENS DE REJEITOS	6
2.1.	REJEITOS E ESTÉREIS.....	6
2.2.	BARRAGENS DE REJEITOS.....	8
2.3.	ESTUDOS DE CASOS	11
2.4.	ASPECTOS LEGAIS	18
3.	LIQUEFAÇÃO	22
3.1.	DEFINIÇÕES GERAIS	22
3.2.	SUSCETIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO.....	24
3.2.1.	CRITÉRIO HISTÓRICO	24
3.2.2.	CRITÉRIO GEOLÓGICO	26
3.2.3.	CRITÉRIO DE ESTADO CRÍTICO.....	26
3.3.	GATILHOS DE LIQUEFAÇÃO	28
3.4.	METODOLOGIA DE OLSON	29
4.	DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS	37
5.	METODOLOGIA	40
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	40
5.2.	DEFINIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO.....	42
5.3.	EXECUÇÃO DAS ANÁLISES	45
6.	RESULTADOS	48
6.1.	ANÁLISES INICIAIS	48
6.2.	ESCAVAÇÃO DE MONTANTE PARA JUSANTE	52
6.2.1.	ANÁLISES DE PICO.....	52

6.2.2.	ANÁLISES LIQUEFEITAS.....	62
6.3.	ESCAVAÇÃO DE JUSANTE PARA MONTANTE.....	73
6.3.1.	ANÁLISES DE PICO.....	73
6.3.2.	ANÁLISES LIQUEFEITAS.....	83
6.4.	COMPARATIVO.....	94
7.	CONCLUSÕES.....	103
7.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
8.	REFERÊNCIAS.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Barragem de rejeito à montante; b) Barragem de rejeito à jusante e c) barragem de rejeito por linha de centro.....	9
Figura 2 – Alternativa de alteamento a montante adotado para a Barragem de Fundão. (Morgenstern, et al., (2016)).	12
Figura 3 – Barragem de Fundão. (Morgenstern, et al., (2016)).	13
Figura 4 – Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão. Robertson, et al. (2019).	15
Figura 5 – Estado permanente de deformação para amostras não drenadas. Poulos, et al. (1985).	24
Figura 6 – Relação entre a distância do epicentro à locais em que se observou liquefação (R_e) em quilômetros e a taxa de magnitude sísmica (M_w). Ambraseys (1988).	25
Figura 7 – Trajetória tensão deformação e relação tensão de desvio e índice de vazios para areias soltas e densas sob a mesma tensão confinante. Kramer (1996).	27
Figura 8 – Comportamento drenado e não drenado de amostras inicialmente densas e fofas até a linha de estado crítico. Kramer (1996).	27
Figura 9 – Comportamento esperado para rejeitos saturados sem coesão sob carregamentos monotônicos e cíclicos. Davies (2002).	28
Figura 10 – Suscetibilidade a Liquefação para ensaio SPT. Olson (2001).	30
Figura 11 – Suscetibilidade a liquefação por ensaio de cone CPT. Olson (2001).	31
Figura 12 – Razão de resistência de pico para Ensaio SPT. Olson (2001).	34
Figura 13 – Razão de resistência de pico para Ensaio CPT. Olson (2001).	34
Figura 14 – Razão de resistência liquefeita para Ensaio SPT. Olson (2001).	35
Figura 15 – Razão de resistência liquefeita para ensaio CPT. Olson (2001).	36
Figura 16 – Seção típica utilizada nas análises subsequentes.	40
Figura 17 – Geometria utilizada para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	44
Figura 18 – Geometria utilizada para as análises liquefeitas com escavação no sentido de montante para jusante.	44
Figura 19 – Geometria utilizada para as análises de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	44
Figura 20 – Geometria utilizada para as análises liquefeitas com escavação no sentido de jusante para montante.	45

Figura 21 – Exemplo de sequenciamento de descaracterização com escavação de montante para jusante, ilustrando as seções típicas de 1 até 16.....	46
Figura 22 – Linha freática da seção típica estudada.....	48
Figura 23 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	49
Figura 24 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	49
Figura 25 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	50
Figura 26 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise liquefeita com escavação no sentido de jusante para montante.	51
Figura 27 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	52
Figura 28 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	53
Figura 29 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	53
Figura 30 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	54
Figura 31 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	55
Figura 32 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	55
Figura 33 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	56
Figura 34 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	56
Figura 35 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	57
Figura 36 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	58
Figura 37 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	59

Figura 38 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	59
Figura 39 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	60
Figura 40 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	60
Figura 41 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.	61
Figura 42 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	62
Figura 43 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	63
Figura 44 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	63
Figura 45 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	65
Figura 46 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	65
Figura 47 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	66
Figura 48 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	66
Figura 49 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	67
Figura 50 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	67
Figura 51 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	69
Figura 52 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	70
Figura 53 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	70
Figura 54 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	71

Figura 55 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	71
Figura 56 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.	72
Figura 57 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	73
Figura 58 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	74
Figura 59 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	74
Figura 60 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	75
Figura 61 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	76
Figura 62 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	76
Figura 63 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	77
Figura 64 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	77
Figura 65 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	78
Figura 66 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	79
Figura 67 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	80
Figura 68 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	80
Figura 69 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	81
Figura 70 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	81
Figura 71 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	82

Figura 72 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	84
Figura 73 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção liquefeita 18 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	84
Figura 74 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	85
Figura 75 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	86
Figura 76 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	87
Figura 77 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	87
Figura 78 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	88
Figura 79 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	88
Figura 80 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	89
Figura 81 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	91
Figura 82 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	91
Figura 83 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	92
Figura 84 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	92
Figura 85 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	93
Figura 86 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.	93
Figura 87 – Fatores de segurança ao longo da descaracterização da barragem.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de permeabilidade dos materiais.	41
Tabela 2 – Peso específico dos materiais.	41
Tabela 3 – Dados de resistência dos materiais.	42
Tabela 4 – Razões de resistência de pico e liquefeita.	42
Tabela 5 – Fatores de segurança.	95

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANCOLD	–	Australian National Committee on Large Dams
C_N	–	Fator de correção da tensão vertical efetiva
CPT	–	Cone Penetration Test, em português: Ensaio de Penetração de Cone
C_q	–	Fator de correção do nível de tensões
ER	–	Energia de queda livre
FS^{liq}	–	Fator de segurança liquefeito
FS^{pico}	–	Fator de segurança de Pico
ICOLD	–	International Commission on Large Dams
N	–	Número de golpes medidos em campo para ensaio SPT
$(N_1)_{60}$	–	Valor corrigido para ensaio SPT
P_a	–	Pressão atmosférica
PNSB	–	Programa Nacional de Segurança de Barragens
PGRBM	–	Processo de Gestão de Risco para Barragens de Mineração
qc	–	Resistência de ponta para ensaio CPT
$qc1$	–	Valor corrigido para ensaio CPT
SNISB	–	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SPT	–	Standard Penetration Test, em português: Ensaio Padronizado de Penetração
$\frac{S_u^{liq}}{\sigma'_{v0}}$	–	Razão de Resistência de Liquefeita
$\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{v0}}$	–	Razão de Resistência de Pico
τ_d	–	Tensão cisalhante

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2020), o setor mineral foi responsável por quase 64% do saldo da balança comercial brasileira, dado que explicita a importância da indústria minerária para a economia brasileira. IBRAM (2016) afirma que o aumento da demanda de insumos minerais após a Revolução Industrial acarretou num consequente incremento na produção de resíduos. A exploração de minas com menor teor mineral potencializa a geração de resíduos, criando um grande desafio para alocação e monitoramento eficiente dos descartes do processo de aproveitamento de minérios. A gestão eficiente dos subprodutos da mineração é de vital importância para a diminuição dos impactos ambientais decorrente das atividades antrópicas e garante a preservação de patrimônio humano, cultural e econômico.

Por muitos anos, a indústria minerária considerou as técnicas de deposição de rejeitos como última etapa da linha de produção e, por não serem atividade-fim, ou seja, não possuir participação direta no faturamento das empresas, não receberam atenção necessária no que concerne as atividades de monitoramento e manutenção de tais estruturas. Após as tragédias ambientais e humanas da Barragem do Fundão, em Mariana, e Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, ambas em Minas Gerais, o tema passou a representar um papel fundamental no processo produtivo da mineração nacional, acarretando em alterações substanciais em legislações e normativas, além de maior fiscalização e monitoramento das barragens de rejeitos de mineração.

Portanto, a legislação anteriormente vigente foi atualizada e uma das principais alterações imposta pela Lei Federal n. 14.066, de 30 de setembro de 2020, é a proibição de construção ou alteamento de barragens de mineração pelo método construtivo de alteamento a montante. Além disso, fica estabelecido que todas as barragens no país executadas por meio dessa metodologia construtiva devem ser descaracterizadas até 25 de fevereiro de 2022, decisão posteriormente revista. Devido as complexidades e incipiência do tema em questão, ANM (2022) define novos prazos em que estruturas com volume menor que 12 milhões de m³ tiveram prazo adiado até a data de 15 de setembro de 2022, barragens com volume entre 12 e 30 milhões de m³, terão até 15 de setembro de 2025 e barragens com volume acima de 30 milhões com prazo até 15 de setembro de 2027

Essa proibição condiciona o uso de demais técnicas de disposição de rejeitos, tais como: disposição por barragens a jusante e linha de centro, disposição subterrânea, pilhas controladas e aterros hidráulicos. Cada uma dessas alternativas apresenta vantagens e desvantagens que variam conforme aspectos geológicos, logísticos e gerenciais do complexo minerário.

Com base no cenário descrito, avaliar a estabilidade e, conseqüentemente, o potencial de risco de estruturas dessa natureza é de extrema importância. Além disso, a definição acurada das variáveis geotécnicas e mineralógicas do rejeito e estéril leva a um entendimento coerente do comportamento dos materiais e indica a possibilidade de ocorrência de alguns fenômenos, como a liquefação, que é responsável pela ruptura de diversas obras geotécnicas. Portanto, observa-se que o processo de descaracterização de barragens de rejeitos a montante, apesar de fazer parte da nova legislação governamental, possui algumas peculiaridades ainda não mapeadas pelos engenheiros geotécnicos, que vêm enfrentando dificuldades em atender as exigências normativas no prazo estipulado e com a segurança necessária.

Nesse contexto, busca-se avaliar a suscetibilidade a liquefação, utilizando o Método de Olson, de uma seção típica de barragem de rejeito alteada a montante, considerando como metodologia de descaracterização a remoção total de material da estrutura. Isso possibilitará um mapeamento e monitoramento eficiente ao longo das diversas etapas da vida útil do empreendimento, inclusive a desativação da planta, permitindo a mitigação de eventuais efeitos negativos de situações adversas e preservando patrimônio humano, ambiental e econômico.

O Método de Olson é uma técnica empírica que utiliza correlações de resultados de ensaios dos tipos SPT e CPT para análise de potencial de liquefação de solos. Esse método é dividido em três etapas: na primeira, busca-se verificar a suscetibilidade de liquefação do material; na segunda, busca-se verificar a possibilidade de disparo de gatilho de liquefação, pelo cálculo do Fator de segurança de Pico; e, por fim, verifica-se o Fator de segurança Liquefeito, que define ou não a possibilidade de ruptura do material por fluxo de liquefação.

Considerando a metodologia construtiva adotada, a execução da descaracterização pode ser realizada de duas maneiras distintas: retirando material da barragem no sentido de jusante para montante, e no sentido oposto, com escavação de montante para jusante. A definição da estratégia de escavação impacta diretamente em importantes definições para logística do complexo minerário, premissas de construtibilidade, além de poder influenciar na segurança global da estrutura, não apenas no ponto de vista de estabilidade de taludes, mas também de outros importantes parâmetros geotécnicos, tais como dissipação de poropressões e tensão-deformação.

1.2.OBJETIVOS

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar distintas logísticas de escavação para descaracterização de uma barragem de rejeito e verificar seus potenciais efeitos na estrutura. O estudo foi realizado aplicando o Método de Olson numa seção típica de uma barragem de rejeitos passível de descaracterização segundo os critérios da Lei Federal n. 14.066, de 30 de setembro de 2020. Para tal, foi utilizado o *software GeoStudio 2018 R2*, com suas ferramentas *Seep/W* e *Slope/W*, para obtenção dos Fatores de Pico e Liquefeito de ambas as metodologias de escavação: de montante para jusante e de jusante para montante.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Reproduzir a seção típica a ser estudada no programa, delimitando as regiões e aplicando os parâmetros geotécnicos dos materiais;
- Determinar os Fatores de segurança de Pico e Liquefeito e a linha freática, para os cenários de escavação de montante para jusante e de jusante para montante;
- Simular o processo de descaracterização do material retirando gradativamente as regiões de rejeito até a completa extinção da estrutura;

- Avaliar os resultados e identificar eventuais pontos críticos do processo de descaracterização, elencando possíveis alternativas que permitam aumentar a segurança da estrutura.

1.3.ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está subdividida em oito capítulos. O presente capítulo, introdutório, tem por finalidade trazer um panorama geral do cenário que motivou o presente trabalho, além da definição dos objetivos gerais e específicos a serem atingidos.

O Capítulo 2 refere-se a uma revisão bibliográfica dos conceitos pertinentes a barragens de rejeitos. Aborda a diferenciação entre os conceitos de estéril e rejeito, além de trazer as definições das metodologias usuais de alteamento de barragens de rejeito. Com esses conceitos definidos, apresenta os dois estudos de caso de ruptura por liquefação mais recentes no Brasil. Por fim, neste capítulo também são abordados os aspectos legais que permeiam o tema, bem como as principais alterações legais ocorridas após os dois acidentes.

O Capítulo 3 aborda os aspectos referentes ao processo da ruptura por fluxo liquefeito. Após conceituação geral do tema, define-se quais materiais são suscetíveis a esse tipo de processo por meio de critérios distintos, o critério histórico, geológico e de estado crítico. Por fim, define-se o método utilizado para realização das análises subsequentes, o Método de Olson.

O Capítulo 4 aborda o tema descaracterização de barragens de rejeito. O objetivo desse capítulo é trazer um panorama geral de como está ocorrendo o processo executivo de descaracterização das estruturas de barramento, definindo as melhores práticas de engenharia e determinando procedimentos a serem seguidos.

O Capítulo 5 delimita a metodologia do presente trabalho. Primeiramente é caracterizado o estudo de caso, em que é apresentada a seção típica a ser utilizada e os parâmetros geotécnicos definidos. Após, explica-se o processo para construção do modelo no *software* utilizado para as análises. Por fim, é abordado a etapa de execução

das análises realizadas e a seleção dos principais resultados para interpretação das informações obtidas.

O Capítulo 6 trata dos resultados obtidos. Após apresentação dos resultados das seções típicas iniciais, em que é definido o Fator de segurança antes da descaracterização e linha freática a ser adotada, inicia-se a abordagem dos resultados ao longo da descaracterização. Esses dados foram subdivididos em quatro grupo: análise de pico com escavação de montante para jusante; análise liquefeita com escavação de montante para jusante; análise de pico com escavação de jusante para montante e análise liquefeita com escavação de jusante para montante.

O Capítulo 7 traz as principais conclusões obtidas com o presente estudo, além de recomendações para futuros trabalhos. E, por fim, o Capítulo 8 elenca as referências bibliográficas utilizadas como base ao longo do texto.

2. BARRAGENS DE REJEITOS

2.1. REJEITOS E ESTÉREIS

Para extração de produtos com valor econômico agregado, os elementos minerais passam por um processo de beneficiamento em que a fração aproveitável é separada dos resíduos, denominado rejeitos. Esse processo regulariza o produto obtido conforme o padrão de qualidade escolhido, removendo materiais de baixa concentração mineral e sem valor comercial. Espósito (2000) afirma que esses procedimentos variam conforme o tipo e a qualidade do material extraído, citando como principais técnicas de tratamento a britagem, moagem e concentração, além de outras metodologias tais como peneiramento, lavagem, secagem e calcinação. No beneficiamento por concentração, destaca-se as técnicas de separação por densidade, separação magnética, eletrostática, ciclonação, aglomeração, flotação e pirólise. Além do rejeito, o processo de exploração do minério também possui uma outra grande fonte geradora de resíduos, os estéreis, que são materiais sólidos advindos da extração cujo teor mineral é zero ou abaixo da porcentagem de aproveitamento.

ICOLD (1996) determina que as propriedades de um rejeito dependem principalmente da fonte do material e de seu grau de compactação. Como características principais, esses resíduos apresentam alto teor de umidade, baixa permeabilidade, plasticidade e resistência ao cisalhamento e compressibilidade relativamente alta. Além disso, verifica-se tratar de um material com recorrente tendência em apresentar liquefação sob atuação de grandes tensões dinâmicas. As propriedades químicas desse material vão depender da origem mineral do material, dos reagentes residuais utilizados durante o processo de beneficiamento e da estabilização química ocorrida ao longo da deposição do rejeito.

Como trata-se de um processo industrial com geração de grandes volumes de rejeito, a disposição desses resíduos torna-se um ponto chave na cadeia produtiva mineral, principalmente tendo-se em conta que acidentes envolvendo estruturas de contenção de rejeitos apresentam danos catastróficos tanto do ponto de vista ambiental, como social, econômico e humano. Somente na última década cita-se dois grandes acidentes envolvendo barragens de rejeito no Brasil, com impactos ambientais que se perpetuam e

que ocasionaram dezenas de mortes. Os acidentes na Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, e na Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, também em Minas Gerais, suscitaram profundas mudanças na legislação e gestão envolvendo seguranças de barragem e impactaram profundamente as atividades antrópicas em comunidades com a presença da indústria da mineração. Morgenstern, *et al.* (2016), Robertson, *et al.* (2019) e CIMNE (2021) trazem estudos detalhados apontando as causas e aspectos técnicos envolvendo os acidentes citados.

É premissa básica para uma boa estrutura de contenção de resíduos estabelecer uma correta e ampla caracterização das propriedades mecânicas, hidráulicas e mineralógicas dos rejeitos e estéreis. Com base nesse pressuposto, Duarte (2008) classifica os rejeitos em duas categorias principais: rejeitos finos, com granulometria abaixo de 0,074 mm, e rejeitos granulares, com granulometria acima do valor estabelecido. As formas de disposição desses materiais são variadas, sendo as principais delas o uso de minas subterrâneas ou cavas exauridas como estrutura de contenção, a formação de pilhas ou empilhamento a seco, disposição em pasta e, por fim, barragens de rejeito, que podem ser executadas pelas metodologias a montante, a jusante e em linha de centro. A definição da técnica a ser empregada difere conforme as características do empreendimento minerário, das condições geotécnicas, geológicas e hidrológicas da região, das propriedades dos materiais, do processo de beneficiamento, que definirá uma característica determinante para o comportamento do material, o teor de umidade, e também do impacto ambiental e antrópico causado na região circunvizinha.

IBRAM (2016) afirma que, dentre os métodos citados, o uso de barragens de rejeitos ainda é o mais empregado em território nacional. Devido ao grande volume de material disponível e considerando fatores de custos, geralmente utiliza-se o próprio rejeito como material de construção da barragem, o que oferece segurança desde que alguns critérios sejam respeitados.

ANCOLD (2012) estabelece que o projeto desse tipo de estrutura carece de ensaios com amostras representativas capazes de fornecer características físicas das frações de lama e granulares dos rejeitos, bem como a caracterização do processo de segregação das partículas, propriedades do solo, como a densidade do material adensado, densidade seca, peso específico, ângulo de atrito, coesão e permeabilidade características;

além de análise química do processo de beneficiamento; teor residual no rejeito e, por fim, os aspectos mineralógicos e geoquímicos dos sólidos. A limitação desses parâmetros geotécnicos acaba impactando no dimensionamento dessas estruturas podendo inclusive comprometer a segurança delas.

Apesar disso, os aterros hidráulicos apresentam algumas características gerais que indicam comportamentos padrões dessas estruturas e precisam ser considerados durante a fase de projeto e operação. Uma das principais é a presença de segregação, um fenômeno definido pela tendência da fração sólida num meio multifásico de se sedimentar, criando um gradiente de concentração no volume contido. Ribeiro (2000), afirma que o processo de segregação de uma lama vai depender do tipo de fluido, das características dos aditivos químicos presentes, da distribuição granulométrica do material e das condições de fluxo. Essa característica dos rejeitos define a grande variabilidade estrutural do material ao longo das barragens, pois a segregação determinará quais partículas serão depositadas em cada local da estrutura, variando assim parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade em diferentes pontos da barragem.

2.2.BARRAGENS DE REJEITOS

Além dos itens citados, um fator de extrema influência no comportamento mecânico e hidráulico de uma barragem de rejeitos é a metodologia construtiva empregada. Usualmente, utiliza-se os métodos de montante, jusante e linha de centro como principais alternativas de execução dos barramentos. A Figura 1 traz um esquemático representativo das três técnicas utilizadas para alteamento.

No método da linha de montante, cujo construção e alteamento foi proibido em território nacional, além da determinação de descaracterização das estruturas existentes, o eixo da barragem se desloca para montante, o que faz com que parte dos rejeitos depositados na barragem sirvam de apoio para o alteamento executado, contribuindo ativamente para desempenho estrutural da barragem. Nesse sistema, os rejeitos usualmente são lançados a partir da crista do dique, por meio do uso de *spigots*, o que acarreta na formação de uma praia em que há uma presença maior de materiais com alta permeabilidade próxima a descarga de rejeitos e de menor granulometria (lama) fluindo para a região do lago de decantação.

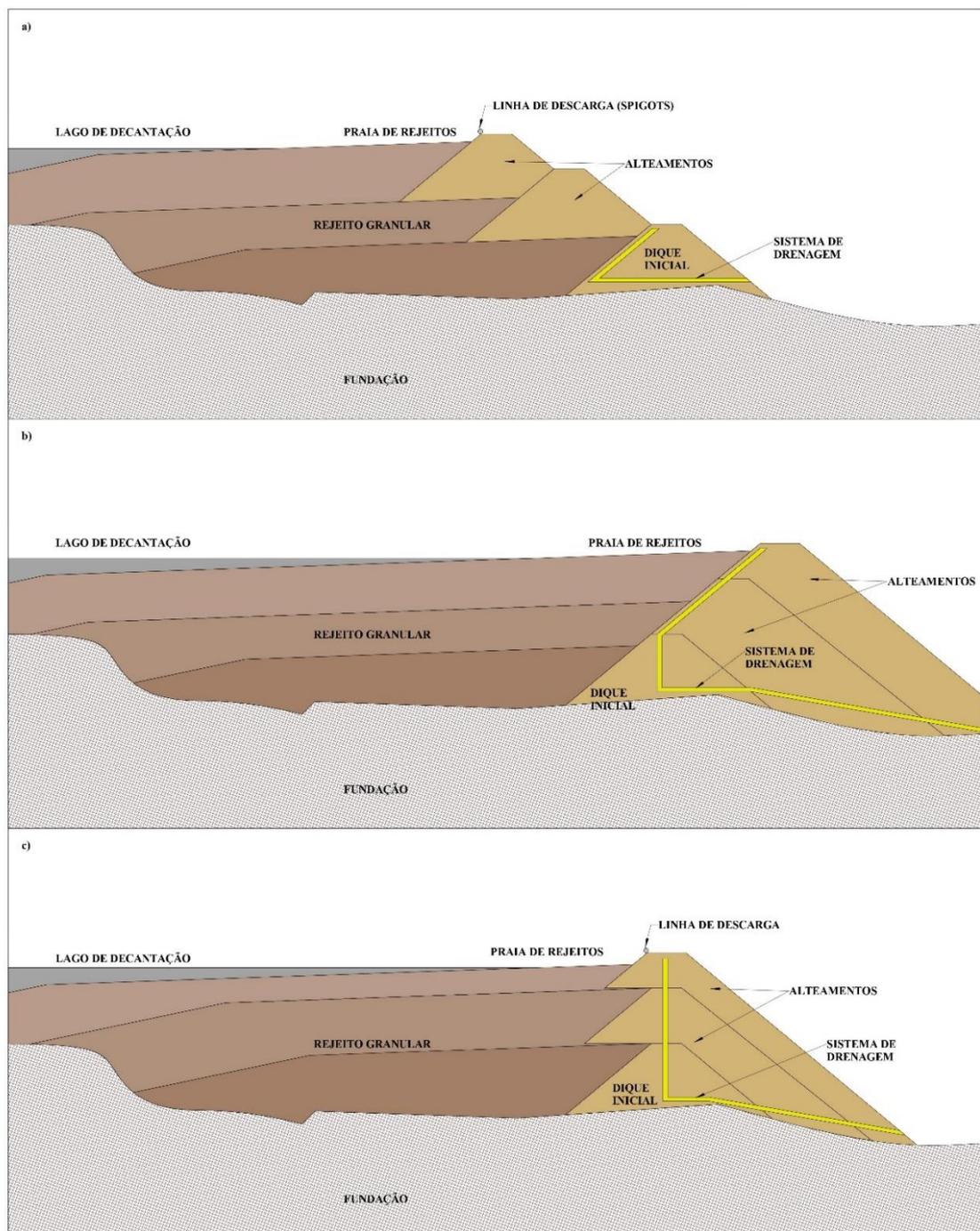


Figura 1 – a) Barragem de rejeito à montante; b) Barragem de rejeito à jusante e c) barragem de rejeito por linha de centro.

Esse método é amplamente utilizado pois apresenta um custo de construção menor em relação aos demais, graças a uma otimização do tempo de execução dos alteamentos devido ao uso de menos equipamentos para terraplanagem e volume de material

geotécnico para construção menor. Entretanto, Vick (1990) afirma que esse método construtivo, pelo processo de adensamento das camadas mais inferiores de rejeito, além de outros fatores como permeabilidade da fundação, permeabilidade lateral das camadas de rejeito e localização do lago de decantação, tende a apresentar linha freática mais próxima ao talude da estrutura, o que acarreta em um menor fator de segurança.

Geralmente, a superfície crítica de tais materiais passa pelos rejeitos sedimentados que não apresentam a devida resistência necessária, o que ocasiona na possibilidade do surgimento de *piping*, fenômeno responsável pelo rompimento de uma significativa porcentagem de barragens de rejeito nos últimos anos. Com o cenário exposto, gatilhos como sismos naturais ou vibrações convencionais causadas pela operação do complexo minerário podem culminar em um processo de liquefação, levando a estrutura à ruína.

Já no método de alteamento da linha de jusante, o eixo da barragem se desloca no sentido a jusante durante os processos de alteamento, a partir de um dique inicial, geralmente executado em material argiloso compactado, que, portanto, apresenta baixa permeabilidade. Chuquimuni (2005) indica que se trata de um método mais conservador, desenvolvido de modo a diminuir riscos de liquefação e muito utilizado em regiões com intensas atividades sísmicas. Nesse método, o dique inicial possui sistema de drenagem interna que, ao contrário do observado no alteamento a montante, costuma ter suas características drenantes mais ou menos preservadas com o passar do tempo. Após, os sucessivos alteamentos realizados costumam serem executados em rejeitos de granulometria maior, com conexão do sistema drenante inicial nos sucessivos incrementos do barramento.

Esse método, justamente por permitir maior previsibilidade e controle do sistema de drenagem, possibilita a execução de estruturas mais altas e com maiores fatores de segurança, porém seu uso muitas vezes era descartado por apresentar um custo maior, já que requer grande volume de material a ser movimentado e compactado, necessitando de mais tempo de obra e conseqüentemente onerando o processo do beneficiamento do minério.

Por fim, o último método de alteamento apresentado na imagem trata do método de alteamento por linha de centro, que consiste em uma estrutura intermediária entre os

sistemas a montante e a jusante. Estruturalmente, essa solução apresenta resultados mais aproximados aos obtidos com o método de jusante, apresentando fatores de segurança satisfatórios. Já quanto aos custos associados a construção e operação da barragem, o uso de menos material geotécnico e conseqüente menor movimentação e compactação de solo em relação ao método de jusante acarretam em valores intermediários entre as duas soluções de projeto previamente discutidas.

Nessa metodologia, um dique de partida inicial é executado e os rejeitos são lançados linearmente numa dada cota do talude de montante, formando uma praia. A partir disso, os alteamentos são realizados de modo a garantir que os eixos das camadas subsequentes sejam alocados na mesma coordenada, coincidindo com o dique de partida. Esse método apresenta uma facilidade construtiva e custos intermediários sem prejudicar significativamente o fator de segurança da estrutura. O controle da linha freática é possibilitado, porém há maior passibilidade de escorregamentos no talude de montante, além de não permitir o tratamento da superfície de jusante.

Outro fator preponderante é que, segundo Soares (2010), esse método não é recomendado para armazenamento permanente de água, o que é característica de grande parte dos rejeitos usualmente verificados nas minas em operação no país. Isso se deve pois caso as partes superiores do talude percam o confinamento, poderão aparecer fissuras que podem evoluir para erosões e aumentar a poropressão no interior do maciço.

2.3. ESTUDOS DE CASOS

Como citado, dois exemplos de insucessos extremamente relevantes no cenário brasileiro geraram profundas mudanças na legislação de segurança de barragens brasileira e suscitaram discussões quanto a gestão de resíduos na indústria da mineração. Estima-se que a ruptura da Barragem do Fundão tenha liberado cerca de 32 milhões de m³ de rejeito e a Barragem I da Mina Córrego do Feijão cerca de 9,7 milhões de m³ de material. A falha dessas estruturas gerou um imenso prejuízo social, ambiental e econômico, que ainda impacta diretamente a região de seus complexos minerários.

Segundo Morgenstern, *et al.* (2016), painel montado para investigar a ruptura da Barragem de Fundão, a operação de beneficiamento de minério no Complexo de Germano

produzia dois tipos distintos de rejeito: rejeito arenoso e lama. A barragem foi concebida, em 2005, de modo a alocar os rejeitos isoladamente, mantendo assim suas características iniciais constantes e bem definidas. Para tal, foi construído um dique secundário para contenção da lama cerca de 200 m após o dique de contenção principal, onde estava o rejeito arenoso. Foi considerado uma proposta de alteamento por linha de centro, porém essa solução não foi adotada, optando-se pelo método a montante. O projeto preconizava a construção do Dique 1 de partida em aterro convencional construído de solos saprolíticos compactados, até a cota de 830 m, e, posteriormente, sucessivos alteamentos de rejeito arenoso compactado até a cota de 920 m. A Figura 2 traz a seção transversal inicialmente prevista para o projeto.

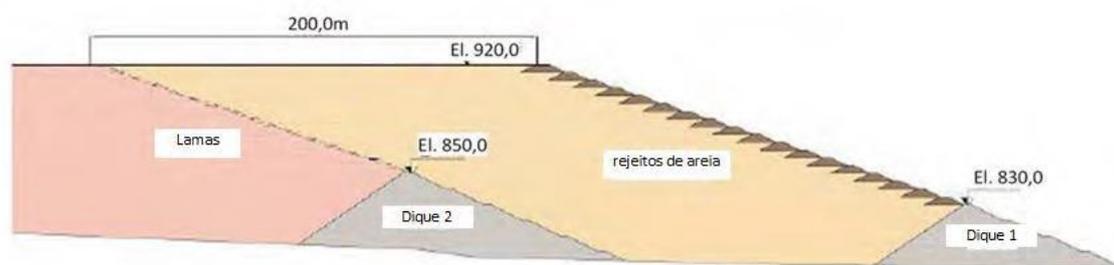


Figura 2 – Alternativa de alteamento a montante adotado para a Barragem de Fundão. (Morgenstern, et al., (2016)).

O projeto inicial também previa um sistema de drenagem para as águas oriundas das chuvas e das polpas de rejeitos por meio de galerias em concreto armado. Essa estrutura estaria alocada abaixo do rejeito arenoso e do Dique 1 da estrutura. Morgenstern, et al. (2016), afirma que, por se tratar de um vale fechado, o projeto inicial apresentava uma solução economicamente viável, requerendo quantidade baixa de material de aterro e alta capacidade de volume de armazenamento, porém a estrutura não era adaptável a variações na taxa de proporção de areias e rejeito a serem recebidas na barragem, além de depender fortemente de uma performance adequada do sistema de drenagem das areias.

Em 2009, fluxos de carreamento de partículas foram observados, indicando erosão interna. Isso foi o primeiro demonstrativo de que o sistema de drenagem preconizado no arranjo inicial se mostrava ineficiente. As investigações geotécnicas indicaram que o houve graves falhas na construção do dreno de fundo e nos filtros. Além disso, a

proporção de areias e lama durante a operação se mostrou diferente da taxa adotada em projeto, sendo que a produção de lama superou a de rejeito arenoso, gerando a necessidade da construção de um dique intermediário para a separação dos materiais, mas que diminuiu o critério de praia do conceito inicial.

Após uma série de mudanças executivas e alterações de projeto e gestão durante a vida útil da barragem, inclusive a criação de um recuo visando a operação de alteamento fora da região em que foi verificado danos estruturais nas galerias de drenagem, tem-se um cenário em que a lama e o rejeito arenoso se misturaram, havendo camadas de rejeito fino entre as camadas de areia. Essas camadas de materiais de menor granulometria foram fundamentais para a ocorrência dos fenômenos que antecederam a ruptura da Barragem de Fundão. A Figura 3 mostra o arranjo final da estrutura, antes da ruptura.



Figura 3 – Barragem de Fundão. (Morgenstern, et al., (2016)).

Quanto ao processo de ruptura, testemunhas oculares observaram, num primeiro momento, a surgência de água suja na base do platô, na região de recuo da barragem. A partir daí, foi observado uma movimentação do platô para frente, havendo, logo após, grande deformação do talude, no sentido ascendente, gerando trincas em algumas regiões do maciço da barragem. O que propiciou o surgimento da liquefação estática na região da ombreira esquerda, onde se deu início ao processo de ruptura, foi a saturação do rejeito,

a invasão da água e da lama na região de praia, conjuntamente a criação do recuo na estrutura e o consequente alteamento da estrutura realizado nessa região, onde houve um aumento da carga estática gerado pelo cisalhamento não drenado e deformação excessiva, principalmente na camada de rejeito. Portanto, o que se verifica é que havia um cenário com todas as condições necessárias para a ocorrência de liquefação: presença de rejeitos fofos, possibilidade de saturação e material com característica contrátil.

Desse modo, Morgenstern, *et al.* (2016) determinou como causa do deslizamento fluido ocorrido na Barragem de Fundão a extrusão lateral no depósito de lama alocado na ombreira esquerda. Esse fenômeno se desenvolve na medida em que é realizado o alteamento da barragem, criando uma distribuição de cargas aplicada verticalmente na camada de material de granulometria fina.

Esse carregamento vertical gera uma distribuição de tensões fazendo com que a lama tenda a ser expelida ou se espalhe lateralmente, variando o carregamento de tensões das regiões ao seu redor, principalmente sobrejacentes, reduzindo seu estado de confinamento e levando ao colapso. Ou seja, a liquefação da areia se deu devido ao gatilho de extrusão lateral ocorrido na camada de lama, um processo estático, que diverge de outros casos da literatura e que trouxe uma nova visão acerca do tema, trazendo uma abordagem mais ampla dos fenômenos que envolvem estabilidade de barragens de rejeitos e fornecendo ferramentas que podem auxiliar a evitar problemas futuros de natureza semelhante.

O segundo exemplo a ser citado trata da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, localizada a 9 km a nordeste de Brumadinho, em Minas Gerais, que rompeu no dia 25 de janeiro de 2019. O fluxo de lama decorrente da exploração de minério de ferro pela Vale SA causou perdas de vidas humanas e imenso prejuízo social, ambiental e financeiro, devastando a região a jusante. Um fato peculiar sobre essa ruptura é que há diversas filmagens que permitem analisar todo o processo de ruptura, fornecendo dados que auxiliaram nas investigações subsequentes. Robertson, *et al.* (2019) e CIMNE (2021) realizaram estudos para as investigações das causas do acidente.

Os vídeos mostram que a ruptura inicial foi rasa, seguida por diversos outros deslizamentos também rasos e com taludes íngremes que progrediram a montante.

Robertson, *et al.* (2019), afirmam que essa observação permite verificar que o rompimento se dá por liquefação estática do material.

Outro ponto único é que o evento de ruptura não apresentou sinais prévios de aparente instabilidade. A barragem possuía diversos instrumentos de monitoramento e nenhum dos métodos utilizados detectaram deformações ou alterações significativas antes do rompimento da estrutura. A barragem foi construída utilizando a técnica de alteamento a montante, durante um período de 37 anos e que já contava com dez alteamentos. Não foram executados novos alteamentos após 2013 e o lançamento de rejeitos nessa barragem foi finalizando em 2016.

O dique de partida não possuía boas condições de drenagem, com características que impediam a drenagem pelo dreno de pé. Nenhuma drenagem interna significativa foi executada nos alteamentos subsequentes, com exceção de tapetes drenantes e alguns drenos verticais nos alteamentos superiores. A Figura 4 apresenta o arranjo final da estrutura, antes da ruptura.



Figura 4 – Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão. Robertson, et al. (2019).

O projeto apresentava uma inclinação íngreme. Após o terceiro alteamento, a construção de um recuo reduziu a inclinação, mas acabou diminuindo o critério de praia, levando a estrutura para próxima do lago de decantação da barragem e também para a região em que estaria o nível freático interno. A falta de um sistema de drenagem eficiente

e a presença de rejeitos finos e com baixa permeabilidade também condicionaram esse nível de água elevado e, portanto, perto dos alteamentos. Apesar disso, o nível de água estava caindo lentamente após o fechamento da estrutura, portanto, alterações no lençol freático não foram considerados por Robertson, *et al.* (2019) como causas da ruptura da barragem.

Para as análises pós-ruptura, foram utilizados dados de investigações geotécnicas pré-rompimento, tais como dados de furos de sondagem, amostragens, ensaios CPTu, ensaios FVT, e perfis de velocidade de ondas de cisalhamento. Havia também imagens aéreas e de satélites disponíveis. Robertson, *et al.* (2019) afirmam que nenhum sismo foi registrado na região no dia do rompimento, portanto, sismos e detonações não foram os gatilhos do rompimento. Não obstante, o talude íngreme resulta em uma diminuição dos fatores de segurança da estrutura. O sistema de drenagem permitia que o nível freático se localizasse próximo a crista da barragem, com lançamento de rejeitos fracos (lama), próximo a regiões críticas do maciço e outro fator impactante é o alto teor de ferro, que permitia cimentação da parte sólida do rejeito e criou uma massa com comportamento rígido e potencialmente frágil, que estava sujeito a liquefação.

O deslizamento das camadas de rejeito que resultou na ruptura da barragem ocorreu devido a liquefação estática do material contido na estrutura. As condições supracitadas levaram a um cenário em que havia altas tensões de cisalhamento no talude, criando uma barragem com fatores de segurança próximos à ruptura em condições não drenadas. Ensaios laboratoriais afirmaram que pequenas deformações da camada de rejeito poderiam gerar um panorama de instabilidade e consequente ruptura.

Desse modo, o painel de investigação define como causa da ruptura da Barragem I da Mina Córrego do Feijão um processo de liquefação estática que possuiu como gatilho uma combinação de fatores oriundos de deformações específicas contínuas do tipo fluência. Essa redução de resistência veio ocorrendo em um processo cumulativo desde o fim da operação de lançamento de rejeitos na estrutura, em 2016. A baixa sucção do material, aliada a condições limitadas de drenagem, criaram zonas não saturadas de resistência cada vez menores, até o ponto crítico da ruptura, em 2019.

Além disso, a pedido do Ministério Público Federal, o *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingenieria* (CIMNE), da *Universitat Politècnica de Catalunya*, realizou um estudo para identificação de prováveis causas para o rompimento da Barragem 1. CIMNE (2021) corrobora que o lançamento de rejeitos na estrutura havia sido interrompido a mais de dois anos, com o lago da barragem drenado e níveis de fluxo controlados, com rebaixamento lento e constante da linha freática. Além disso, não havia indícios de *piping*, com uma ruptura ocorrendo sem prévios sinais aparentes de danos na estrutura.

CIMNE (2021) também afirma que é incontroverso que a ruptura da Barragem 1 se deu por fluxo por liquefação. O relatório também indica que, apesar de não haver atividades sísmicas e carregamentos dinâmicos suficientes para atuarem como gatilho na região, a forma como ocorre a ruptura se dá de maneira semelhante a outros casos em que há liquefação ativada por gatilhos dinâmicos.

O relatório indica que a liquefação se origina nos rejeitos, altamente contráteis, fofos, saturados e mal drenados, não havendo influência dos solos das fundações. Na contramão dos resultados apresentados por Robertson, *et al.* (2019), CIMNE (2021) afirma que não há vestígios de cimentação nos rejeitos, além disso, a taxa de deformação encontrada foi de baixa magnitude, não indicando que o processo de *creep* pudesse apresentar papel relevante no rompimento.

As análises numéricas realizadas pelo CIMNE (2021) apontam que a barragem não apresentava sinal de colapso iminente. Além disso, mesmo que continuadas por um período maior que 100 anos, a estrutura mantinha resultados de estabilidade satisfatórios. Portanto, o estudo sugere a necessidade de algum evento adicional para atuar como gatinho de liquefação da estrutura.

Embasado nisso, foram testados diversos tipos de gatilhos e chegou-se à conclusão que a execução do furo de sondagem B1-SM-13, que estava em andamento durante a ruptura, poderia ocasionar uma liquefação local graças à sobrepressão da água na região, que se propagaria pela massa de rejeito. Ao impor uma liquefação em zona limitada próxima ao furo, os resultados apresentados tanto em análises bidimensionais quanto tridimensionais indicam que a mesma se propaga para o restante da barragem e indica

ruptura da estrutura. Além disso, os padrões de deslocamento observados são semelhantes as imagens visuais obtidas do acidente. Demais gatilhos de liquefação estudados não resultaram numa ruptura global da barragem.

2.4.ASPECTOS LEGAIS

A Lei N° 13.334, de 20 de setembro de 2010 (2010) estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A legislação, aplicável a estruturas de acumulação de água ou rejeitos para quaisquer usos que possuem altura superior a 15 m, capacidade de reservatório igual ou maior a três milhões de m³, resíduos perigosos ou dano potencial associado médio ou alto, tinha como objetivo criar uma política pública que integrasse diversos órgãos de modo a assegurar a segurança das estruturas de barramento, protegendo assim o patrimônio humano, cultural, ambiental e econômico.

Após a promulgação da legislação, a Agência Nacional de Águas tornou-se responsável para organizar, gerir e implementar o SNISB, além de coordenar órgãos fiscalizadores e a elaboração dos Relatórios de Segurança de Barragens. Além disso, na atribuição de funções, a legislação estabelece que o órgão que forneceu a outorga de direito de uso dos recursos hídricos ou entidade que regula e fiscaliza as atividades minerárias são também responsáveis pelas fiscalizações dos barramentos. O órgão fiscalizador torna-se também responsável pela implementação do cadastro das barragens cuja fiscalização está sob sua responsabilidade.

Essa lei, após os acidentes citados, foi atualizada pela Lei N° 14.066 (2020), que, dentre as principais alterações, determinou a proibição de construção ou alteamento de barragens de mineração pelo método construtivo de alteamento a montante. Além disso, ficou estabelecido que todas as barragens no país executadas por meio dessa metodologia construtiva devem ser descaracterizadas até 25 de fevereiro de 2022. Essa proibição condiciona o uso de demais técnicas de disposição de rejeitos, tais como: disposição por barragens a jusante e linha de centro, disposição subterrânea, pilhas controladas e aterros hidráulicos.

Apesar da Lei já permitir prorrogação do prazo para descaracterização dessas estruturas em razão de inviabilidade técnica comprovada para os órgãos reguladores, são previstas multas e sanções, como embargos de obras e atividades, suspensão de licenças de operação, apreensão de bens e equipamentos e perdas de incentivos fiscais para os empreendedores que não cumprirem as novas exigências. Além disso, a atualização da Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece que os órgãos fiscalizadores são responsáveis por darem ciência à órgãos de proteção e à defesa civil, auxiliando a implementação e indicando a necessidade de adoção de medidas emergenciais de segurança.

Além disso, o plano de segurança deve apresentar um Plano de Ação Emergencial, obrigatório para empreendimentos de risco associado médio e alto e todas as barragens de rejeitos de mineração, visando mitigar os riscos e mapear pontos críticos, definindo cenários e caracterizando a barragem e instalações adjacentes. Outro ponto importante é que a Lei N° 14.066 (2020), estabelece que o empreendedor é responsável por eventuais reparos a danos ambientais, patrimoniais ou humanos até a completa descaracterização da estrutura.

As ações preconizadas no Plano de Ações Emergenciais são a realização de procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento da estrutura, além de outras ocorrências anormais, procedimentos preventivos e corretivos, programas de treinamento, envolvendo trabalhadores e comunidades potencialmente afetadas, inclusive realizando exercícios de simulação periódicos, medidas específicas para resgate de pessoas e animais, além de planos de mitigação de impactos ambientais e culturais, além de assegurar o abastecimento da população com água potável.

Além disso, é imprescindível o levantamento e mapeamento das zonas de autossalvamento, inclusive levando em consideração vulnerabilidades sociais. Essas ações, necessariamente, dependerão de um eficiente plano de comunicação e integração entre diferentes órgãos, de modo a definir e manter rotas de fuga, pontos de encontro e correta sinalização.

Mesmo com todo o amparo legal já existente, o estabelecimento de alguns conceitos e revisão dos prazos para descaracterização das barragens a montante são fortes

justificativas para as constantes revisões normativas tanto em âmbito federal quanto estadual. A ANM (2021), como parte ativa no processo de adequação e atualização das questões que envolvem a segurança de barragens de mineração, propõe uma minuta de resolução para consulta pública em 09 de junho de 2021 com o objetivo de consolidar os aspectos normativos de Segurança de Barragens determinado no Decreto de Lei N° 14.066, de 30 de setembro de 2020 (2020).

Essa minuta de resolução consolida o conceito de barragem de mineração descaracterizada como sendo uma estrutura que não recebe permanentemente aporte de rejeitos oriundos da atividade minerária e que deixa de possuir características ou funções de barragem, de acordo com um projeto técnico atrelado à profissional legalmente habilitado. O descomissionamento é conceituado como o encerramento das operações com remoção de infraestrutura associada, tais como *spigots*, tubulações e todas aquelas não necessárias a garantia da segurança da estrutura.

A minuta de resolução também corrobora a necessidade do empreendedor em cadastrar todas as barragens de mineração no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração – SIGBM, que faz parte do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Nos casos de barragens descaracterizadas, o empreendedor deve apresentar à ANM documento atestando a descaracterização da estrutura, atestada por profissional habilitado.

O documento corrobora também a necessidade de estabelecimento de um Processo de Gestão de Risco para Barragens de Mineração – PGRBM, que deve auxiliar na tomada de decisão e influenciar nos processos relacionados a gestão e manutenção das barragens de mineração. Além disso, o PGRBM deverá ser feita antes de qualquer modificação estrutural prevista para as barragens, inclusive descaracterização dessas estruturas.

Já em âmbito estadual, a Portaria FEAM N° 679, de 06 de maio de 2021(2021) estabelece que as barragens de mineração situadas no estado de Minas Gerais e que apresentem características estabelecidas pela Política Estadual de Segurança de Barragens devem ser cadastradas e classificadas no Sistema de Informações de Gerenciamento de Barragens da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais.

O empreendedor deve apresentar um Relatório de Auditoria Técnica Ordinária de Segurança de Barragem e uma Declaração de Condição de Estabilidade, bem como as Anotações de Responsabilidade técnica, até a data de 1º de setembro de 2021.

Apesar do prazo estabelecido, ABMS (2022) indica que a data especificada na lei não é factível devido às peculiaridades técnicas e construtivas das estruturas. Além disso, ANM (2022) em seu *Report* Trimestral de Descaracterização de Barragens de rejeitos, apresentado em fevereiro de 2022, estabelece que cada caso será analisado conforme as especificidades da barragem. Em linhas gerais, os prazos foram reajustados e estruturas com volume menor que 12 milhões de m³ tiveram prazo adiado até a data de 15 de setembro de 2022, barragens com volume entre 12 e 30 milhões de m³, terão até a data de 15 de setembro de 2025 e barragens com volume acima de 30 milhões com prazo até 15 de setembro de 2027. O relatório também afirma que atualmente há 61 barragens a montante no país. 13 delas estão em alguma etapa de projeto (conceitual, básico ou executivo), 41 em etapa de execução e 7 com descaracterização autodeclarada concluída.

Apesar dos anseios da sociedade e órgãos fiscalizadores para eliminação de tais estruturas o mais rápido possível, as limitações técnico-científicas e a dificuldade de atuação em estruturas com níveis de emergência devem ser consideradas de modo a evitar incidentes. Portanto, verifica-se a existência de um amplo debate entre empreendedores, corpo técnico e órgãos fiscalizadores na tratativa de definir os conceitos tangentes os processos e estruturas de mineração e principalmente estabelecer critérios aceitáveis de segurança de barragens de mineração, levando em consideração a visão da população quanto ao conceito de risco aceitável e as necessidades e disponibilidades técnicas e financeiras dos empreendimentos minerários e órgãos fiscalizadores.

3. LIQUEFAÇÃO

3.1. DEFINIÇÕES GERAIS

Terzaghi (1996) A liquefação é um processo de perda de resistência ao cisalhamento de um solo induzida pelo acréscimo da poropressão. Ela ocorre em materiais que apresentam tendência de contração volumétrica, tais como areias fofas. A impossibilidade da ocorrência desse fenômeno em solos dilatantes se deve ao fato de que nesses materiais a resistência ao cisalhamento não-drenada é maior do que a resistência drenada.

Rafael e Romanel (2014) afirmam que por muito tempo vigorou uma crença de que a liquefação era um fenômeno restrito a solos arenosos. Acreditava-se que solos de menor granulometria não gerariam altos valores de poropressão, até então visto como critério básico para a existência do fenômeno. Apesar disso, Wang (1979) estabelece parâmetros que podem indicar a suscetibilidade de solos finos a liquefação. O critério chinês, como é usualmente chamado, é dado por:

- Fração mais fina do que $5\mu \leq 15\%$;
- Teor de umidade $w \geq 0,9 LL$;
- Limite de liquidez $LL \leq 35\%$;
- Índice de liquidez $LI \leq 0,75$.

Algumas adaptações e ajustes foram propostos para o critério ao longo do tempo, mas é senso comum que a possibilidade de liquefação de solos finos é uma propriedade ligada às características de plasticidade do material, que nesse caso influenciam mais que distribuição granulométrica do solo. Além disso, mesmo que as condições estabelecidas sejam atendidas, a liquefação também está intimamente ligada a um critério de estado, que depende do índice de vazios do material e consequentemente do seu histórico de tensões.

Para que haja liquefação, é necessária uma mudança abrupta da estrutura devido a um carregamento, denominado gatilho de liquefação, que pode ter origem dinâmica ou estática, e que irá gerar, rapidamente, um rearranjo da estrutura sólida do solo, que tende a se contrair. A água intersticial é confinada sob a atuação de altos valores de poropressão, sem possibilidade de ser dissipada devido ao curto período de tempo em que se dá o processo. Dessa forma, a água impede o contato entre as partículas e reduz drasticamente a parcela de resistência devido ao atrito. Num dado momento, observa-se uma condição crítica em que a poropressão está tão elevada e a correspondente resistência ao cisalhamento do material reduzida de tal forma que o material passa a se comportar como um fluido viscoso, indicando assim a ruptura do solo.

Como demonstrado por Poulos, *et al.* (1985), os materiais geotécnicos apresentam tensão-deformação num gráfico no qual o material apresenta uma resistência ao cisalhamento de pico (ponto P), em que a tensão desviadora é máxima, e então uma queda abrupta até a estabilização em um baixo patamar de resistência (ponto S), também chamada de resistência cisalhante liquefeita ou condição de estado permanente. Define-se ainda a linha de estado permanente, que traduz a relação entre os índices de vazios para grandes deformações e as tensões efetivas confinantes, em escala logarítmica.

A Figura 5 compila os resultados obtidos por Poulos, *et al.* (1985) para amostras não drenadas. Na Figura 5(a) é demonstrada a redução da tensão confinante efetiva em função da deformação gerada pelo acréscimo de poropressão. A Figura 5(b) traz a variação verificada na tensão confinante efetiva durante o cisalhamento não drenado, em relação ao adensamento, até a estabilização na Linha de Estado Permanente. A Figura 5(c) ilustra a trajetória tensão-deformação do material e, por fim, a Figura 5(d) apresenta o ângulo de atrito de estado permanente, que pode ser correlacionado com o ângulo de atrito do diagrama de Mohr-Coulomb. O Ponto C da Figura 5(b) representa o momento imediatamente após ao processo de adensamento da amostra.

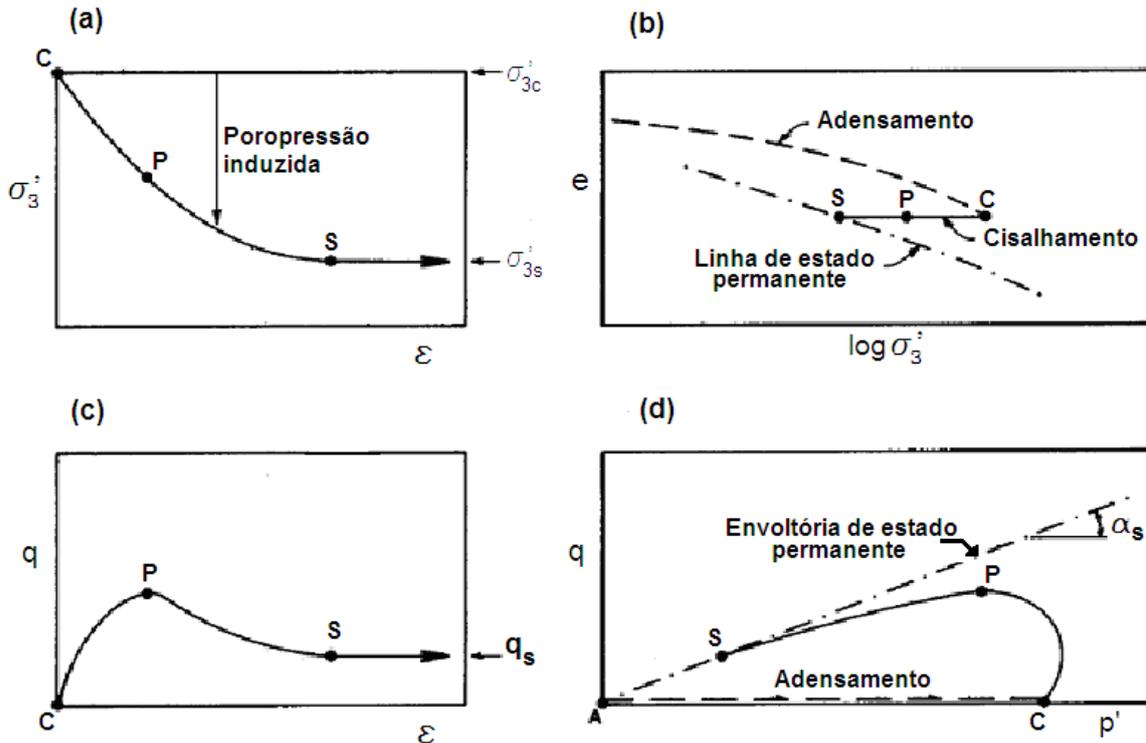


Figura 5 – Estado permanente de deformação para amostras não drenadas. Poulos, et al. (1985).

3.2. SUSCETIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO

Como explicitado previamente, o fenômeno de liquefação depende de alguns critérios e nem todos os solos estão suscetíveis a esse processo. Portanto, a verificação de estabilidade de um talude deve avaliar a possibilidade ou não do material de se liquefazer. Kramer (1996) compila uma série de critérios que possibilitam a determinação de materiais que apresentam tais características.

3.2.1. CRITÉRIO HISTÓRICO

O critério histórico é baseado em dados empíricos obtidos a partir da observação de diversos estudos de casos catalogados ao longo do tempo. As informações obtidas através do comportamento geotécnico pós terremotos permitiram estabelecer regiões com características de solo e de lençol freática similares, e que, portanto, indicariam a suscetibilidade de ocorrência ou não da liquefação e permitindo a previsibilidade do fenômeno em eventuais situações futuras.

Ambraseys (1988) define que a probabilidade de liquefação está atrelada à distância do local observado em relação ao epicentro sísmico. Observando a magnitude de diversos terremotos ao redor do planeta, foi possível criar uma relação entre a distância e a magnitude em que se pode delimitar a possibilidade de ocorrência de liquefação. A Figura 6 representa os resultados obtidos.

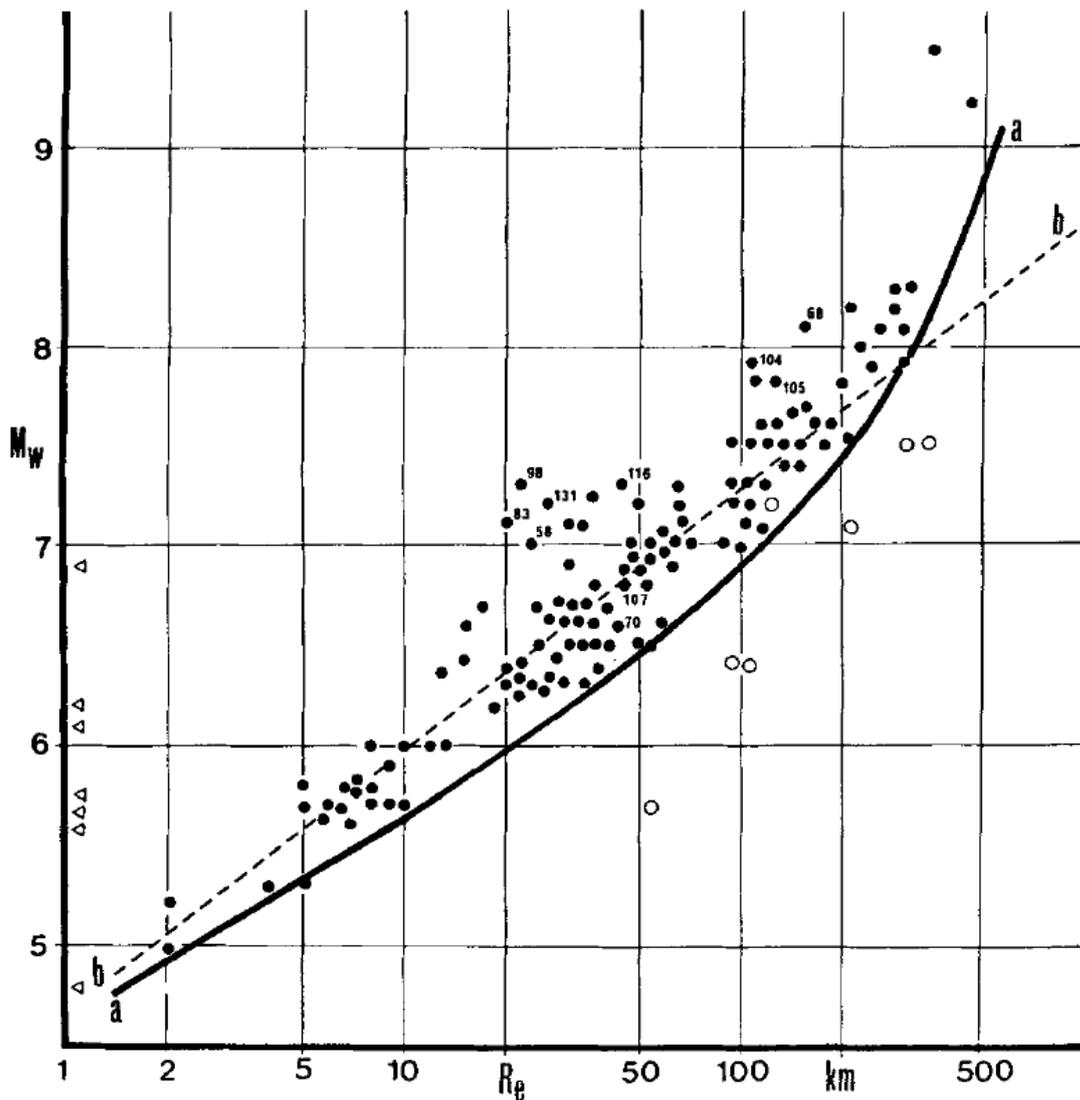


Figura 6 – Relação entre a distância do epicentro à locais em que se observou liquefação (R_e) em quilômetros e a taxa de magnitude sísmica (M_w). Ambraseys (1988).

Apesar de permitir uma boa análise de partida, tais observações não permitem garantir com certeza a possibilidade de ocorrência de liquefação. Portanto, o critério histórico deve ser utilizado apenas como um método de partida para posteriores

investigações mais minuciosas quanto a suscetibilidade de liquefação de um material geotécnico.

3.2.2. CRITÉRIO GEOLÓGICO

Outro fator observado é que terrenos suscetíveis à liquefação apresentam características geológicas similares. O período de formação dos solos, as condições de deposição e características hidrológicas são fatores que influenciam grandemente no processo. Depósitos que apresentam solos com grãos uniformes e em estados fofos apresentam um alto potencial de liquefação.

Portanto, depósitos que sofreram intemperismo fluvial, coluvial e eólico, aliado uma condição de saturação do material, são altamente propícios a se liquefazerem, tanto devido a um carregamento cíclico quanto a um carregamento estático. Quanto ao fator idade, solos do período holocênico são mais suscetíveis a liquefação que solos do período pleistocênico, havendo raras observações do fenômeno.

Como já dito previamente, a liquefação ocorre apenas em materiais saturados, portanto, é evidente que a profundidade da linha freática é fator determinante para a ocorrência do material. Desta forma, solos com lençol freático mais profundos estão menos suscetíveis a liquefação.

3.2.3. CRITÉRIO DE ESTADO CRÍTICO

Além de todos os requisitos já estabelecidos, a liquefação depende também do estado inicial do solo em questão. O estado de tensão-deformação e a densidade específica são características condicionantes para a ocorrência desse processo. Como a tendência de gerar poropressão de um material é fortemente influenciada por esses fatores, salienta-se assim a importância de verificar tais características como possíveis critérios de suscetibilidade.

A partir dos resultados obtidos por meio de ensaios triaxiais drenados em amostras soltas e densas, Casagrande (1936) observou que esses materiais apresentavam diferentes trajetórias de tensões ao longo do processo de extensão axial. Enquanto as areias fofas

apresentam contração ao longo do ensaio, as areias densas apresentaram uma contração inicial seguida de uma acentuada expansão, até a estabilização na tensão correspondente ao índice de vazio crítico. A Figura 7 traz os resultados obtidos e permite também a verificação do índice de vazios das amostras em relação a tensão de desvio aplicada.

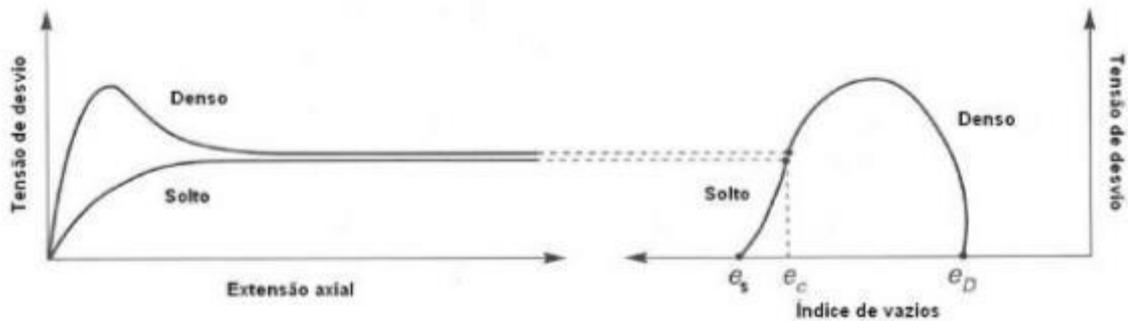


Figura 7 – Trajetória tensão deformação e relação tensão de desvio e índice de vazios para areias soltas e densas sob a mesma tensão confinante. Kramer (1996).

Casagrande (1936) observou que o índice de vazios crítico está relacionado exclusivamente a tensão confinante na qual o material é submetido, delimitando assim a linha de estado críticos. Kramer (1996) estabelece que a linha de estado crítico divide o material em solos fofos, em que o excesso de poropressão geram contração de volume, e solos densos, em que há expansão de volume.

Portanto, essa linha pode ser utilizada também como indicativo de materiais propícios ou não à liquefação. A Figura 8 ilustra o comportamento de areias fofas e densas perante carregamentos drenados e não drenados.

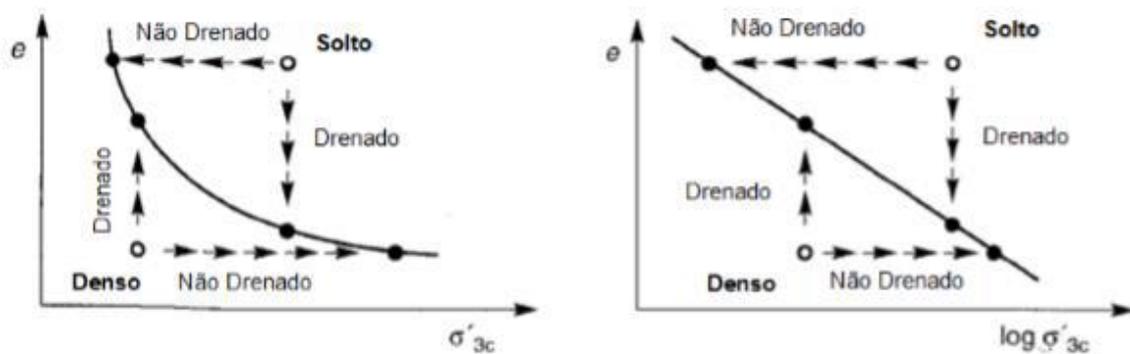


Figura 8 – Comportamento drenado e não drenado de amostras inicialmente densas e fofas até a linha de estado crítico. Kramer (1996).

3.3. GATILHOS DE LIQUEFAÇÃO

O processo de liquefação se desenvolve por carregamentos de origem cíclicas (tais como sismos naturais ou vibrações geradas por explosões, cargas de veículos e demais perturbações convencionais de um complexo minerário) ou monotônicos (no caso da liquefação estática). Pereira (2005) indica que a liquefação estática está associada a mecanismos de gatilhos tais como: elevação do nível de água em depósitos granulares, carregamento rápidos, movimentos de massa na área de depósitos de materiais granulares e grande volume de precipitação pluviométrica.

Davies (2002) afirma que a tensão residual de amostras liquefeitas tanto por meio de carregamentos cisalhantes cíclicos, quanto por estáticos, é igual, apesar de diferentes históricos de tensões. A Figura 9 traz uma representação esquemática do comportamento de rejeitos arenosos fofos sem coesão sujeitos a liquefação.

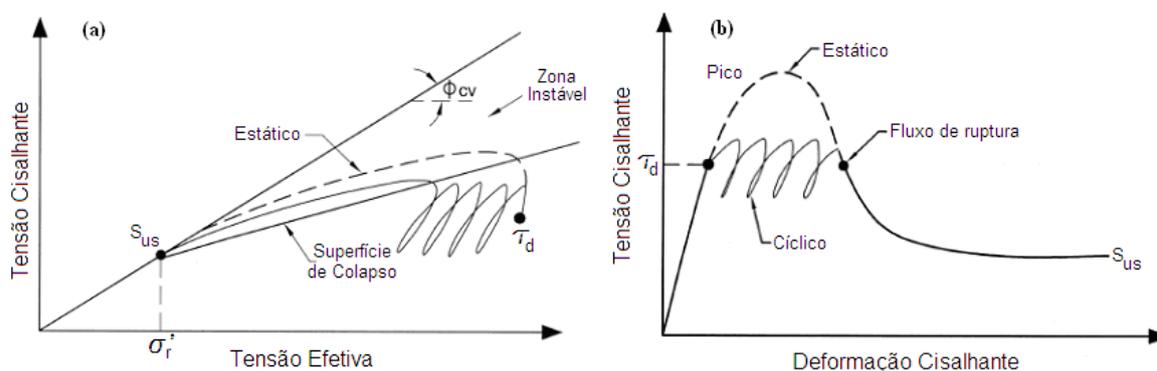


Figura 9 – Comportamento esperado para rejeitos saturados sem coesão sob carregamentos monotônicos e cíclicos. Davies (2002).

Pela Figura 9 observa-se que o material apresenta diferentes trajetórias de tensão, atingindo a resistência ao cisalhamento de pico, ponto no qual o material inicia o processo de amolecimento até ultrapassar a superfície de colapso. Após, o material segue perdendo resistência ao longo da zona instável, com a resistência sendo reduzida até a estabilização no estado permanente, ou seja, na resistência residual.

Davies (2002) aponta que o uso do conceito da superfície de colapso permite aferir que, independentemente das trajetórias de tensões delimitadas por carregamentos

sísmicos ou de construção, por exemplo, que podem desencadear a liquefação, a resistência residual obtida, resistência liquefeita, é a mesma.

A trajetória de tensões é definida por parâmetros tais como a composição e estrutura dos solos, o estado inicial da amostra e forma com que a amostra é submetida ao carregamento. Portanto infere-se que a curva tensão-deformação do início da submissão ao carregamento até a resistência de pico está sujeita principalmente às características iniciais da estrutura do solo em questão. A resistência de pico, no caso de um carregamento cíclico, é gradualmente reduzida com a desestruturação do solo na medida em que a carga é aplicada, conforme indicado pela Figura 9.

3.4. METODOLOGIA DE OLSON

Olson (2001) define uma técnica empírica para análise de potencial de liquefação de solos baseada em 33 estudos de casos de rupturas ocasionadas por fluxo de liquefação. Os casos abordados abrangem diversos materiais, tais como areias, areias siltosas, siltes arenosos e rejeitos arenosos.

Segundo Neto (2009), as análises de estabilidade para solos não drenados partem do princípio de que a resistência ao cisalhamento é dependente da tensão vertical de adensamento existente antes do carregamento, dessa forma, a carga aplicada não pode ser convertida de forma imediata em tensão efetiva disponível para o cálculo da resistência ao cisalhamento. Partindo desse pressuposto, Olson adota, em suas avaliações, que a resistência não drenada de pico e liquefeita estão diretamente correlacionadas a tensão vertical efetiva in situ.

O método de Olson é dividido em três etapas: na primeira, busca-se verificar a suscetibilidade de liquefação do material, a segunda, busca-se verificar potencial de ativação de gatilhos de liquefação e, por fim, a análise de estabilidade do material liquefeito. Neste método, o cálculo das razões de resistência não drenadas, tanto de pico quanto residuais (liquefeitas), são realizadas por meio de correlações baseadas em ensaios dos tipos SPT e CPT. Dessa forma, é possível se obter resultados de resistência não drenadas sem a necessidade de ensaios laboratoriais e fatores de correção expressivos.

Como definido previamente, para que um solo apresente suscetibilidade de liquefação, o material analisado deve apresentar característica contrátil e estar em estado saturado. Portanto, a primeira etapa do método de Olson consiste basicamente em verificar se determinado material, dada uma tensão aplicada, apresenta comportamento contrátil ou dilatante. A Figura 10 abaixo apresenta um gráfico definindo a tendência de comportamento do material com base no número de golpes aplicados durante ensaio SPT. Já a Figura 11 correlaciona o comportamento do material ao ensaio de cone CPT.

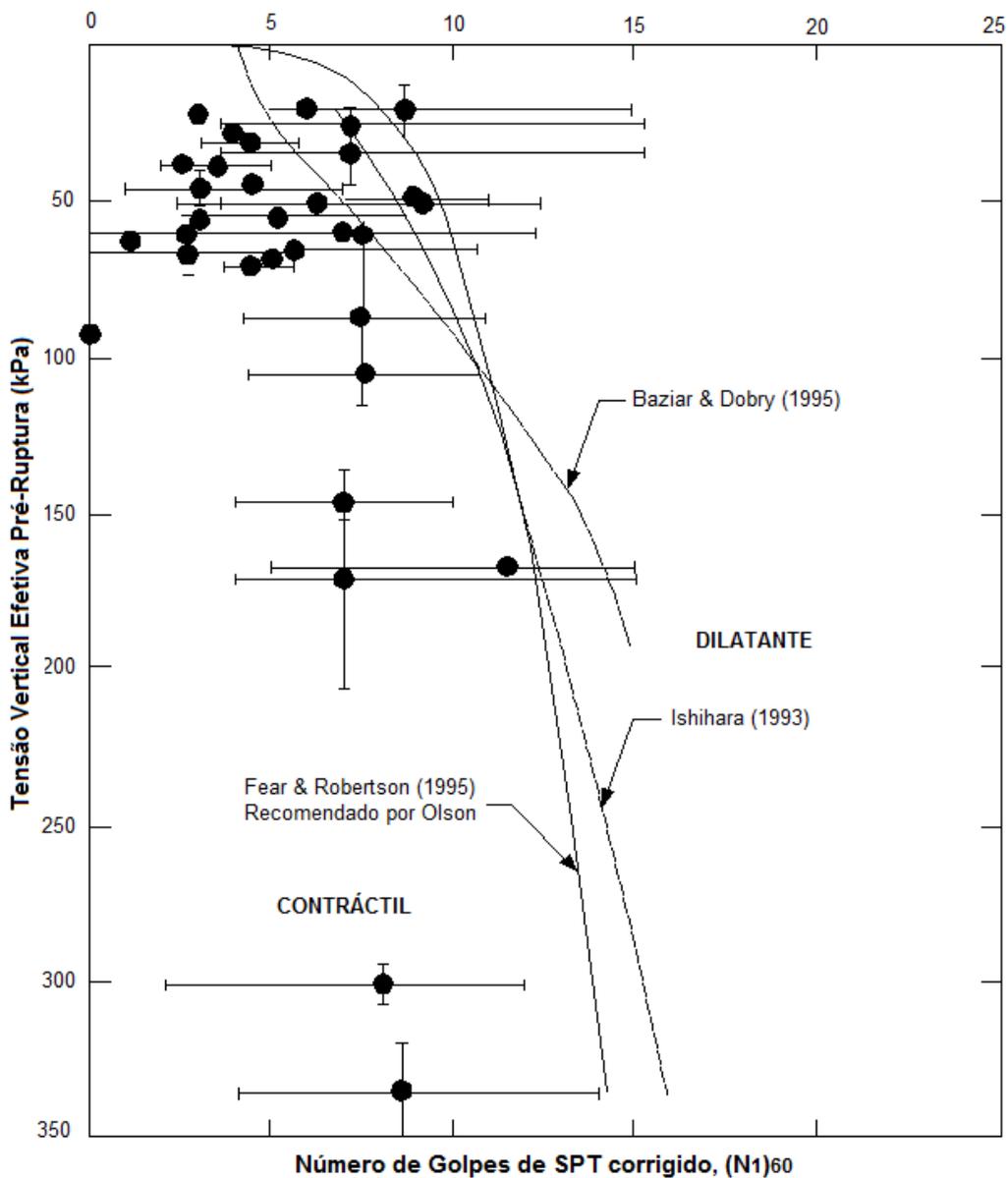


Figura 10 – Suscetibilidade a Liquefação para ensaio SPT. Olson (2001).

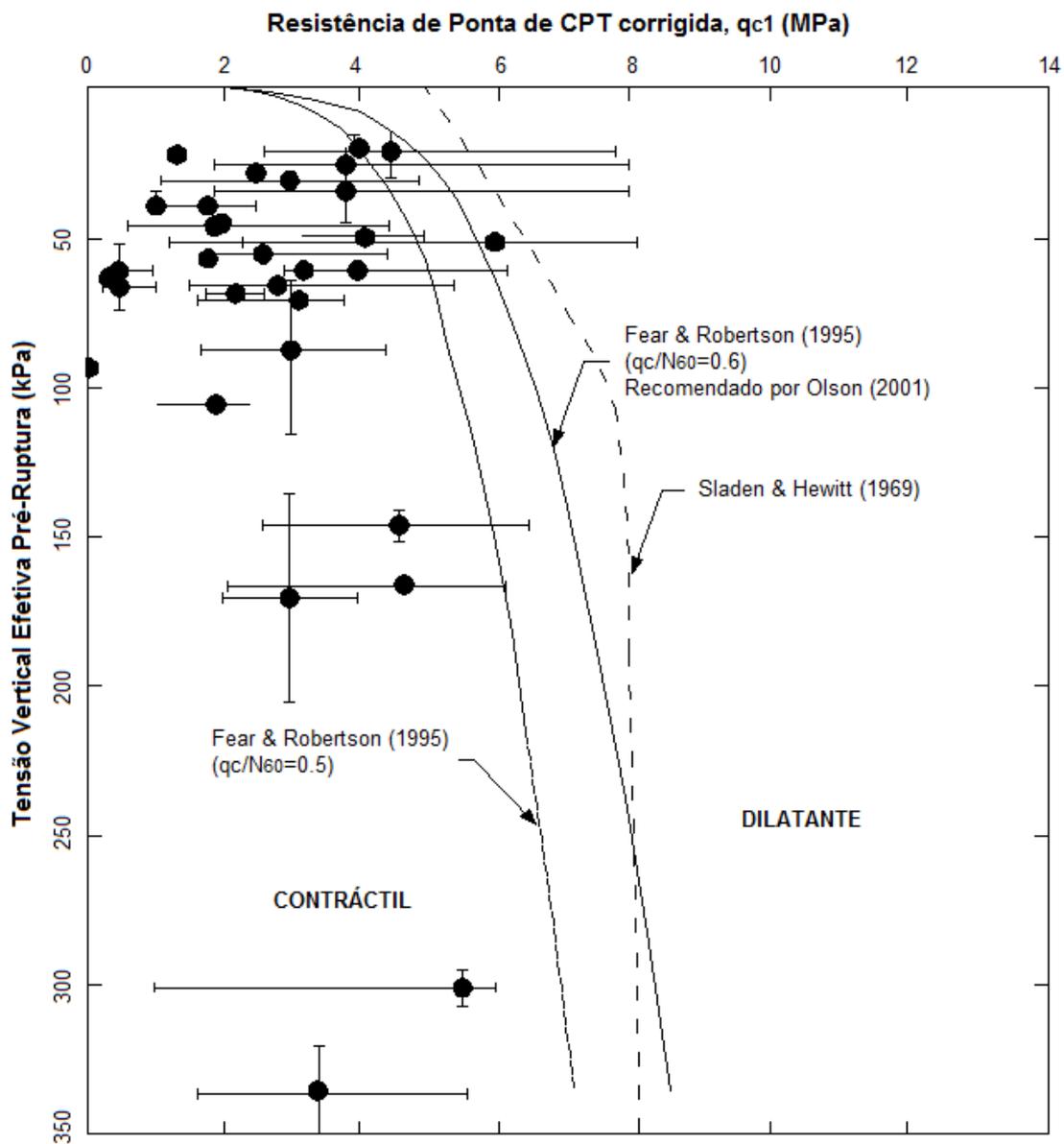


Figura 11 – Suscetibilidade a liquefação por ensaio de cone CPT. Olson (2001).

Portanto, solos que apresentam resultados a esquerda da curva de Fear & Robertson (1995) apresentam características contráteis, havendo, por conseguinte, a possibilidade de existência de liquefação. Já solos à direita da curva apresentam comportamento dilatante e estão imunes à possibilidade de liquefação.

As curvas de Fear & Robertson (1995) e adotadas por Olson (2001) são dadas por:

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 9.5812 \times 10^{-4} [(N1)_{60}]^{4.7863} \quad (1)$$

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 1.1047 \times 10^{-2} [(qc1)]^{4.7863} \quad (2)$$

Em que $(N1)_{60}$ e $qc1$ são os valores corrigidos dos resultados obtidos por meio dos ensaios de campo SPT e CPT, respectivamente. A correção adotada para o número de golpes medidos no ensaio SPT é dada pela Equação 3, em que N é o número de golpes medidos em campo e $(N1)_{60}$ é o valor normalizado correspondente a 60% da energia utilizada no ensaio, ER é a energia de queda livre e C_N é o fator de correção da tensão vertical efetiva, calculado por meio da Equação 4, em que P_a é a pressão atmosférica. Olson adota $n = 0,5$ para todos os solos apresentados.

$$(N1)_{60} = NC_N \left(\frac{ER}{60} \right) \quad (3)$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (4)$$

Já para os ensaios CPT, a correção é dada pela Equação 5, em que qc é a resistência de ponta e Cq é o fator de correção do nível de tensões, determinado por meio da Equação 6.

$$qc1 = qcCq \quad (5)$$

$$C_q = \frac{1,8}{0,8 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a}} \quad (6)$$

Após verificado o potencial de liquefação do material, o próximo passo é definir possíveis gatilhos e verificar se o carregamento é suficiente (as tensões cisalhantes são superiores à resistência ao cisalhamento de pico) para desencadear a liquefação de um volume significativo de solo.

Para verificar o potencial de gatilho de liquefação, Olson (2001) propõe as seguintes etapas de procedimentos a serem realizados:

- Primeiramente, é necessário processar uma análise de estabilidade de taludes do modelo em questão em uma situação pré-ruptura de modo a determinar a tensão cisalhante atuante τ_d nos solos que possuem susceptibilidade à liquefação;
- Subdividir a superfície de ruptura crítica em cerca de 10 a 15 seguimentos;
- Obter a média ponderada da tensão vertical efetiva $\sigma'_{v0(média)}$ da superfície de ruptura crítica e determinar a razão de tensão de cisalhamento estática média $\frac{\tau_d}{\sigma'_{v0(média)}}$;
- Determinar a razão de resistência de pico $\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{v0}}$ com base nas Equações 7 e 8 e que são representadas graficamente pelas Figura 12 e Figura 13, cujo linha média são correspondentes às Equações Referidas;

$$\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0075[(N1)_{60}] \pm 0,04 \quad \text{para } (N1)_{60} \leq 12 \quad (7)$$

$$\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0143[q_{c1}] \pm 0,04 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6MPa \quad (8)$$

- Calcular o valor de S_u^{pico} para cada fatia multiplicando a razão de resistência de pico obtida pela tensão vertical efetiva inicial;
- Obter o fator de segurança contra o início de liquefação para cada fatia por meio da Equação 9.

$$FS_{gatilho} = \frac{S_u^{pico}}{\tau_{estática} + \tau_{sísmica} + \tau_{outra}} \quad (9)$$

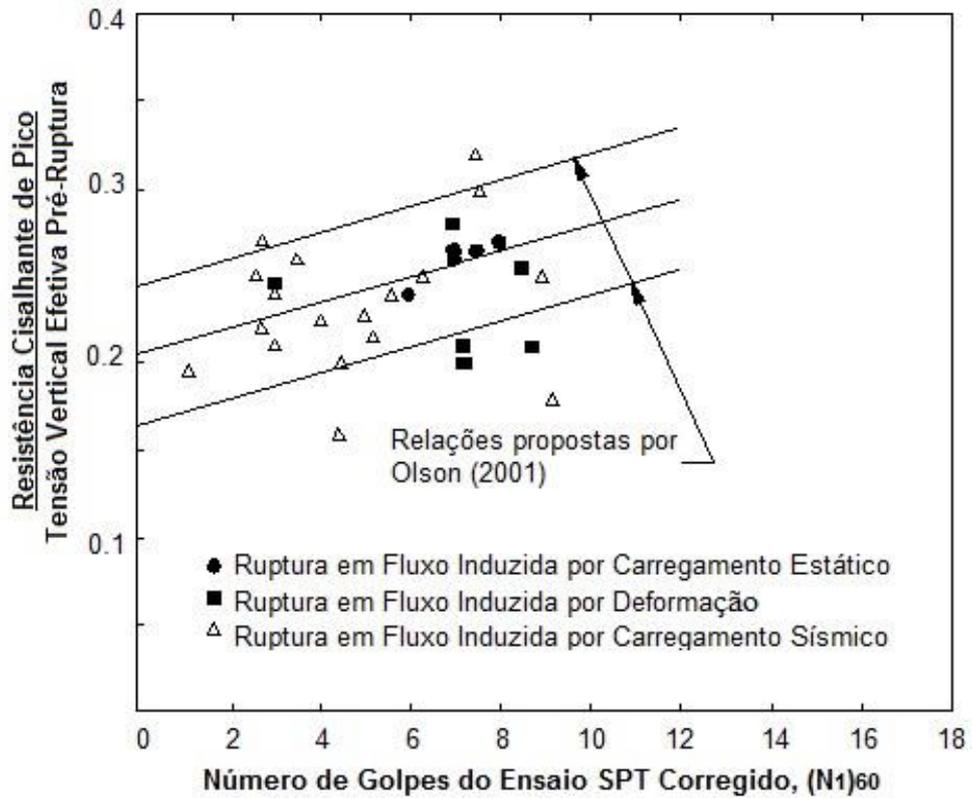


Figura 12 – Razão de resistência de pico para Ensaio SPT. Olson (2001).

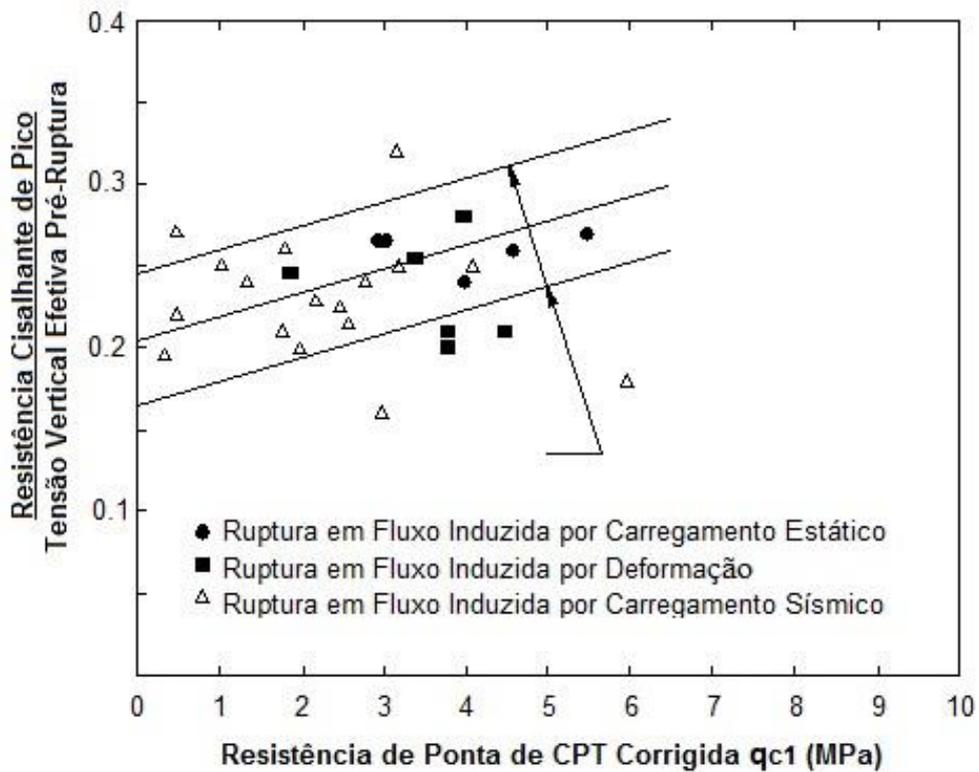


Figura 13 – Razão de resistência de pico para Ensaio CPT. Olson (2001).

Se o fator de segurança obtido para todas as fatias são acima de 1, então o material não apresenta risco de liquefação e uma análise pós-liquefação não é necessária. Porém, se algumas fatias apresentarem FS^{pico} menor que 1, então, adota-se a resistência ao cisalhamento liquefeita do material e verifica-se a estabilidade pós-liquefação.

O último passo para verificação de liquefação pelo método de Olson é a análise de estabilidade pós-liquefação, que permite verificar se as tensões de cisalhamento excedem a resistência residual do material liquefeito. A razão de resistência liquefeita é calculada por meio das Equações 10 e 11, que também são graficamente representadas pelas Figura 14 e Figura 15.

$$\frac{S_u^{liq}}{\sigma'_{v0}} = 0,03 + 0,0075[(N1)_{60}] \pm 0,03 \quad \text{para } (N1)_{60} \leq 12 \quad (10)$$

$$\frac{S_u^{liq}}{\sigma'_{v0}} = 0,03 + 0,0143[q_{c1}] \pm 0,03 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6MPa \quad (11)$$

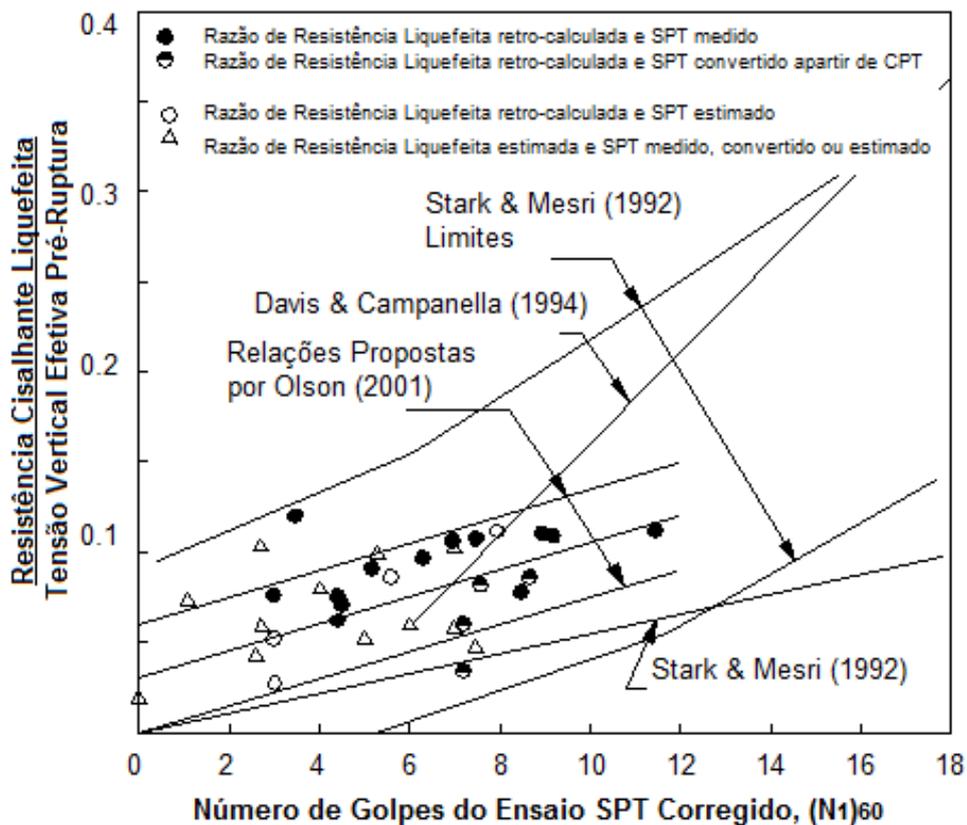


Figura 14 – Razão de resistência liquefeita para Ensaio SPT. Olson (2001).

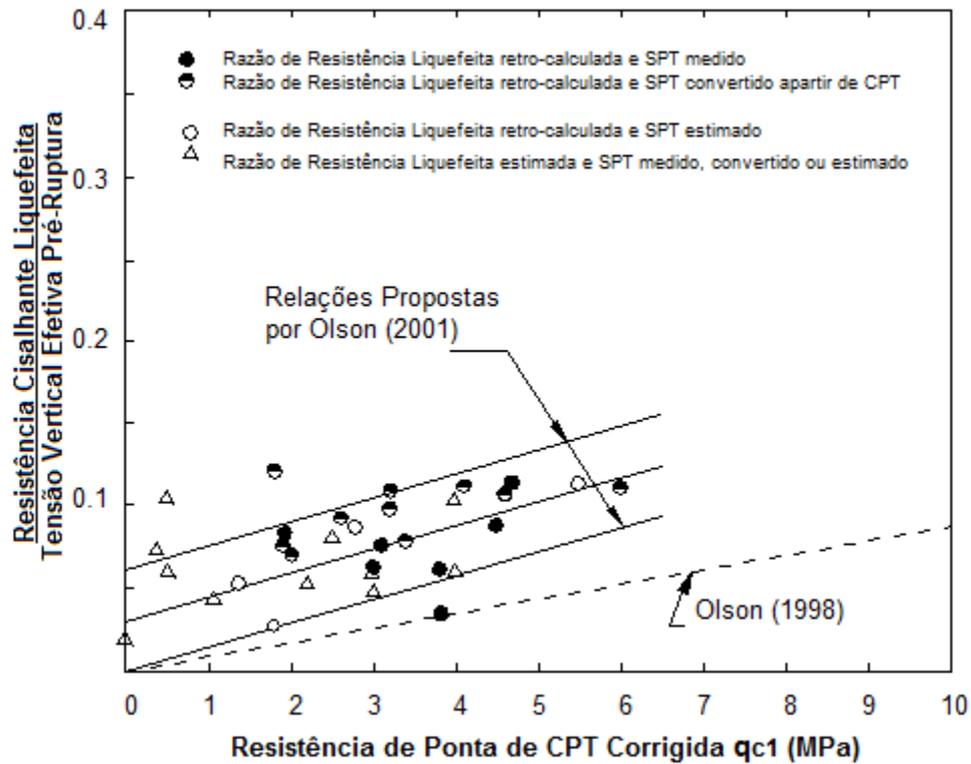


Figura 15 – Razão de resistência liquefeita para ensaio CPT. Olson (2001).

O processo para obtenção do FS^{liq} é análogo ao utilizado para as análises de gatilho, porém, agora, adotando-se a resistência cisalhante liquefeita para as fatias de solo que apresentaram FS^{pico} menor que 1. Se o valor obtido para FS^{liq} for inferior a 1, verifica-se que haverá fluxo por liquefação e, por conseguinte, ruptura da estrutura.

Se FS^{liq} está compreendido entre 1 e 1,1, indica a possibilidade de deformações e novas análises de estabilidade devem ser executadas adotando valores de resistência ao cisalhamento liquefeita para as demais fatias em que FS^{pico} for menor ou igual a 1,1. Essa análise irá abordar o efeito de ruptura progressiva no material, verificando a possibilidade de ruína do talude devido à essas deformações. O mínimo valor de FS^{liq} é obtido quando, em todas as fatias em que ocorrer o início de liquefação, for adotado resistências ao cisalhamento liquefeitas, criando assim a condição de ruptura progressiva e analisando de forma iterativa o efeito causado por uma pequena parcela de material impactando em toda a massa de solo do talude.

2. DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS

Mao e Kam (2011) afirmam que o principal critério para a desativação de uma barragem de rejeito é assegurar que o desempenho estrutural da barragem não seja comprometido ao longo do tempo. Para tal, é necessário manter um controle eficiente de fatores como estabilidade estrutural, capacidade de retenção, estabilidade química dos resíduos, controle de drenagem e comportamento perante a períodos de chuva, prevenção de erosão, dentre outras.

O processo de descaracterização de barragens é realizado em algumas etapas. Inicialmente, busca-se avaliar as presentes condições de desempenho da estrutura, com base em ensaios, monitoramento contínuo e campanhas de investigações. Logo após, são realizadas intervenções a curto prazo para adequar a estrutura, se necessário, aos requisitos mínimos necessários para início do fechamento. Por último, é aplicado o gerenciamento de longo prazo, envolvendo intervenções, manutenção e inspeção para garantir que a estrutura possui requisitos mínimos de segurança até sua completa incorporação ao meio ambiente na qual a barragem estava inserida.

Pulino (2010) afirma que reduzir ou eliminar o acúmulo de água no reservatório, principalmente naqueles em que a superfície freática se encontra próxima ao maciço da estrutura, é premissa básica para um projeto de descaracterização. A presença de água aumenta o risco geotécnico e hidrológico, elevando a linha freática e diminuindo o fator de segurança, comprometendo, portanto, a estabilidade da barragem. Para redução da quantidade de água, algumas técnicas são usualmente adotadas.

Uma delas é a abertura de um vertedouro nas regiões da ombreira, com cota de fundo baixa o suficiente para evitar o excesso de água e a conseqüente saturação dos resíduos e maciço. Esse vertedouro deve ser dimensionado de modo a suportar maior vazão de projeto, com período de retorno aproximado de 1000 anos, segundo a NBR 13.028 (ABNT, 2017). A outra é o uso de bombas hidráulicas para retirada de água do lago e inserção no leito dos corpos hídricos da bacia hidrográfica da região. Caso

necessário, é preciso realizar o processo de tratamento da água de modo a minimizar o impacto ambiental da operação.

Outra técnica bastante utilizada para a descaracterização de barragens de rejeito, segundo Sánchez (2013), é o abatimento dos ângulos de talude da estrutura. Essa técnica é economicamente viável para barragens menores, com altura relativamente baixa, já que o volume de material a ser deslocado para uma estrutura de grande porte seria muito grande, onerando significativamente a operação, já que em muitos casos, para garantir as características preconizadas no projeto de descaracterização, esse abatimento dos taludes deve ocorrer da ordem de 1V:1,5H para 1V:10H, por exemplo.

Muitas vezes, o abatimento dos taludes ou o controle da linha freática não é suficiente para garantir a estabilidade hidrogeológica do maciço, sendo necessário a remoção parcial de camadas mais fracas de material ou, até mesmo, de todo o rejeito contido na barragem. Para a realização dessa operação, é utilizado principalmente veículos de grande porte, como caminhões, tratores, retroescavadeiras e demais máquinas que acabam onerando o processo de descaracterização. Essa operação torna-se ainda mais complexa em caso de barragens com alto risco de ruptura, em que é necessário o uso de equipamentos não tripulados, com operação remota, para salvaguardar a vida dos trabalhadores durante as intervenções na estrutura.

Como citado anteriormente, atualmente há um grande número de barragens de rejeito a montante em processo de descaracterização. Empiricamente, o que se observa é que grande parte dessas estruturas estão sendo descaracterizadas com logística de escavação de montante para jusante. Essa solução alia o atendimento de critérios mínimos de projeto e exequibilidade da obra, apresentando melhores resultado de tensão-deformação do que quando utilizado escavação de jusante para montante.

Em barragens em nível emergencial é necessário o uso de equipamentos não tripulados e em casos em que existe possibilidade de execução, é construído uma estrutura de contenção a jusante, responsável pela retenção de rejeitos caso a barragem em processo de descaracterização rompa. Porém observa-se que, dependendo da conformação topográfica da região e da geometria da barragem, essa medida de segurança não é viável, principalmente em barragens não localizadas em vales encaixados ou cujos taludes sejam

voltados para várias direções, pois seriam necessárias estruturas de contenção muito robustas e inviáveis tecnicamente.

Outro ponto importante é a destinação desse material após retirada da barragem. Como hoje há técnicas mais eficientes de beneficiamento mineral, é possível reaproveitar esse material e utilizá-lo para fins comerciais. Quando não há viabilidade técnicas ou de licenciamento, a solução é realizar a secagem do material para possibilitar a deposição em fundo de cava ou pilhas de disposição de rejeito.

Com base em todo o exposto, verifica-se que o processo de descaracterização de barragens de rejeitos ainda apresenta algumas indefinições, com diversas possibilidades que variam muito conforme a região em que o complexo minerário está inserido, da disponibilidade de recursos financeiros disponíveis para o empreendedor destinada ao fechamento da operação de mineração, além das características hídricas e geomorfológicas da região. Portanto, apesar dos avanços tecnológicos e científicos na área, é necessário inspeção e monitoramento das estruturas descaracterizadas, de modo a garantir sua segurança e completa incorporação ao meio ambiente na qual está inserida.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A Figura 16 abaixo traz a seção transversal utilizada nas análises propostas. As informações foram compiladas de Mendes (2019), que utilizou a seção transversal em questão para realizar análises probabilísticas do potencial de falha por liquefação durante a vida útil da estrutura. Uma abordagem, portanto, complementar a que se propõe agora, em que se busca realizar estudos durante o processo de descaracterização de uma barragem dessa natureza.

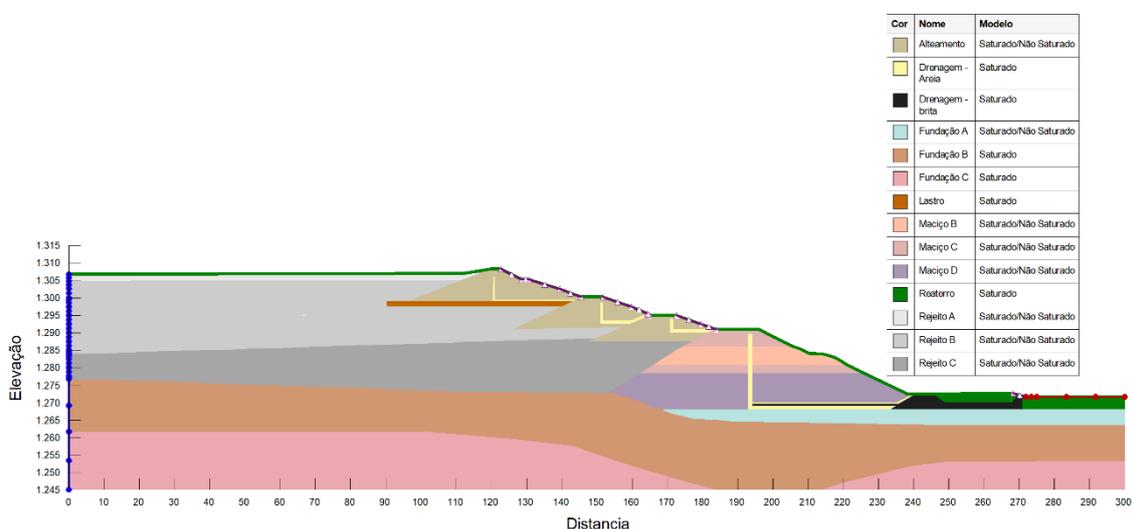


Figura 16 – Seção típica utilizada nas análises subsequentes.

As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam as propriedades de permeabilidade e resistência dos materiais de fundação, alteamentos, sistemas de drenagem e rejeitos, dados que servirão de parâmetros para as análises subsequentes. Tais dados foram inicialmente apresentados por Mendes (2019).

Tabela 1 – Dados de permeabilidade dos materiais.

Legenda	Material	Modelo	K_x (cm/s)	K_y/K_x	θ_s	θ_r
	Alteamento	Saturado/ Não saturado	$6,66.10^{-6}$	0,25	0,454	0,04
	Areia	Saturado	0,01	1	-	-
	Brita	Saturado	15	1	-	-
	Fundação A	Saturado/ Não saturado	$1,16.10^{-4}$	1	0,614	0,09
	Fundação B	Saturado	$6,39.10^{-7}$	1	-	-
	Fundação C	Saturado	1.10^{-6}	1	-	-
	Lastro	Saturado	0,01	1	-	-
	Maciço B	Saturado/ Não Saturado	1.10^{-5}	0,25	0,42	0,056
	Maciço C	Saturado/ Não Saturado	1.10^{-5}	0,25	0,42	0,056
	Maciço D	Saturado/ Não Saturado	1.10^{-5}	0,25	0,42	0,056
	Reaterro	Saturado	$4,3.10^{-5}$	1	-	-
	Rejeito A	Saturado/ Não Saturado	$9,11.10^{-5}$	1	0,528	0,08
	Rejeito B	Saturado/ Não Saturado	$4,22.10^{-6}$	1	0,576	0,14
	Rejeito C	Saturado/ Não Saturado	$2,25.10^{-4}$	1	0,507	0,04

Tabela 2 – Peso específico dos materiais.

Legenda	Material	γ (KN/m ³)	CV (γ)	σ (γ) (KN/m ³)
	Rejeito A	25,84	6%	1,55
	Rejeito B	25,51	6%	1,53
	Rejeito C	25,68	6%	1,54

Tabela 3 – Dados de resistência dos materiais.

Legenda	Material	γ (KN/m ³)	CV (γ)	σ (γ) (KN/m ³)	c' (kPa)	CV (c')	σ (c') (kPa)	ϕ (°)	CV (ϕ)	σ (ϕ) (°)
	Alteamento	17,9	6%	1,074	29	40%	11,6	22	10%	2,2°
	Areia	18,3	6%	1,098	0	40%	0,1	30	10%	3
	Brita	20,4	6%	1,224	0	40%	0,1	30	10%	3
	Fundação A	15,1	6%	0,906	3	40%	1,2	27	20%	5,4
	Fundação B	18,92	6%	1,135	12	40%	4,8	34	20%	6,8
	Lastro	21	6%	1,26	14	40%	5,6	23	10%	2,3
	Maciço B	19,5	6%	1,17	12	40%	4,8	25,5	20%	5,1
	Maciço C	22,52	6%	1,351	12	40%	4,8	35	20%	7
	Maciço D	20,91	6%	1,255	51	40%	20,4	35	20%	7
	Reaterro	13	6%	0,78	11	40%	4,4	33	10%	3,3

Os valores de razões de resistência de pico e liquefeitas utilizados para os rejeitos A, B e C, foram adotados conforme apresentado em Mendes (2019). Tais parâmetros foram calculados a partir de um banco de dados de resistência de ponta de ensaios CPT por meio das Equações 8 e 11. A Tabela 4 apresenta os valores de razões de resistência utilizados nas análises.

Tabela 4 – Razões de resistência de pico e liquefeita.

	Rejeito A	Rejeito B	Rejeito C
$\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{v0}}$	0,3896	0,2217	0,2229
$\frac{S_u^{liq}}{\sigma'_{v0}}$	0,3896	0,2217 ⁽¹⁾ /0,0467 ⁽²⁾	0,0479

⁽¹⁾ Para material acima do nível d'água.

⁽²⁾ Para material abaixo do nível d'água.

4.2. DEFINIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

Para a realização das análises numéricas almeçadas, inicialmente é preciso definir e executar etapas preliminares de grande importância no resultado final do estudo. A

primeira delas é a definição do modelo geométrico a ser utilizado. Para tal, foi necessário, com o uso do *software GetData Digitalizer*, digitalizar manualmente a seção típica apresentada por Mendes (2019), obtendo assim uma nuvem de pontos referenciados, cujo coordenadas podem ser exportados para uma planilha *excel* e importado no *Geostudio 2018 R2*, software utilizado para as análises.

Com a nuvem de pontos no *Geostudio 2018 R2*, foi possível reconstruir as regiões da barragem, conforme apresentado na Figura 16, e atribuir as propriedades dos materiais. Com a geometria definida, inicialmente foi realizado uma análise de estabilidade dos taludes e estudo de percolação da seção transversal, usando as ferramentas *SEEP\W* e *SLOPE\W* do *software*. Essa análise permitiu a obtenção da linha freática e do fator de segurança utilizados como ponto de partida para as análises subsequentes.

Foi adotado uma coluna d'água na cota de 1299,5 m, como condição de contorno, para a definição da linha freática. Com a posição da linha freática definida, foi possível atribuir diferentes valores de razão de resistência, conforme a Tabela 4, de acordo com a condição de saturação do material, para os grupos de análises liquefeitas. Foi também atribuído os valores de razão de resistência de pico para os grupos de análises de pico.

Por fim, a geometria da seção típica foi seccionada, nas regiões com predominância de rejeito, em paralelogramos de 10 m de comprimento por 2,5 m de altura, com inclinação dos taludes de 1:1. Isso permitiu simular as sucessivas escavações ocorridas durante o processo de descaracterização da estrutura, tanto no sentido de montante a jusante, quanto no de jusante a montante.

Portanto, foi obtido quatro grupo distintos de análises: análise de pico com escavação de montante a jusante; análise liquefeita com escavação de montante a jusante; análise de pico com escavação de jusante a montante e análise liquefeita com escavação de jusante a montante. As Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20 representam as geometrias utilizadas para os grupos de análises supracitados, respectivamente.

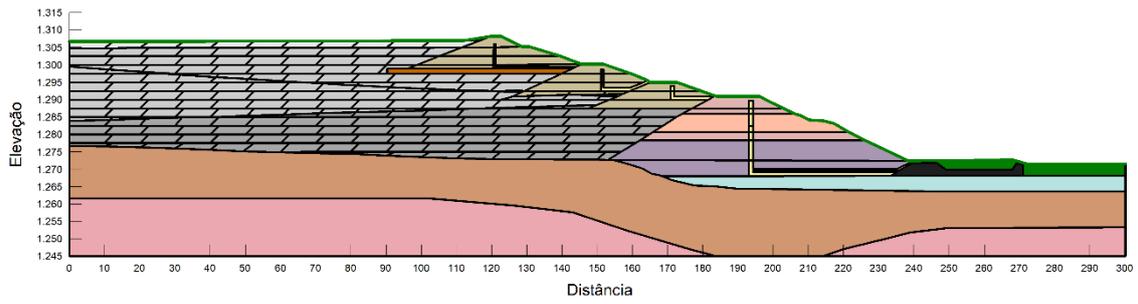


Figura 17 – Geometria utilizada para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

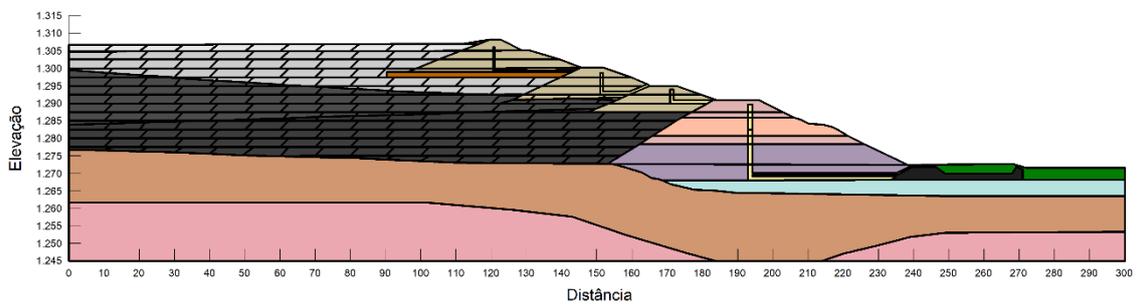


Figura 18 – Geometria utilizada para as análises liquefeitas com escavação no sentido de montante para jusante.

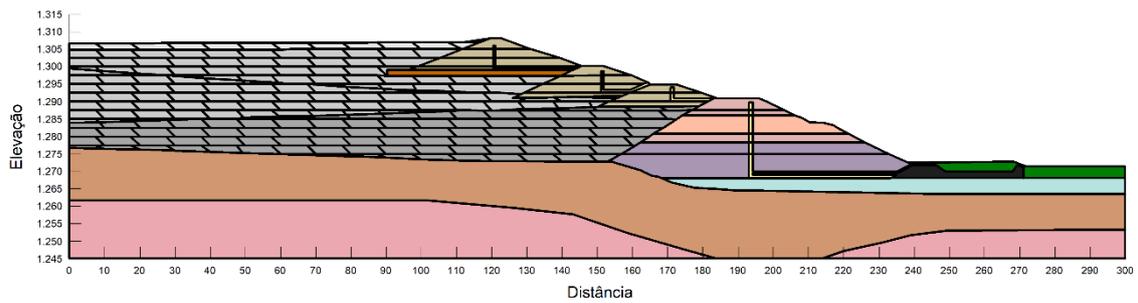


Figura 19 – Geometria utilizada para as análises de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

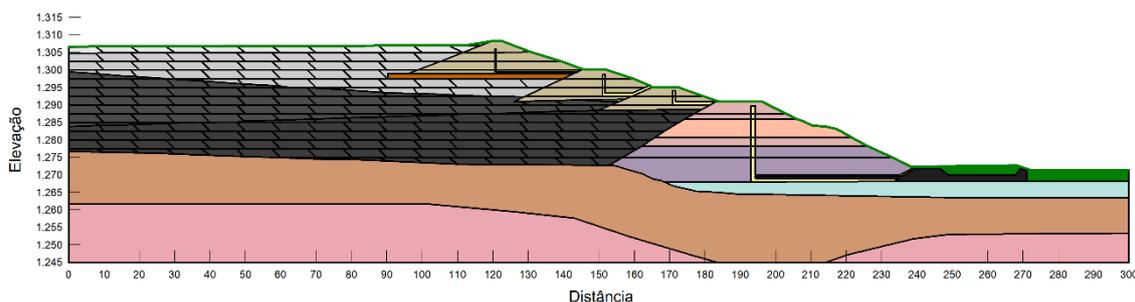


Figura 20 – Geometria utilizada para as análises liquefeitas com escavação no sentido de jusante para montante.

4.3. EXECUÇÃO DAS ANÁLISES

As primeiras rodadas de análises foram realizadas com o intuito de permitir verificação e calibração do modelo, além de definição de tamanho da malha a ser utilizada, método de cálculo, método de busca, tipo de superfície deslizante, dentre outros fatores. Esses parâmetros são importantes pois impactam diretamente na precisão dos resultados obtidos e no tempo das análises, portanto, otimizá-los logo no início evita inconsistências nos dados obtidos posteriormente e padroniza o processo de estudo.

Foi adotado o modelo de Morgenstern-Price e superfícies de pesquisas composta por Grade e Raios para as análises realizadas. Adotou-se uma grade com malha de 30 por 60 divisões, além de 50 incrementos de pesquisa para os raios. Em posse das análises de condições iniciais dos quatro grupos supracitados, o processo de descaracterização foi simulado, como já descrito, retirando os paralelogramos da geometria e realizando uma nova análise.

Ao todo, foram necessárias 200 análises para cada grupo para simular o processo total de descaracterização da seção transversal, totalizando 800 análises realizadas. A Figura 21 exemplifica como foi simulado o processo de descaracterização no *software*. O detalhe mostra a sequência de escavação da seção típica 1 até a seção típica 16.

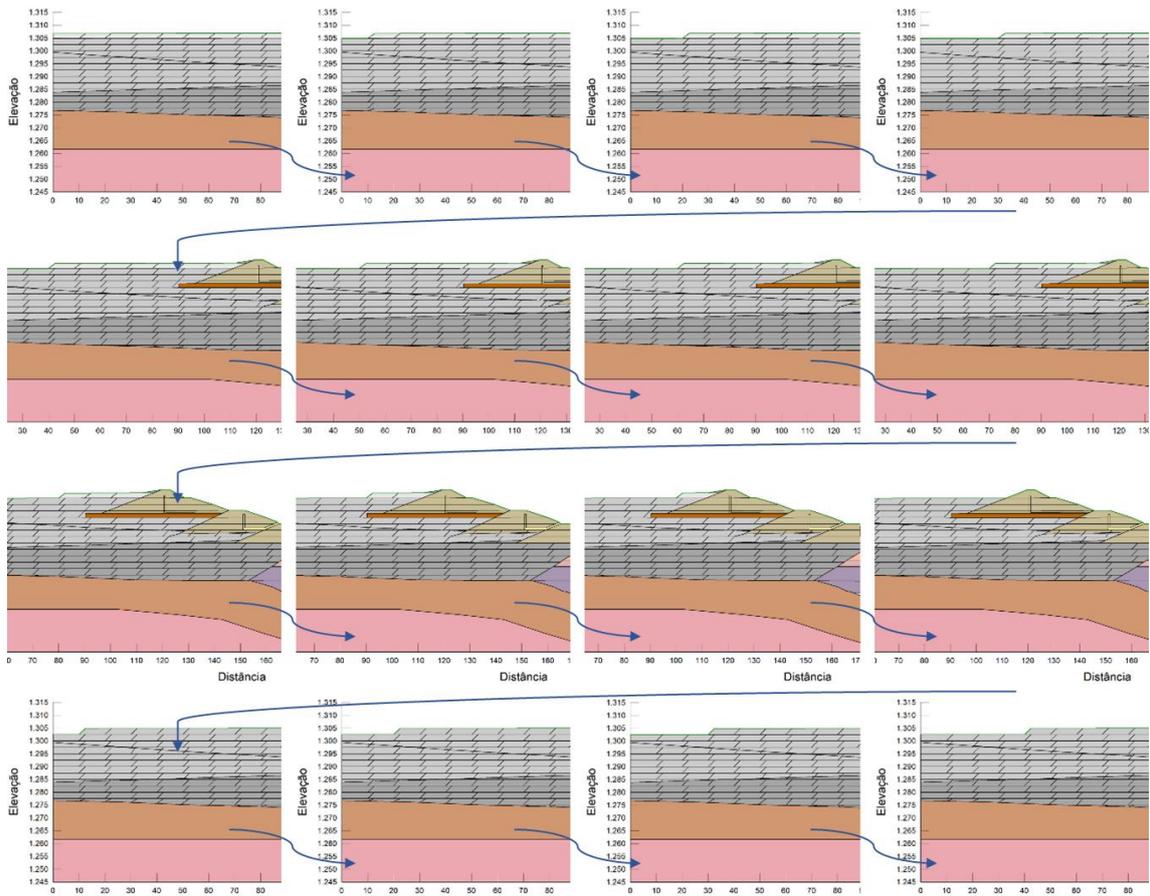


Figura 21 – Exemplo de sequenciamento de descaracterização com escavação de montante para jusante, ilustrando as seções típicas de 1 até 16

A Figura 21 exemplifica como se deu a simulação da escavação no *software*, na qual cada uma das vistas retrata uma seção típica distinta e sucessiva, em que uma região de 2,5 m de altura por 10 m comprimento e inclinação dos taludes de 1:1 é retirada. A imagem retrata a descaracterização ocorrendo de montante para jusante, porém o processo adotado para o sentido de jusante para montante é análogo. A seção típica 200 simula a completa descaracterização da barragem, em que se utiliza as propriedades de material de reaterro para preenchimento das regiões abaixo da topografia original.

Nas análises em que a cota de escavação estava abaixo de 1299,5 m, valor definido para a coluna d'água, foi considerado que o nível d'água coincide com a cota de escavação. Essa hipótese foi adotada pois sistemas de bombeamento devem ser responsáveis por manter a praça de trabalho seca. A razão de resistência dos materiais foi considerada constante durante todo o processo de descaracterização.

Concluídos tais estudos, inicia-se a etapa de tratamento e interpretação dos dados obtidos. A estabilidade de talude drenada na condição inicial permitirá a verificação e calibração do modelo, pois permite comparação com os resultados obtidos por Mendes (2019).

5. RESULTADOS

5.1. ANÁLISES INICIAIS

Inicialmente, foi realizado uma análise de surgência em regime permanente, com auxílio do *SEEP\W*, para definição da linha freática. A obtenção do nível d'água é fator condicionante para todas as análises subsequentes, pelo fato de que os parâmetros de resistência dos rejeitos nas análises liquefeitas variam conforme a fronteira delimitada pelo lençol freático. A Figura 22 traz os resultados obtidos.

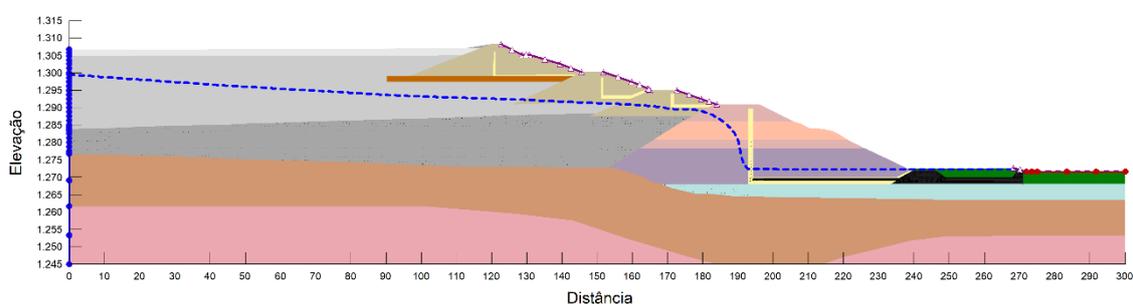


Figura 22 – Linha freática da seção típica estudada.

As Figura 23 e Figura 24 apresentam, respectivamente, os resultados para a seção típica inicial nas análises de pico e liquefeita, com geometria de partida considerando escavação no sentido de montante para jusante. Como já descrito, para as análises de pico foram utilizadas as razões de resistência de pico conforme definido por Mendes (2019). Na Figura 24 é possível observar que o rejeito alocado abaixo da linha freática está representado com cores diferentes, mais escuras. Nessas regiões as propriedades dos materiais foram substituídas imbuindo as razões de resistência liquefeita conforme definido por Mendes (2019).

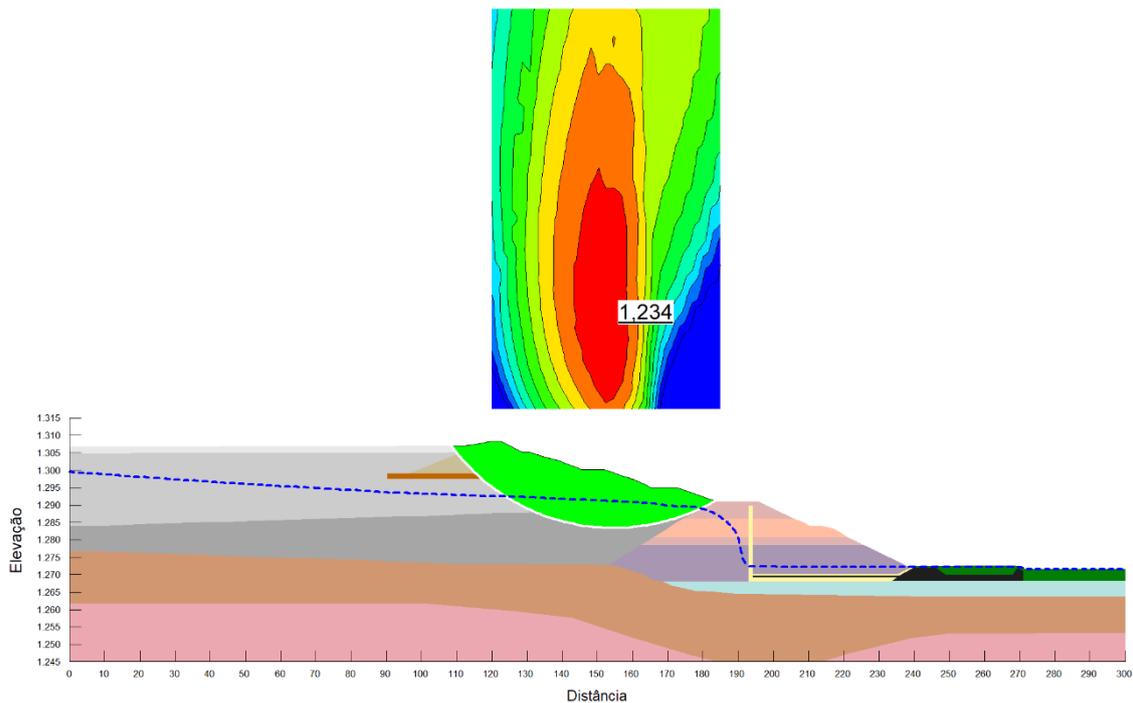


Figura 23 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

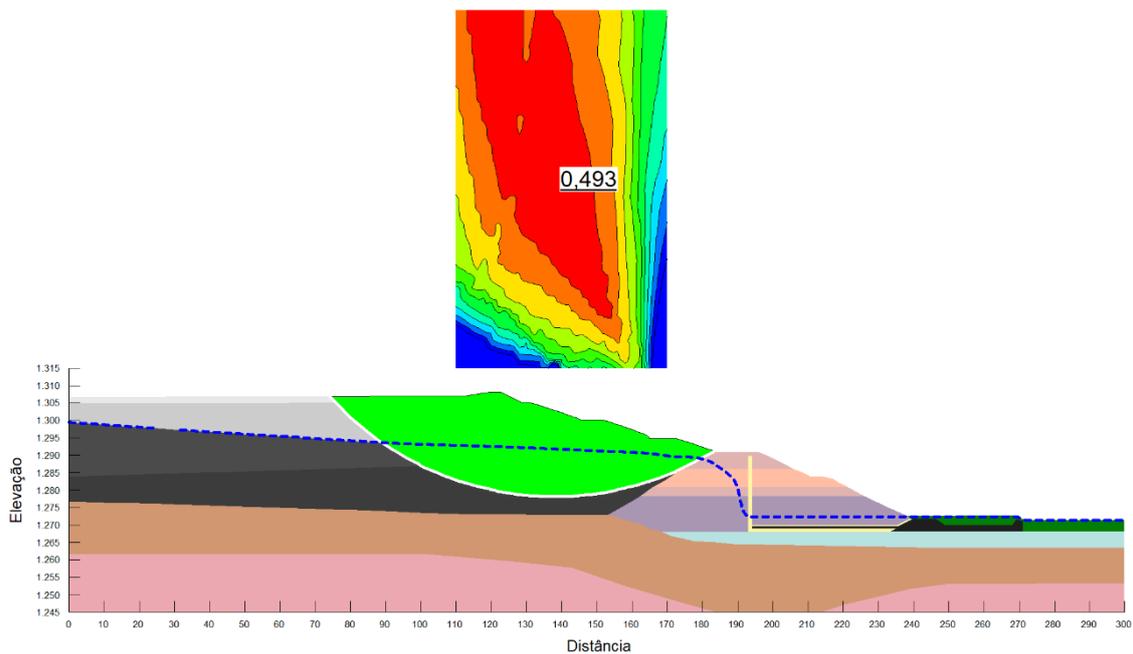


Figura 24 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

O Fator de segurança da análise de pico da Seção Típica 1 é de 1,23. Conforme definido pelo Método de Olson, não há possibilidade de gatilho que possa encadear um

processo de fluxo por liquefação. O Fator de segurança para a análise liquefeita, de 0,49, indica que, caso ocorresse esse gatilho, haveria ruptura da superfície crítica apresentada. Outro ponto inferido pelos resultados representados diz respeito à forma das superfícies de ruptura. A cunha de ruptura para a análise liquefeita é muito maior e profunda que a apresentada na análise de pico, com grande influência do material com razão de resistência mais baixa.

As Figura 25 e Figura 26 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para a seção típica inicial nas análises de pico e liquefeita. Nessas análises, foram utilizadas seções com conformação da geometria de partida considerando escavação no sentido de jusante para montante. Da mesma forma, os parâmetros para as análises foram atribuídos usando as razões de resistência de pico para a Figura 25 e razões de resistência liquefeita para a seção da Figura 26.

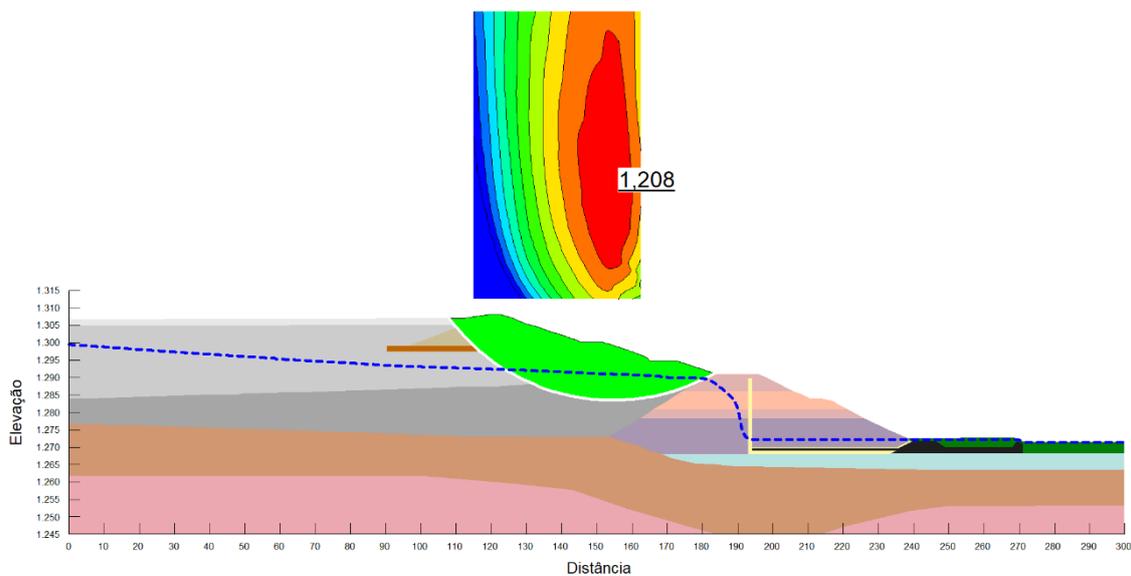


Figura 25 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

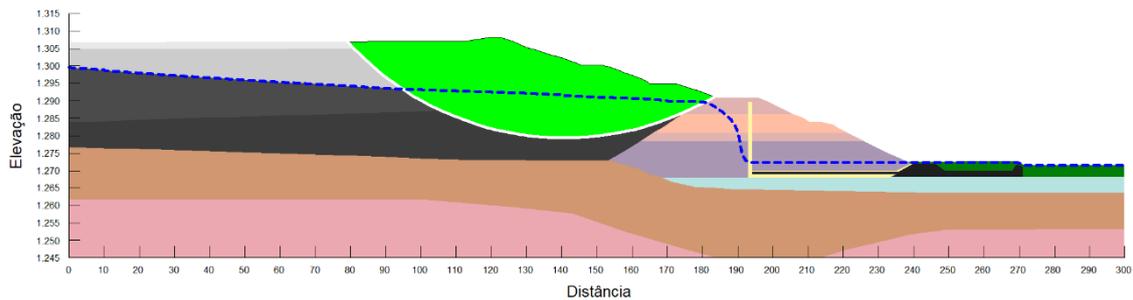
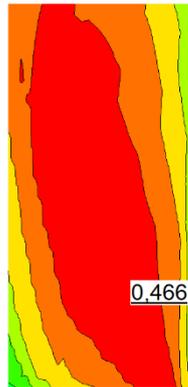


Figura 26 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 1 para a análise liquefeita com escavação no sentido de jusante para montante.

Observa-se que as superfícies de ruptura obtidas são bastante semelhantes às encontradas nas Figura 23 e Figura 24, porém, há pequenas divergências nos fatores de segurança, apesar das seções serem, em tese, iguais. Para as análises de pico, o Fator de segurança igual a 1,21 considerando escavação de jusante para montante, é ligeiramente menor que o Fator de segurança de 1,23 obtido para escavação de montante para jusante. Uma diferença de 2,2%. Nas análises liquefeitas, observa-se resultados semelhantes: O Fator de segurança de 0,47 encontrado para escavação de jusante para montante é 5,8% menor que o Fator de segurança igual a 0,49 observado para escavação de montante para jusante.

As divergências observadas ocorrem, principalmente, devido a preciosismos de cálculo do *software*. Entre uma análise e outra, a malha gerada e a geometria de Grade e Raios podem possuir pequenas alterações que ocasionam em resultados de cálculo distintos. Como os erros apresentados são muito baixos, infere-se que os resultados apresentados nas Figuras acima se revelam satisfatórios.

5.2. ESCAVAÇÃO DE MONTANTE PARA JUSANTE

5.2.1. ANÁLISES DE PICO

Com as análises das seções típicas iniciais realizadas, é possível começar a simulação do processo de descaracterização da estrutura. Para as análises de pico com escavação de montante para jusante, os resultados apresentaram, em sua maioria, fatores de segurança crescentes ao longo da simulação de escavação, embora haja uma estabilização dos resultados ao longo da mesma camada de escavação, em que não há mudanças expressivas nos resultados obtidos.

Por esse motivo, para condensar e otimizar a apresentação dos dados, será apresentada uma análise para cada camada do processo de descaracterização, com escavação até aproximadamente a metade da seção. Reitera-se que cada camada possui 2,5 m de altura e foi considerada uma escavação de 20 m de comprimento entre uma análise e outra. As Figura 27, Figura 28 e Figura 29 trazem os resultados obtidos até a cota de escavação de 1300 m.

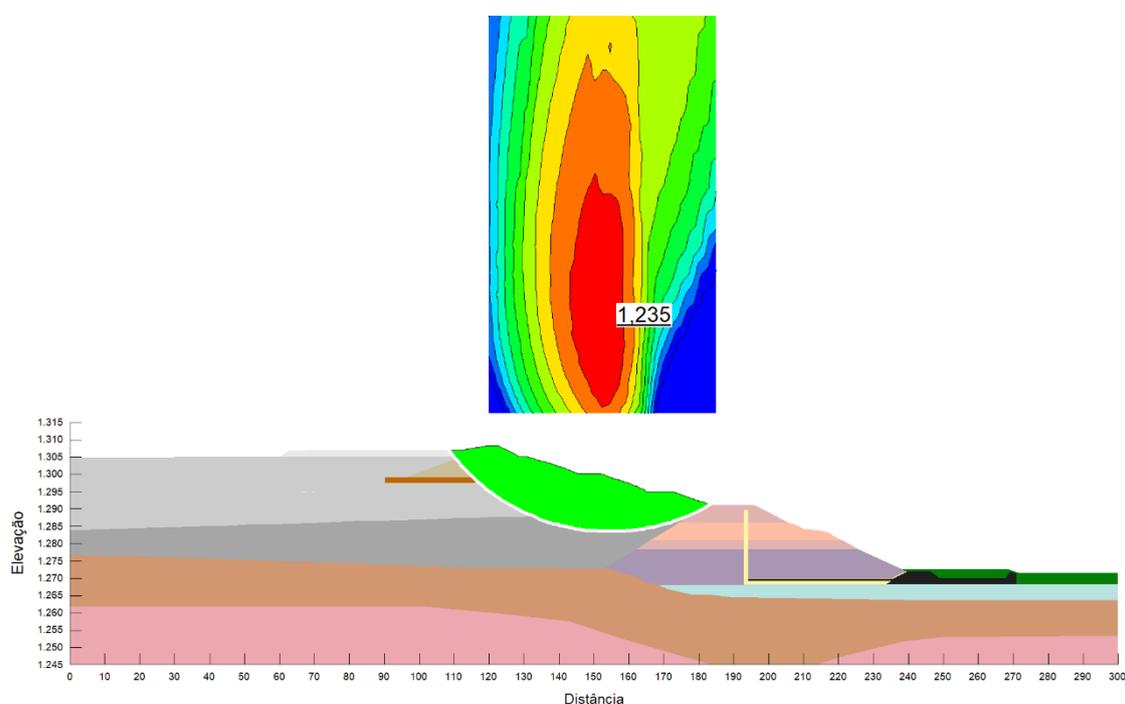


Figura 27 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

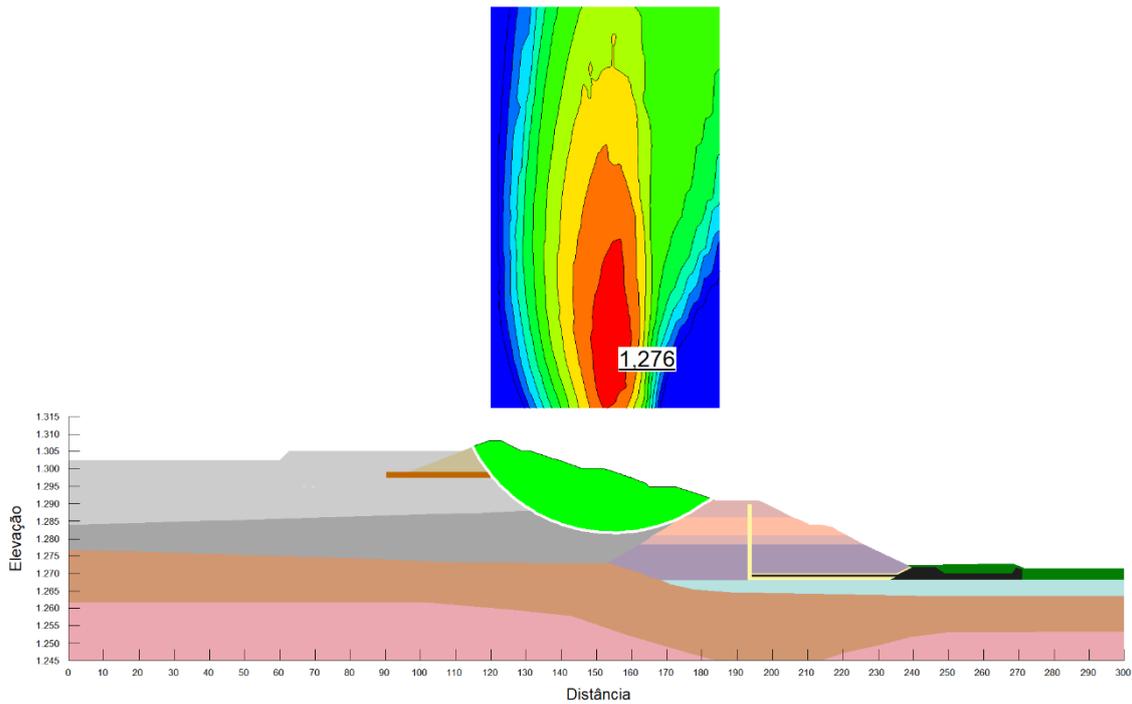


Figura 28 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

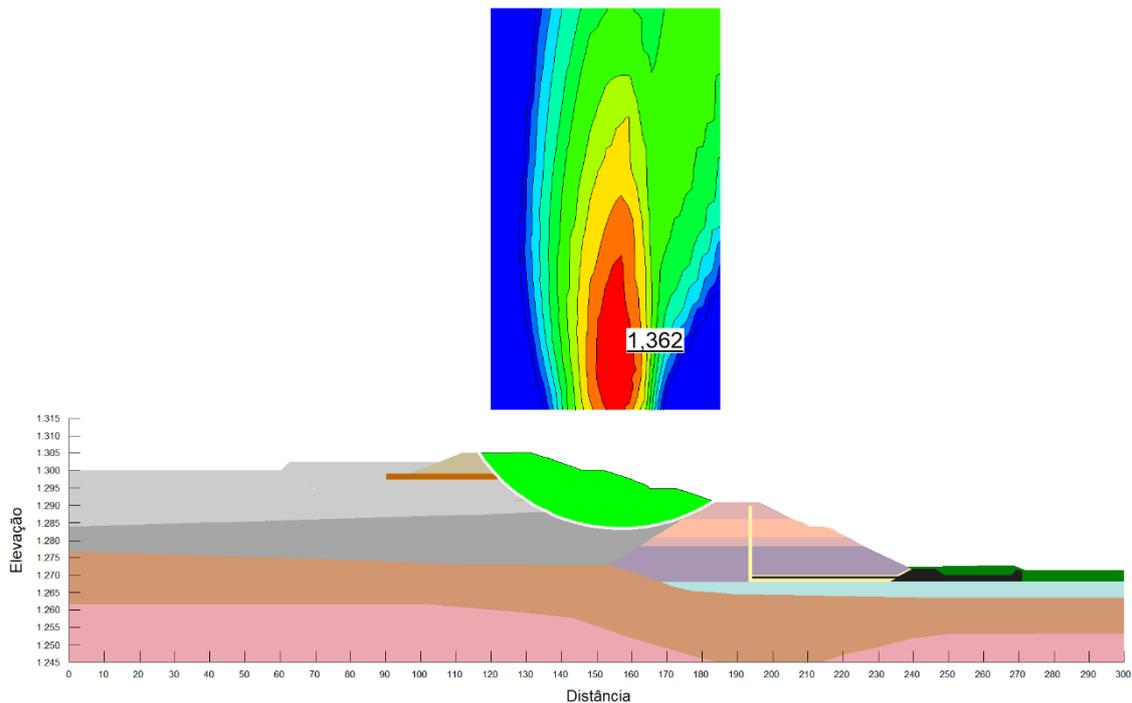


Figura 29 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

A Figura 27 traz os resultados obtidos com a retirada da camada de Rejeito A, mais superficial. O Fator de segurança obtido, igual a 1,24, é apenas 0,1% maior que o

valor encontrado para a seção típica inicial, o que indica que essa camada de material não possui influência significativa na estabilidade da estrutura.

A Figura 28 apresenta um Fator de segurança de 1,28, 3,3% maior que se comparado ao resultado apresentado para a elevação de 1305 m. Já a Figura 29 apresenta Fator de segurança de 1,36, um resultado 6,7% maior que o verificado para cota de 1302,5 m. Portanto, é possível verificar a tendência de melhora dos resultados obtidos ao longo do processo de descaracterização, indicando que a retirada de material gradativamente aumenta as condições de segurança global da estrutura, sob a ótica da estabilidade de taludes.

Outro ponto importante é quanto ao formato das superfícies de rupturas obtidas. Verifica-se que todas passam pela região de material de alteamento da barragem nas extremidades, com a porção central atingindo as camadas de rejeito que estruturam os alteamentos acima. As Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 apresentam os resultados obtidos até a elevação de 1285 m para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

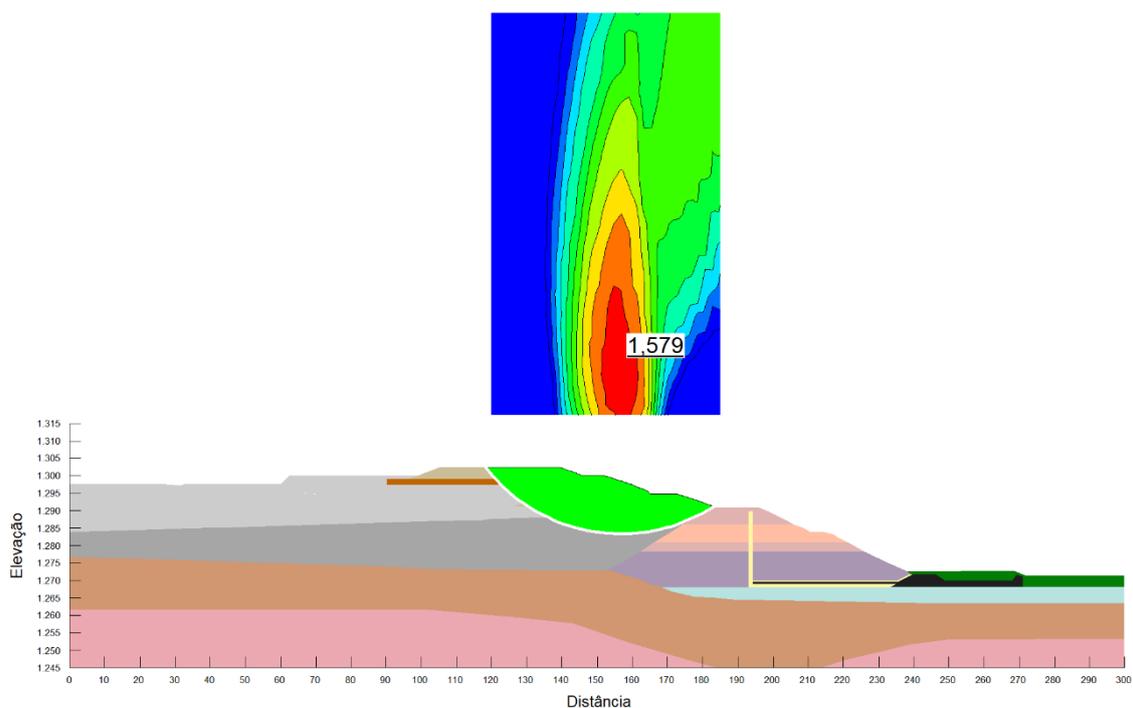


Figura 30 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

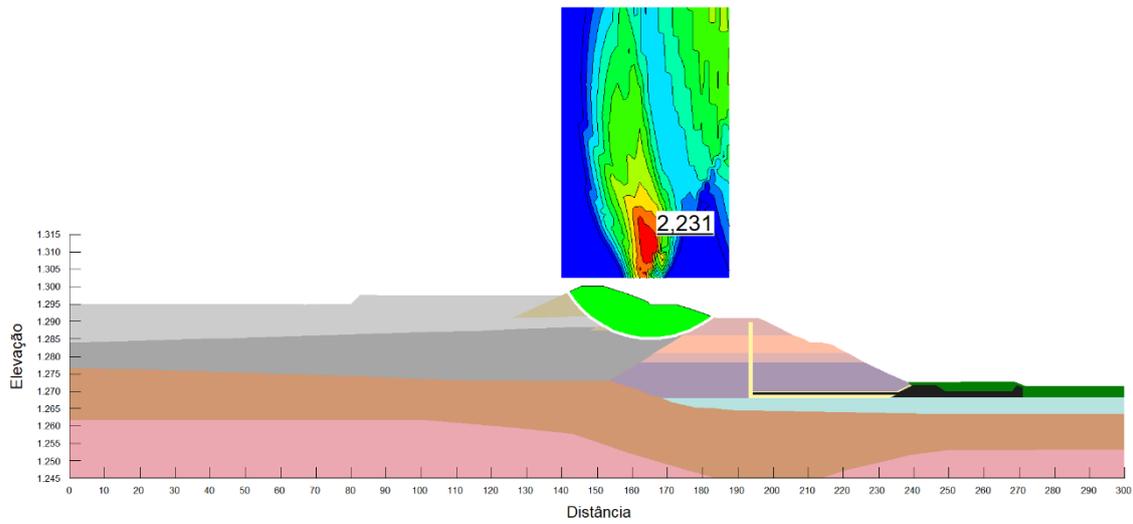


Figura 31 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

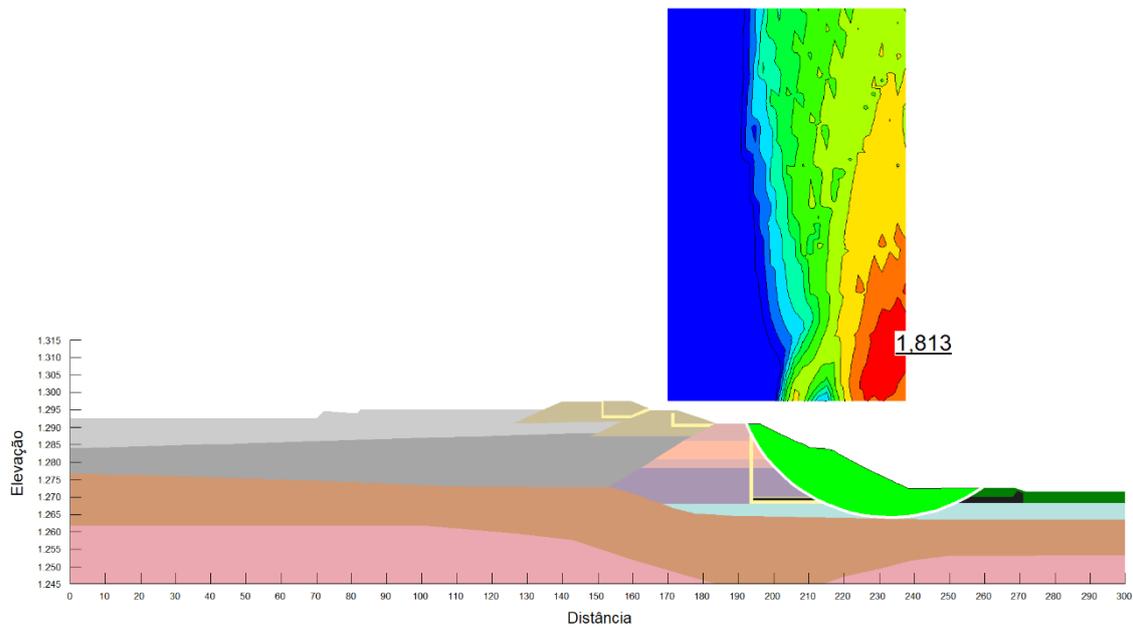


Figura 32 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

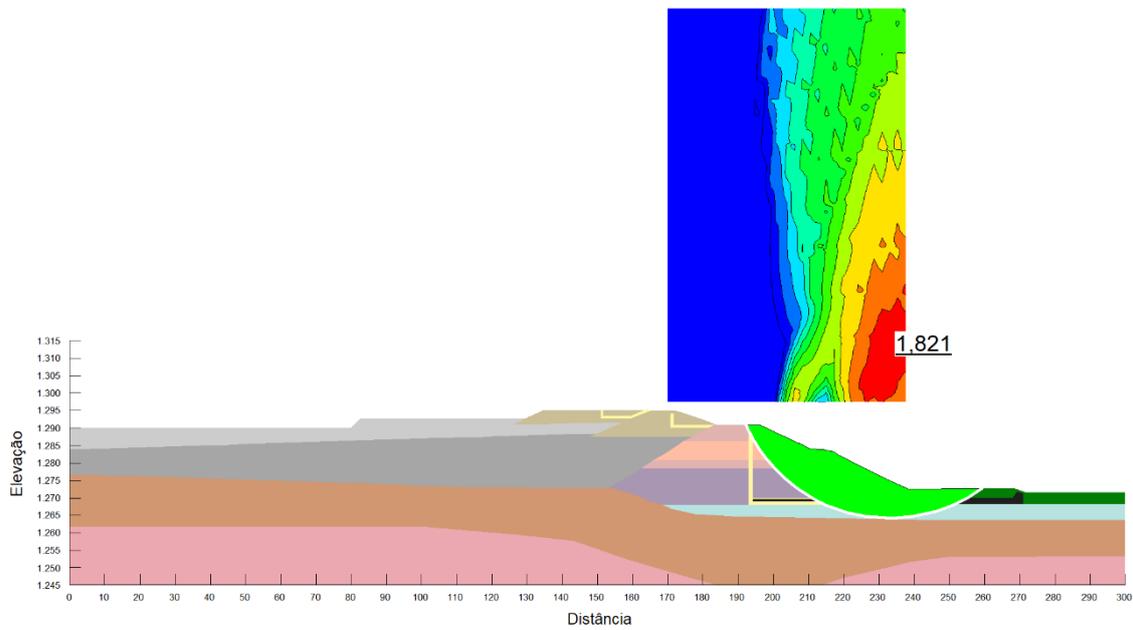


Figura 33 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

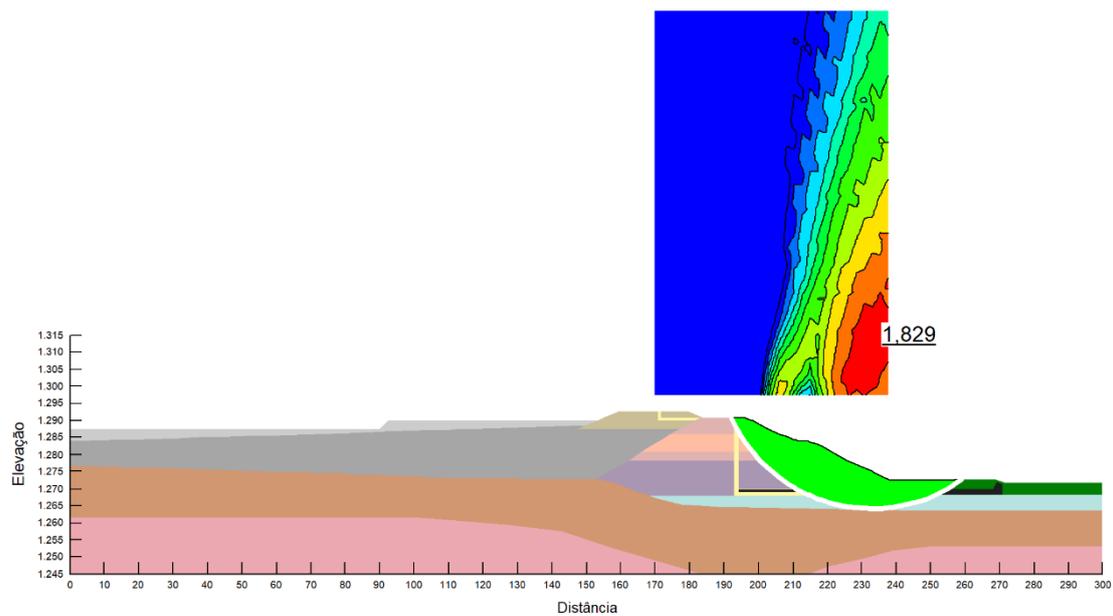


Figura 34 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

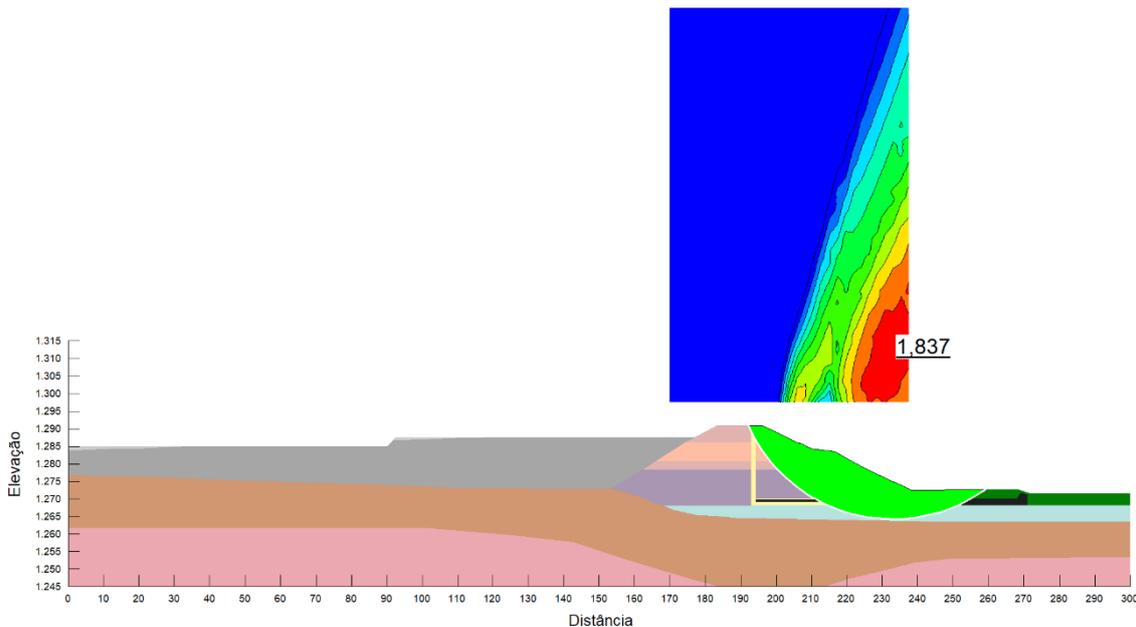


Figura 35 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

As Figura 30 e Figura 31 ainda apresentam superfície de ruptura delimitada pela região de alteamento da estrutura. A Seção Típica 41 possui fator de segurança igual a 1,58, 15,9% maior que o encontrado para Seção Típica 30, referente a escavação na cota de 1300 m.

O Fator de segurança apresentado na Figura 31, igual a 2,23, é expressivamente superior ao observado nas demais elevações, sendo 41,3% maior que o resultado encontrado para a Seção Típica 41. Verifica-se que, nessa camada, há uma superfície de ruptura pequena e restrita a região de alteamento, com abrangência de uma parcela pequena de região de rejeitos, portanto, o material de maior qualidade confere maior fator de segurança para esse formato de cunha de ruptura.

As Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 fornecem resultados em que a superfície de ruptura se desloca para a região do dique de partida, em que as cunhas de rupturas passam a ser menos profundas e mais alongadas. Os resultados obtidos, apesar de menores que os observados para a camada de escavação na cota de 1295 m, são maiores que o obtido na cota de 1297,5 m e, portanto, continuam apresentando aumento nos Fatores de segurança da estrutura ao longo da escavação, embora já haja uma tendência de estabilização do cenário.

A seção com escavação na cota de 1292,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,81, resultado 18,7% menor que na cota de 1295 m e 14,8% maior que da elevação de 1297,5 m. A seção com escavação na cota de 1290 m, 1287,5 m e 1285 m apresentam, respectivamente, Fatores de segurança de 1,821, 1,829 e 1,837, um acréscimo de 0,4% entre uma camada e outra, o que denota uma estabilização dos resultados obtidos.

As Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40 e Figura 41 apresentam os resultados obtidos até a completa descaracterização da estrutura, para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

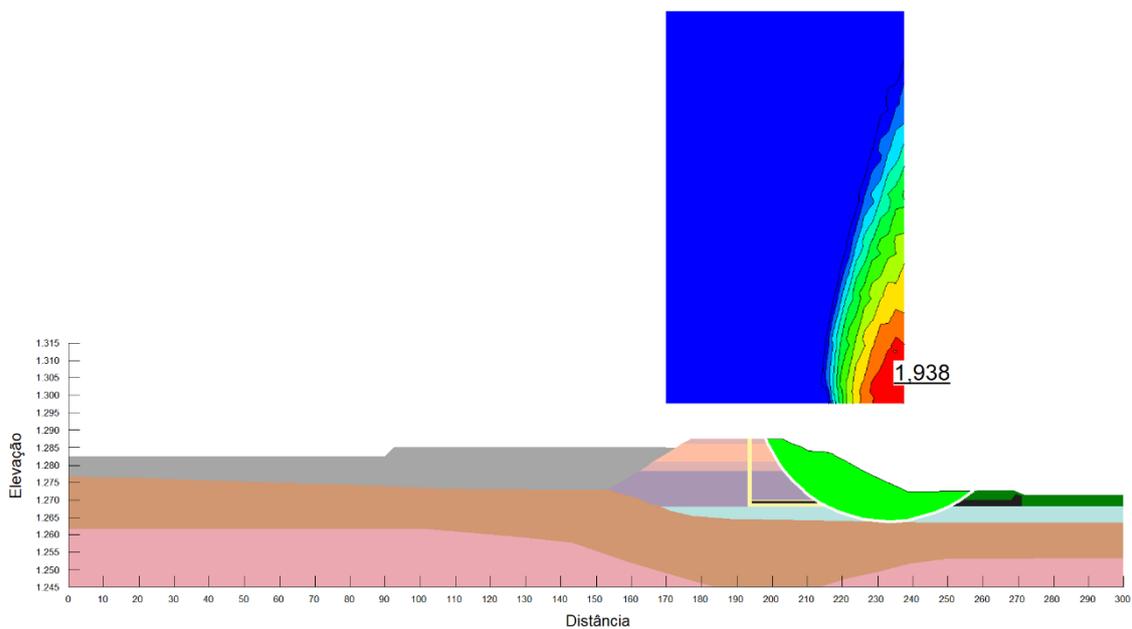


Figura 36 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

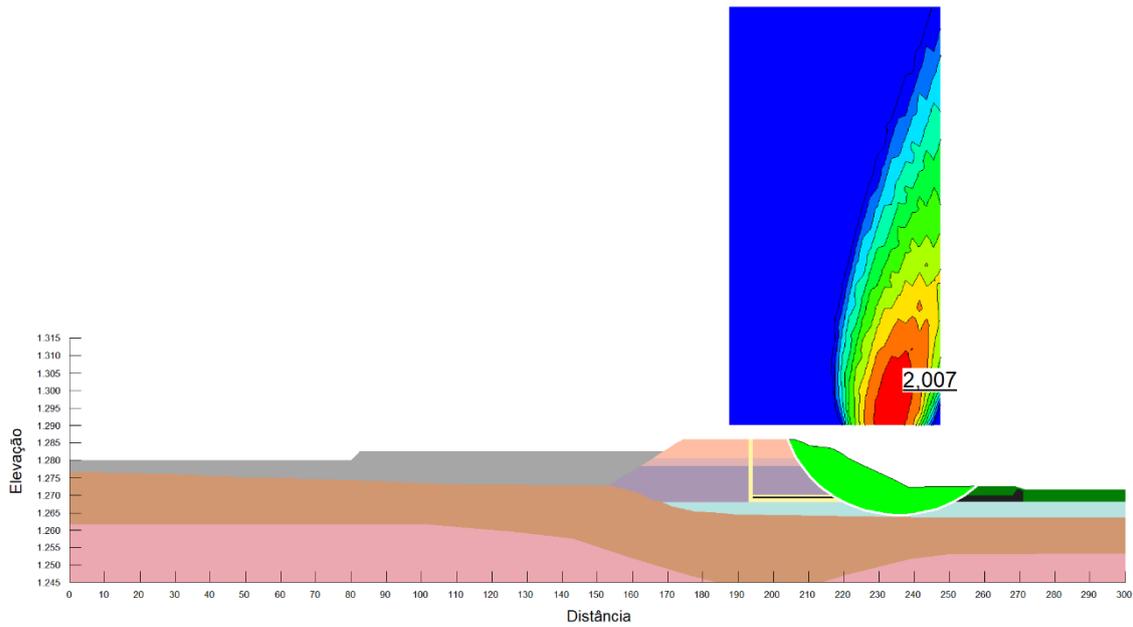


Figura 37 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

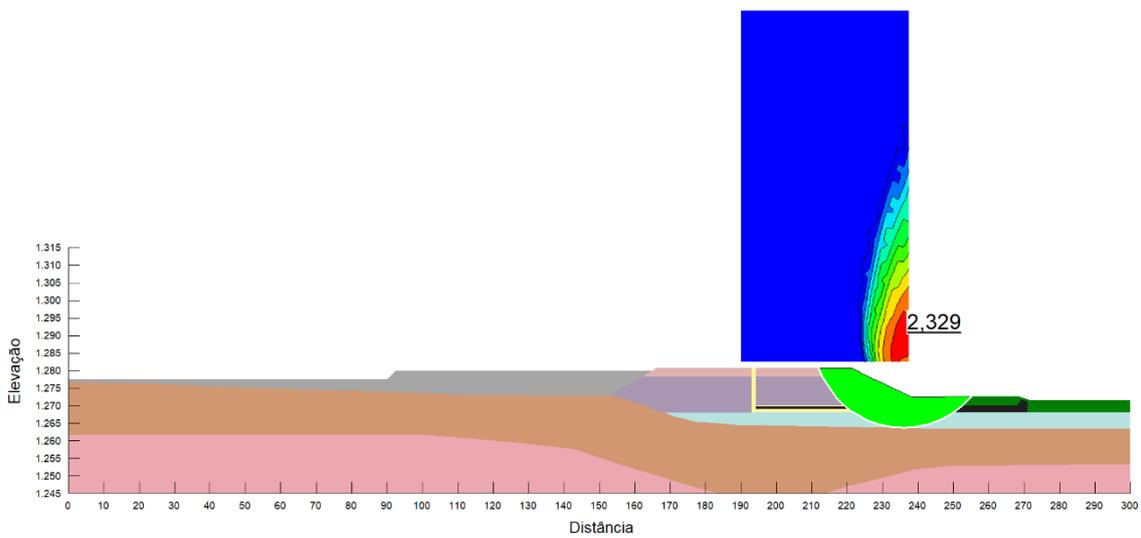


Figura 38 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

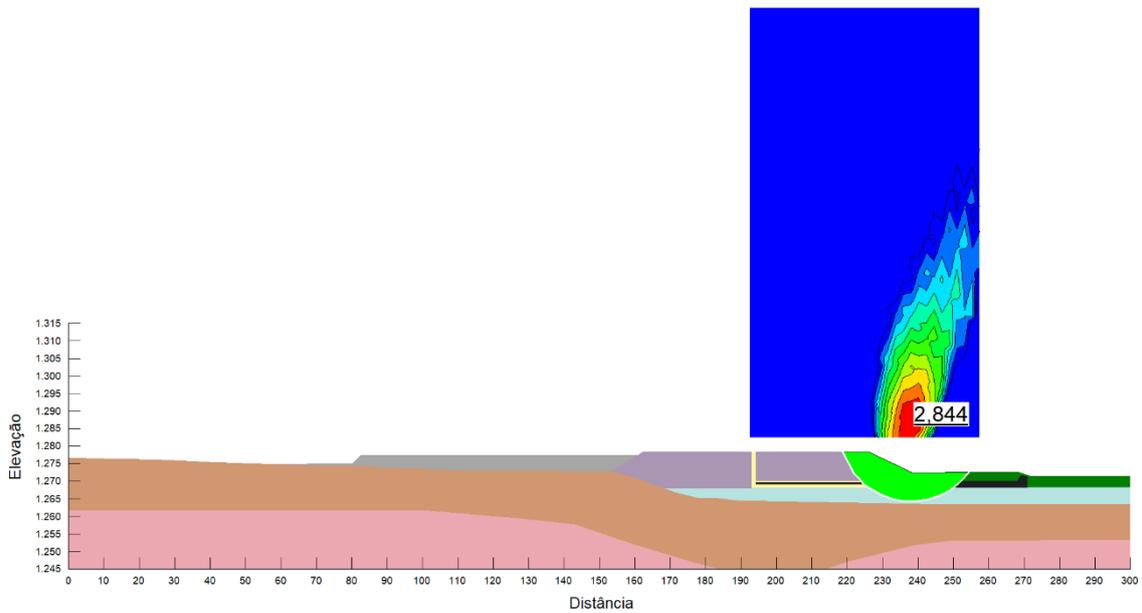


Figura 39 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

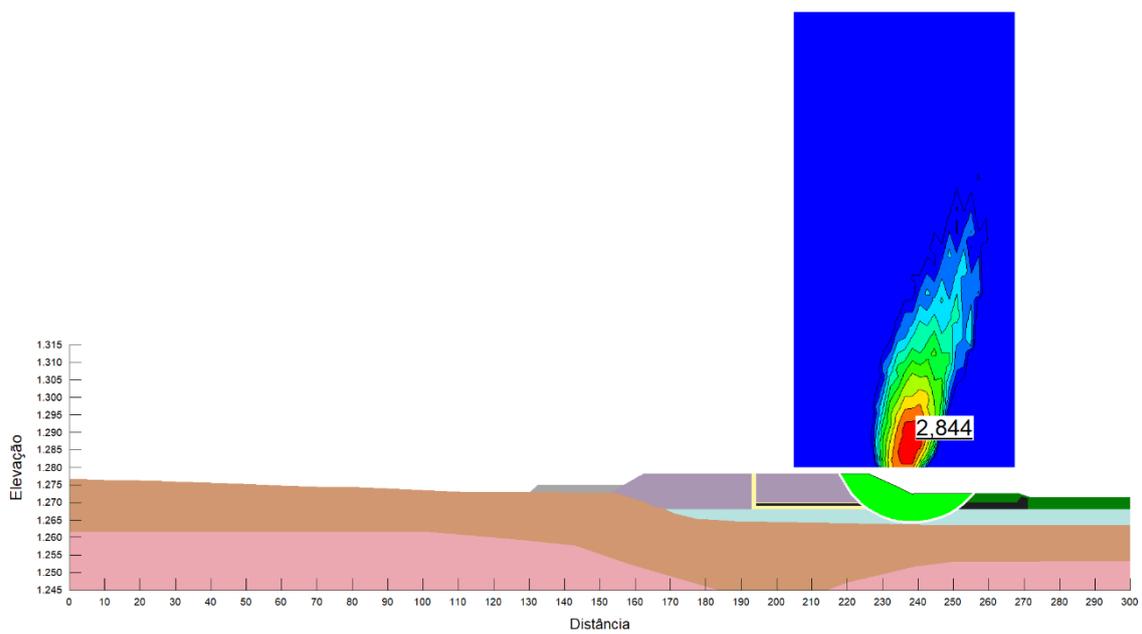


Figura 40 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

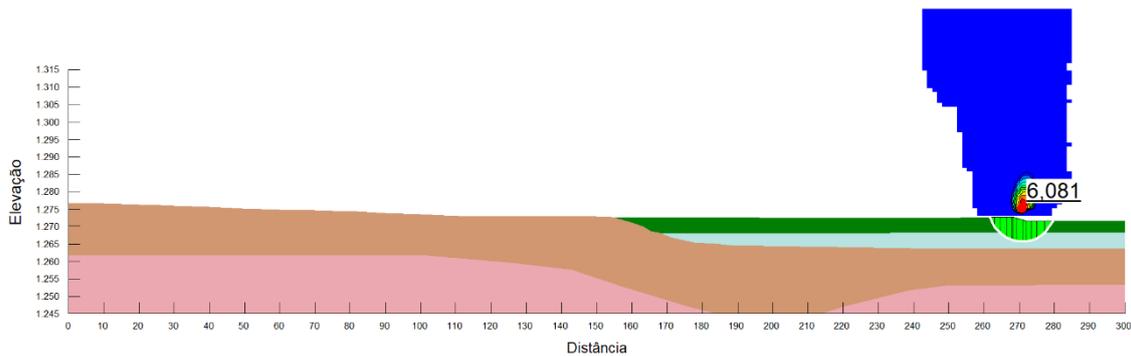


Figura 41 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

Conforme tendência estabelecida nas últimas análises supracitadas, os resultados apresentados pelas Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam fatores de segurança mais elevados e relativamente com valores estabilizados. O que se verifica nas análises realizadas para essa camada é que a superfície de ruptura fica toda contida no dique de partida, portanto a resistência do rejeito não influencia nos fatores de segurança.

A seção com escavação na cota de 1282,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,94, 5,5% maior que a da cota de 1285 m. Já na cota de 1280 m, verifica-se Fator de segurança de 2,01, 3,6% maior que o obtido a elevação anterior. A elevação de 1277,5 m possui Fator de segurança de 2,33, 16% maior que da cota anterior e as elevações 1275 m e 1272,5 m apresentam Fator de segurança igual a 2,84, 22,1% maior que da cota de 1277,5 m. O aumento gradativo observado nas últimas camadas ocorre devido a diminuição da altura do dique de partida devido a escavação, o que gera o abatimento da inclinação global dos taludes.

A Figura 41 apresenta a formatação final do terreno pós descaracterização, em que foi utilizado material de reaterro para preenchimento das regiões descaracterizadas. O Fator de segurança, por se tratar, agora, de um terreno reincorporado a topografia local, é extremamente alto, com o maior talude apresentando um valor de FS de 6,08.

5.2.2. ANÁLISES LIQUEFEITAS

Finalizada as análises de pico com escavação de montante para jusante, inicia-se as análises liquefeitas para a mesma metodologia de descaracterização. As análises subsequentes também apresentaram, em sua maioria, fatores de segurança crescentes ao longo da simulação de escavação, embora haja uma estabilização dos resultados ao longo da mesma camada de escavação.

Para esse grupo de análises, foram utilizadas as razões de resistência liquefeita para os rejeitos localizados abaixo da linha freática da seção típica inicial da estrutura. Mesmo com a atualização da linha freática conforme ocorre o processo de descaracterização, a razão de resistência não é reajustada pois adota-se que, por se tratar de um processo relativamente rápido, não há tempo hábil para completa dissipação da água desse material, podendo, portanto, ainda considerá-lo saturado conforme definição da linha piezométrica de partida. Novamente, cada camada possui 2,5 m de altura e foi considerada uma escavação de 20 m de comprimento entre uma análise e outra. As Figura 42, Figura 43 e Figura 44 trazem os resultados obtidos até a cota de escavação de 1300 m para as análises liquefeitas.

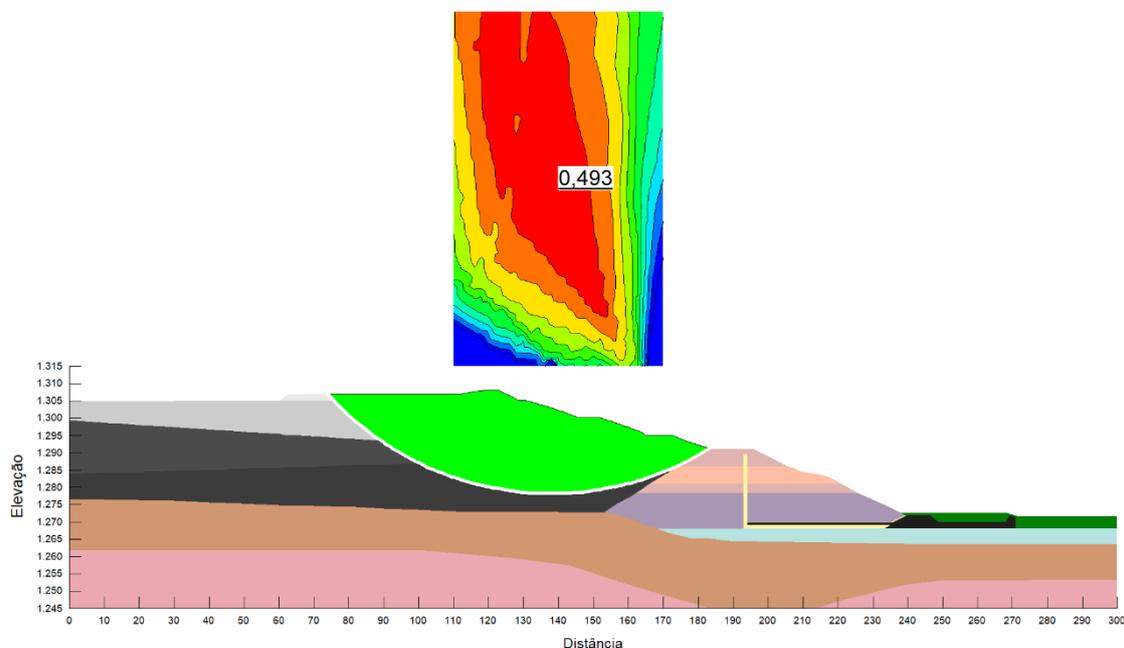


Figura 42 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

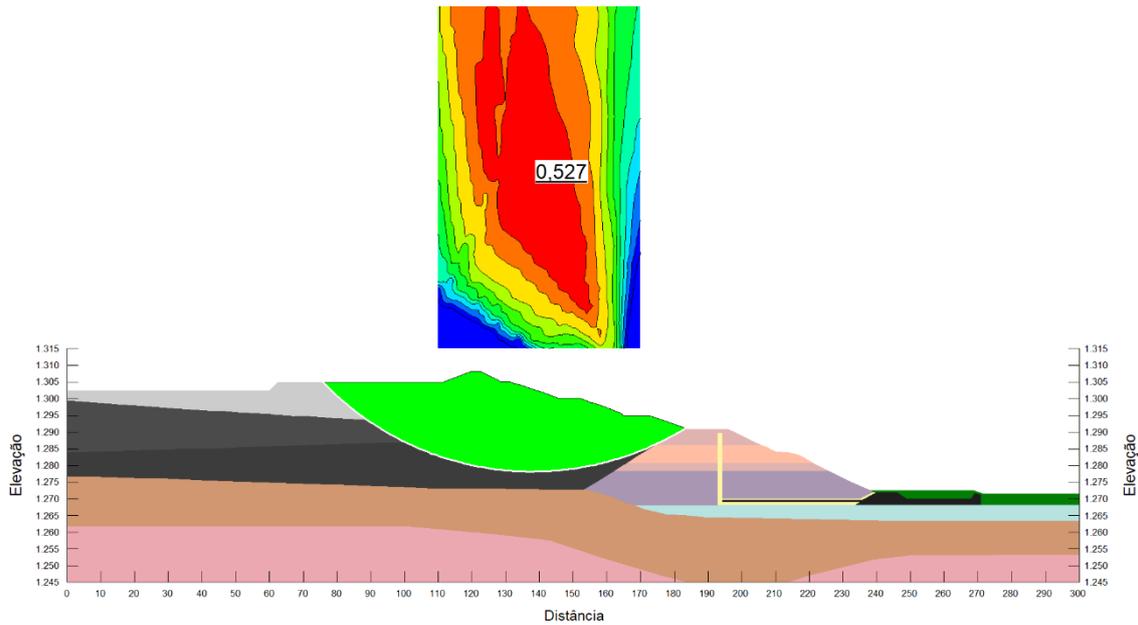


Figura 43 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

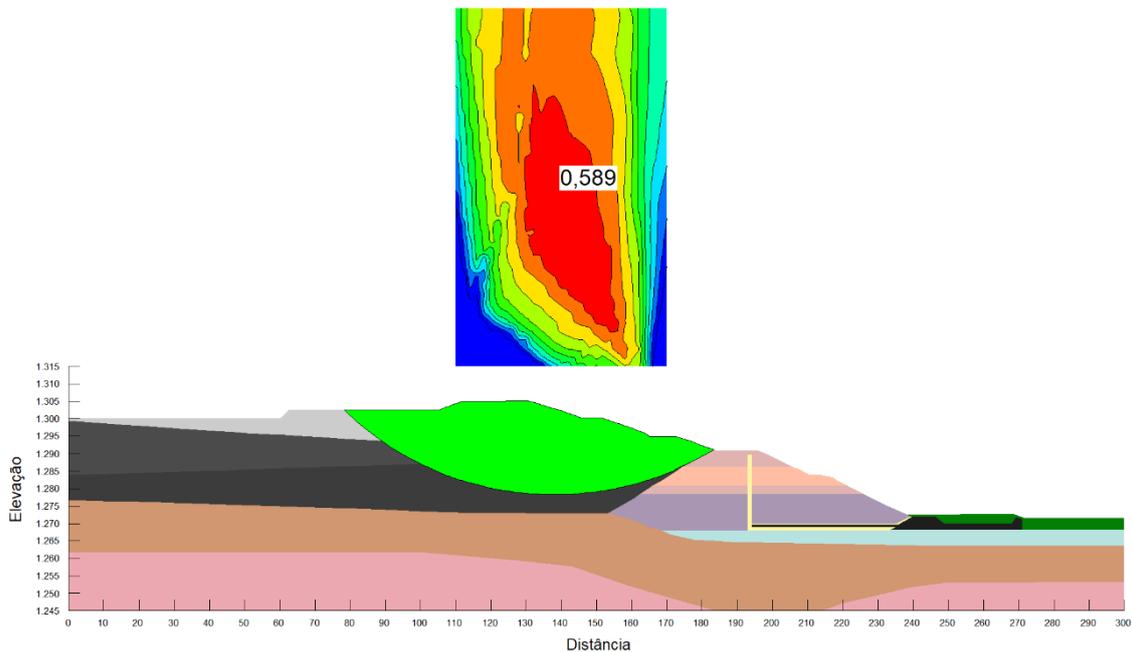


Figura 44 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

A Figura 42 traz os resultados obtidos para a Seção Típica 7. O Fator de segurança obtido, igual a 0,49, é igual ao valor encontrado para a seção típica inicial, o que indica que a camada de Rejeito A não possui influência significativa na estabilidade da estrutura.

Outro fator importante é que a alteração da razão de resistência de pico para a liquefeita gera uma redução de 60,1% no Fator de segurança para as seções típicas correspondentes, o que reforça a importância de monitorar e controlar eficientemente os parâmetros de resistência do material acondicionado na barragem para a segurança global da estrutura.

A Figura 43 apresenta um Fator de segurança de 0,53, 6,9% maior que se comparado ao resultado apresentado para a elevação de 1305 m. A Figura 44 apresenta Fator de segurança de 0,56, um resultado 6,5% maior que o verificado para cota de 1302,5 m.

Portanto, também para as análises liquefeitas verifica-se a tendência de melhora dos resultados obtidos ao longo do processo de descaracterização, indicando que a retirada de material gradativamente aumenta a segurança da estrutura para estabilidade dos taludes.

Para a Seção Típica 18 e Seção Típica 30, os Fatores de segurança liquefeitos, se comparados aos de pico, são 58,7% e 58,8% menores, respectivamente. Verifica-se, portanto, que para as camadas mais iniciais, o avanço da descaracterização não influencia significativamente numa alteração entre as diferenças entre os resultados de pico e liquefeitos.

Quanto ao formato das superfícies de rupturas obtidas, verifica-se que todas passam pela região de material de alteamento da barragem nas extremidades, com a porção central atingindo as camadas de rejeito que estruturam os alteamentos acima. Verifica-se também que as superfícies das análises liquefeitas são mais profundas, em relação as de pico, atingindo cotas inferiores de rejeito. As Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50 apresentam os resultados até a elevação de 1285 m para as análises liquefeitas com escavação no sentido de montante para jusante.

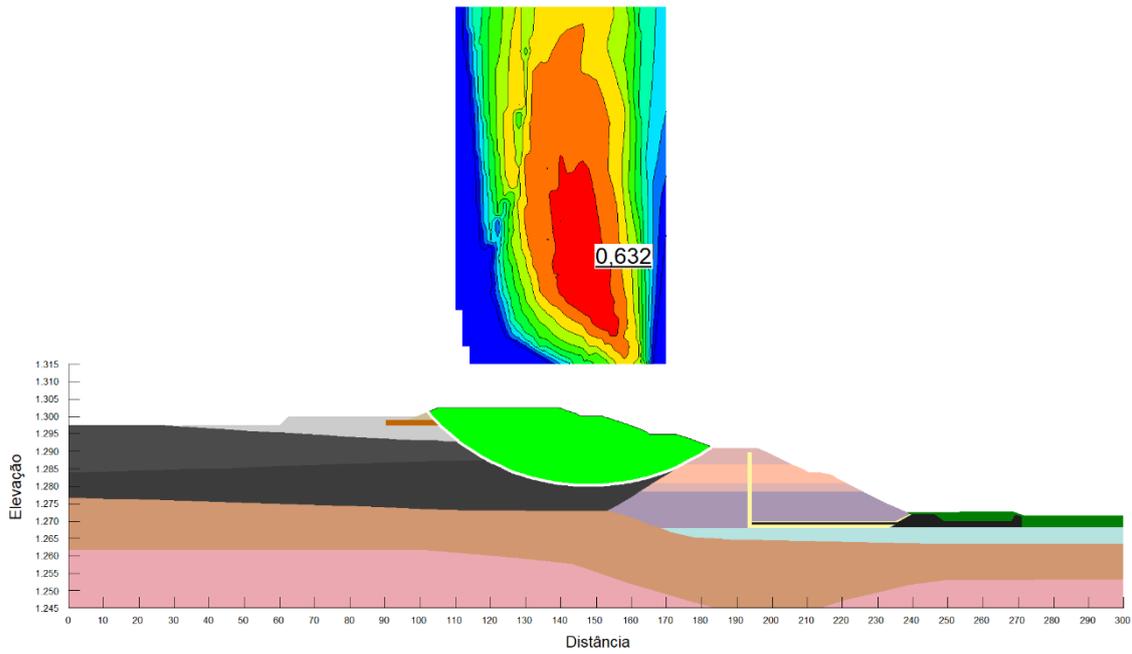


Figura 45 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

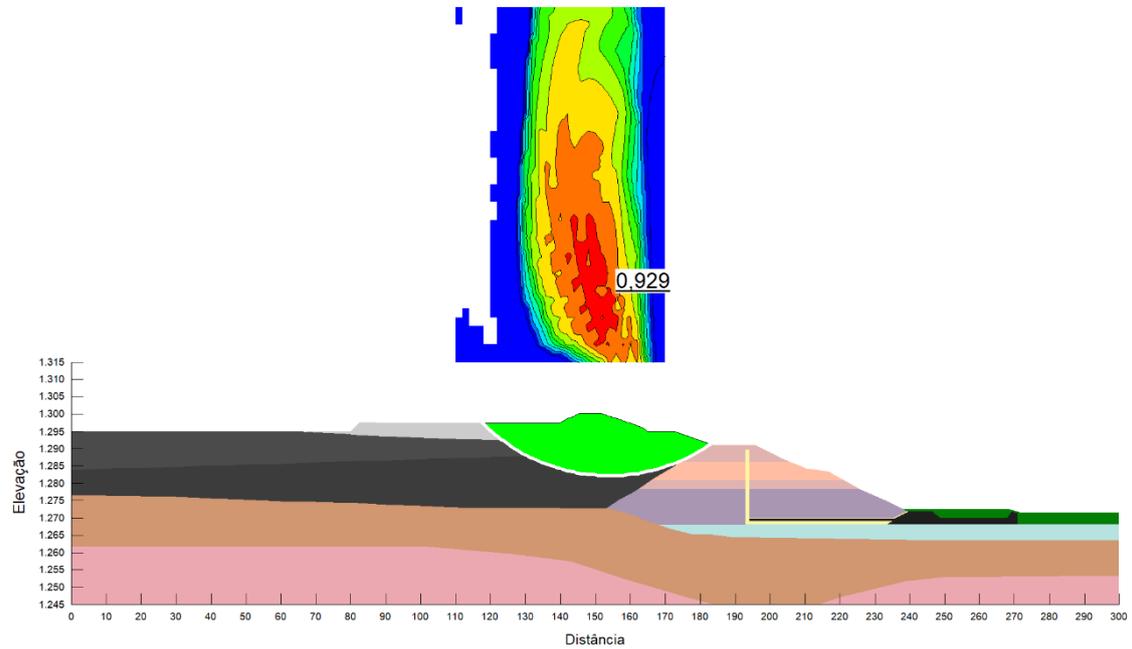


Figura 46 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

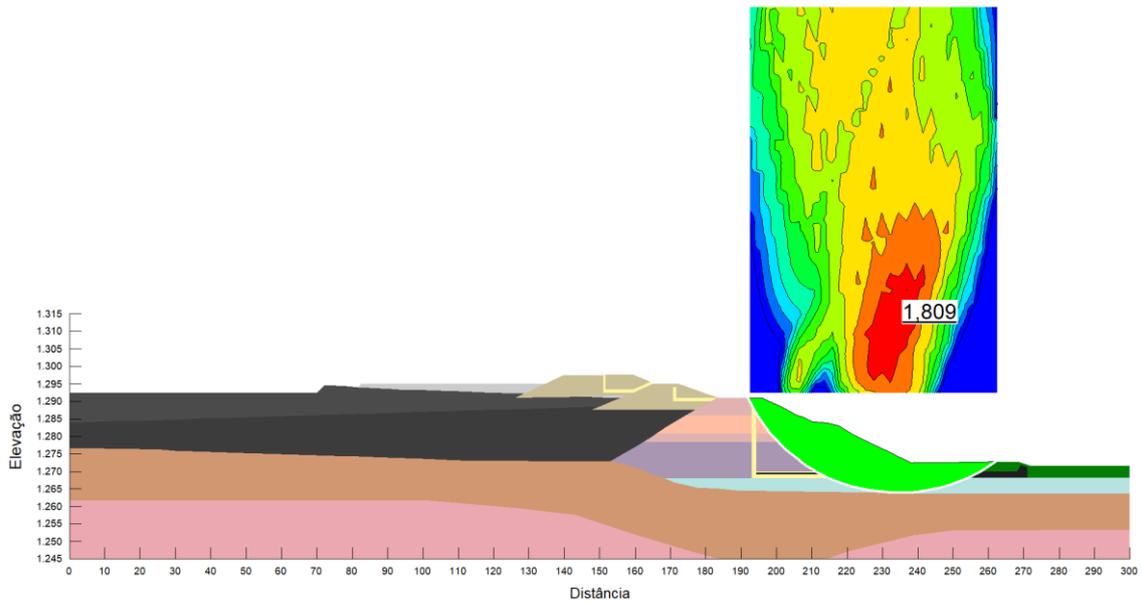


Figura 47 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

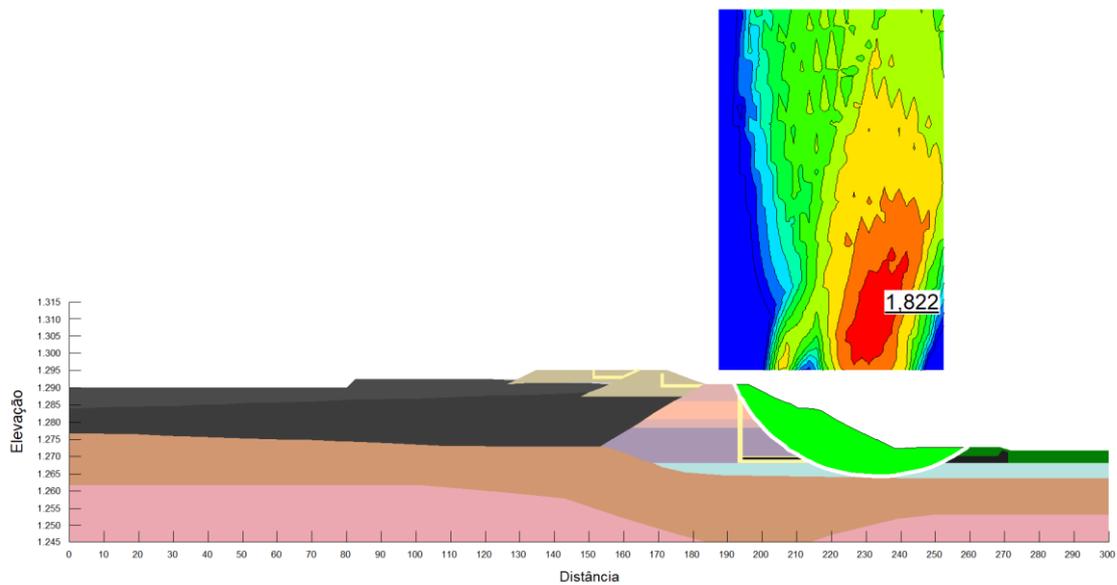


Figura 48 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

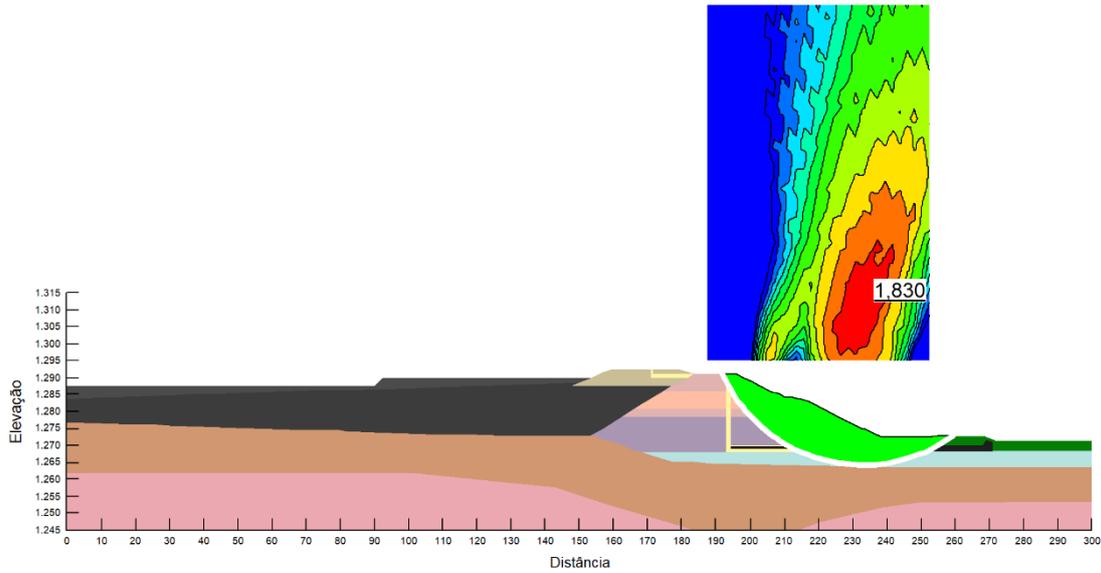


Figura 49 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

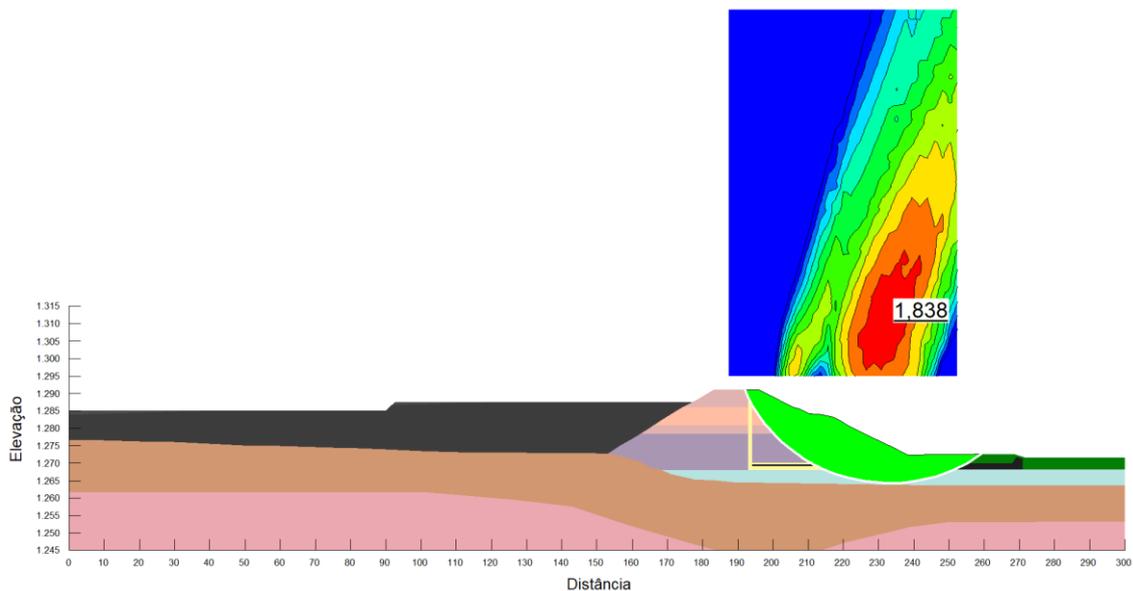


Figura 50 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

As Figura 45 e Figura 46 ainda apresentam superfície de ruptura delimitada pela região de alteamento da estrutura. A Seção Típica 41 possui fator de segurança igual a 0,63, 12,7% maior que o encontrado para Seção Típica 30, referente a escavação na cota de 1300 m. O resultado é 60% menor, se comparado com a análise de pico da mesma seção típica.

O Fator de segurança apresentado na Figura 46, igual a 0,93, seguindo a tendência apresentada nas análises de pico, é expressivamente superior ao observado nas demais elevações, sendo 47% maior que o resultado encontrado para a Seção Típica 41. O resultado obtido é 58,4% menor que o Fator de segurança para a análise de pico da Seção Típica 54, ainda demonstrando um cenário de estabilidade entre as análises de pico e liquefeita e reforçando a relevância das propriedades do rejeito para a estabilidade da estrutura.

Nessas seções, ainda se observam superfícies de rupturas localizadas na região da crista da barragem, com alta predominância de material de rejeito na região delimitada por a cunha de ruptura.

Na Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50, verifica-se que as superfícies de ruptura se desloca para a região do dique de partida, em que as cunhas de rupturas passam a ser menos profundas e mais alongadas. Os resultados obtidos revelam um aumento muito grande de resistência entre a Seção Típica 54 e Seção Típica 68, que é quando ocorre o deslocamento da superfície de ruptura. Nas demais análises, já se observa uma tendência de estabilização dos fatores de segurança apresentados.

A seção com escavação na cota de 1292,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,81, resultado 94,7% maior que da elevação de 1295 m. A seção com escavação na cota de 1290 m, 1287,5 m e 1285 m apresentam, respectivamente, Fatores de segurança de 1,82, 1,83 e 1,84.

Entre as camadas 1292,5 m e 1290 m há um acréscimo de 0,7%. Já entre as camadas de 1290 m e 1287,5 m e entre 1287,5 m e 1285 m há um acréscimo de 0,4%, o que denota uma estabilização dos resultados obtidos.

A análise liquefeita da Seção Típica 68 apresenta Fator de segurança 0,2% menor que da análise de pico. Já as Seções Típicas 83, 99 e 115 apresentam resultados 0,1% maiores se comparados aos de pico.

Diferenças tão baixas indicam que o deslocamento da superfície de ruptura faz com que a resistência do rejeito não mais influencie na estabilidade dos taludes. Portanto, a cunha de ruptura passa a estar contida na região do dique e o valor da razão de resistência não é mais condição crítica para a estrutura.

As Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam os resultados obtidos até a completa descaracterização da estrutura, para as análises liquefeitas com escavação no sentido de montante para jusante.

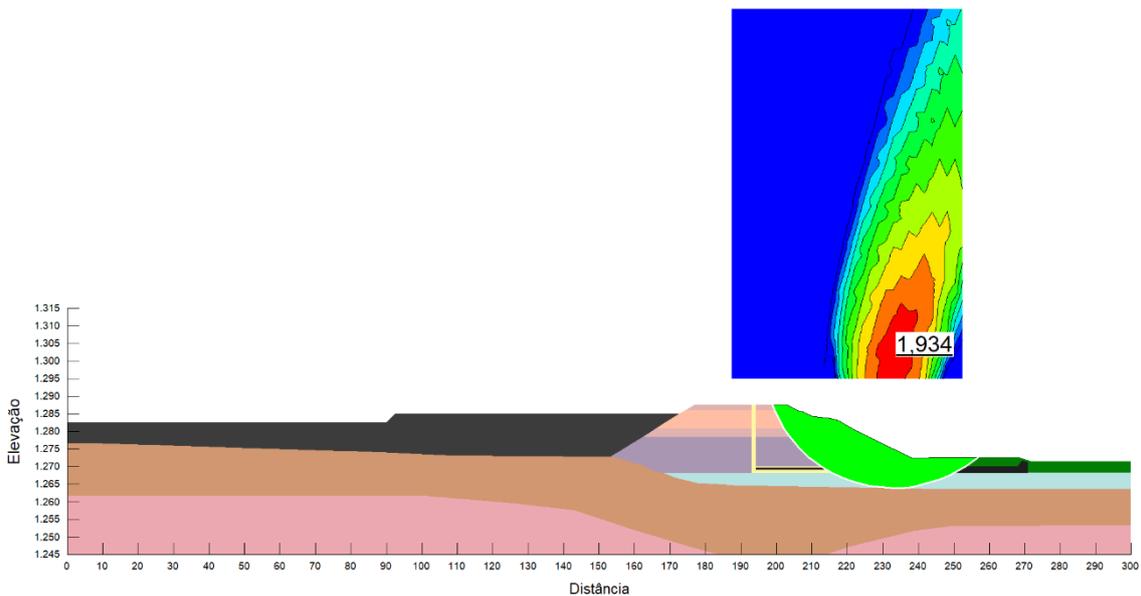


Figura 51 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

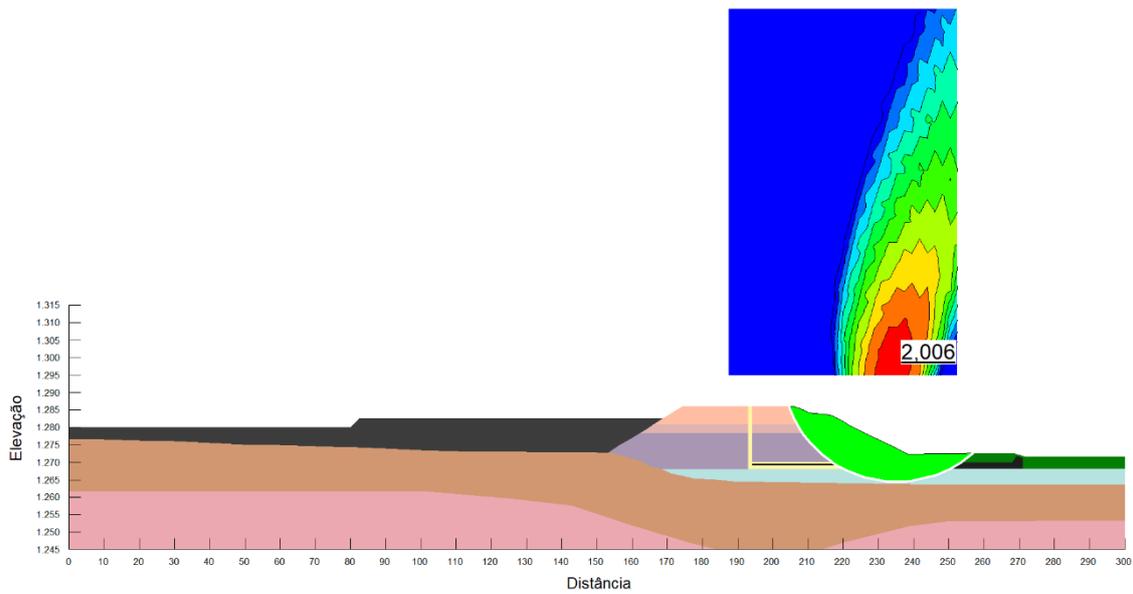


Figura 52 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

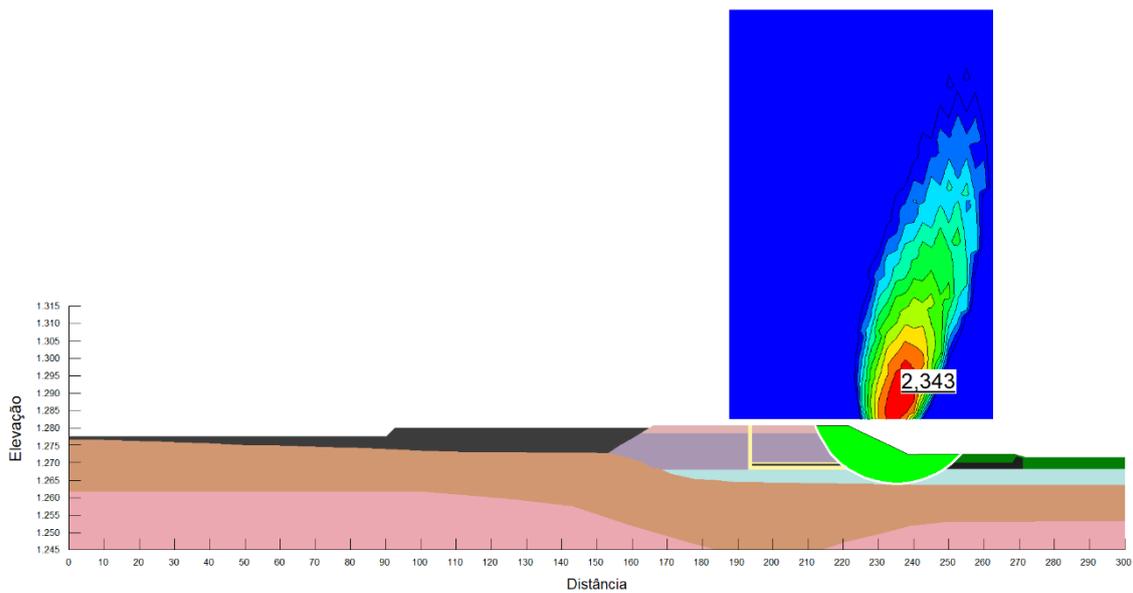


Figura 53 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

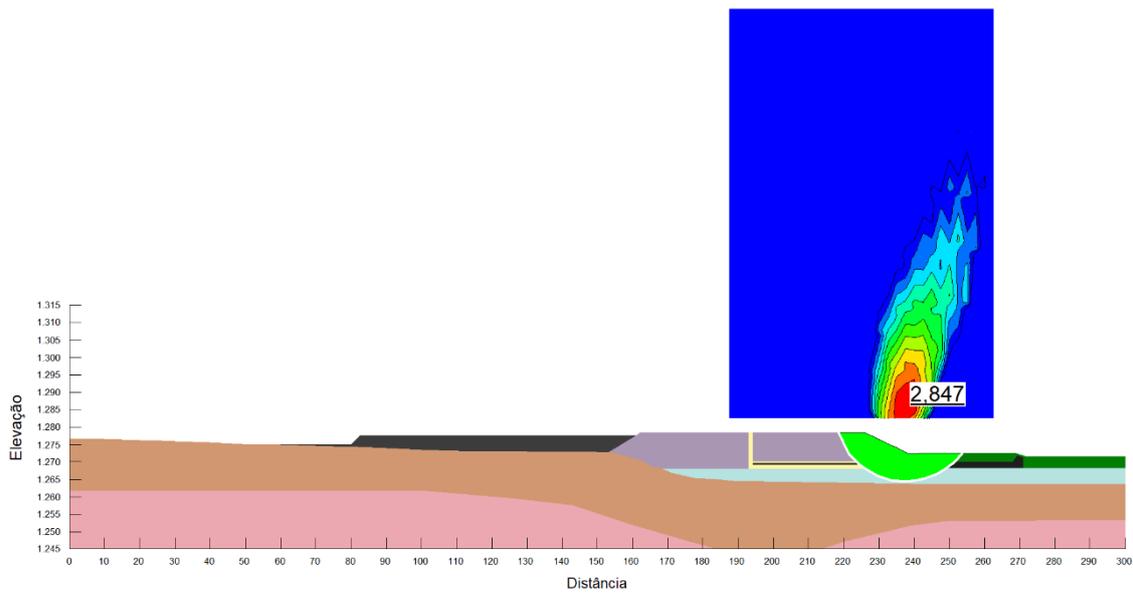


Figura 54 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

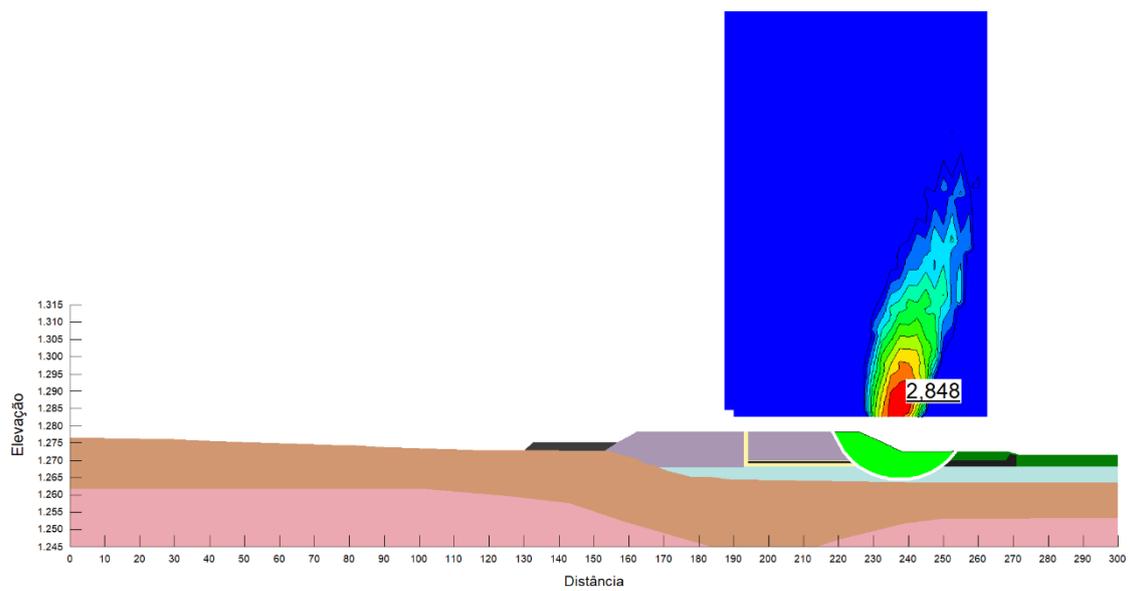


Figura 55 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

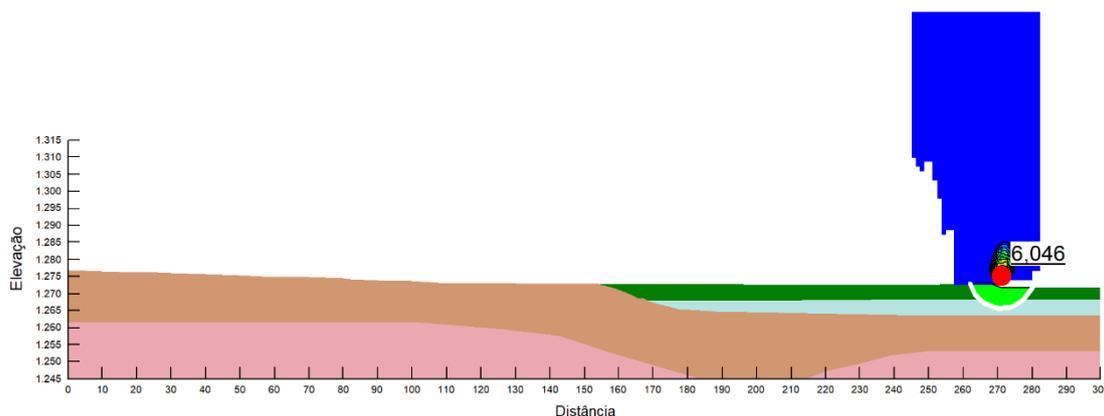


Figura 56 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise liquefeita com escavação no sentido de montante para jusante.

Conforme tendência estabelecida nas últimas análises supracitadas, os resultados apresentados pelas Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 apresentam fatores de segurança mais elevados e relativamente com valores estabilizados. O que se verifica nas análises realizadas para essa camada é que a superfície de ruptura fica toda contida no dique de partida, portanto a resistência do rejeito não influencia nos fatores de segurança.

A seção com escavação na cota de 1282,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,93, 5,2% maior que a da cota de 1285 m. Já na cota de 1280 m, verifica-se Fator de segurança de 2,01, 3,7% maior que o obtido a elevação anterior. A elevação de 1277,5 m possui Fator de segurança de 2,34, 16,8% maior que da cota anterior e as elevações 1275 m e 1272,5 m apresentam Fator de segurança igual a 2,85. Valores 21,5% e 0,04% maior que das cotas anteriores, respectivamente. O aumento gradativo observado nas últimas camadas ocorre devido a diminuição da altura do dique de partida devido a escavação, o que gera o abatimento da inclinação global dos taludes.

O Fator de segurança da análise liquefeita da Seção Típica 133 é praticamente igual ao da análise de pico. Para a Seção Típica 150, esse percentual é de 0,1%. Já para a Seção Típica 169, o resultado apresentado é 0,6% maior. Na Seção Típica 185 verifica-se um valor 0,1% superior e, por fim, na Seção Típica 197, tem-se um Fator de segurança 0,1% maior. Observa-se, portanto, convergência dos valores. A Figura 56 apresenta a formatação final do terreno pós descaracterização, em que foi utilizado material de

reaterro para preenchimento das regiões descaracterizadas. O Fator de segurança apresentado é igual a 6,05.

5.3. ESCAVAÇÃO DE JUSANTE PARA MONTANTE

5.3.1. ANÁLISES DE PICO

Com as análises de pico e liquefeitas com escavação de montante para jusante finalizadas, inicia-se a sequência de análises de pico com escavação de jusante para montante. As análises apresentaram o mesmo padrão de resultados que as obtidas anteriormente, com fatores de segurança avançando na medida que a escavação ocorre até um ponto em que as mesmas se estabilizam.

Para as análises subsequentes, foram utilizadas as razões de resistência de pico para todos os rejeitos. Conforme já estabelecido, será apresentada uma análise para cada camada do processo de descaracterização, com escavação até aproximadamente a metade da seção. As camadas também possuem 2,5 m de altura e escavação de 20 m de comprimento entre uma análise e outra. As Figura 57, Figura 58 e Figura 59 trazem os resultados obtidos até a cota de escavação de 1300 m.

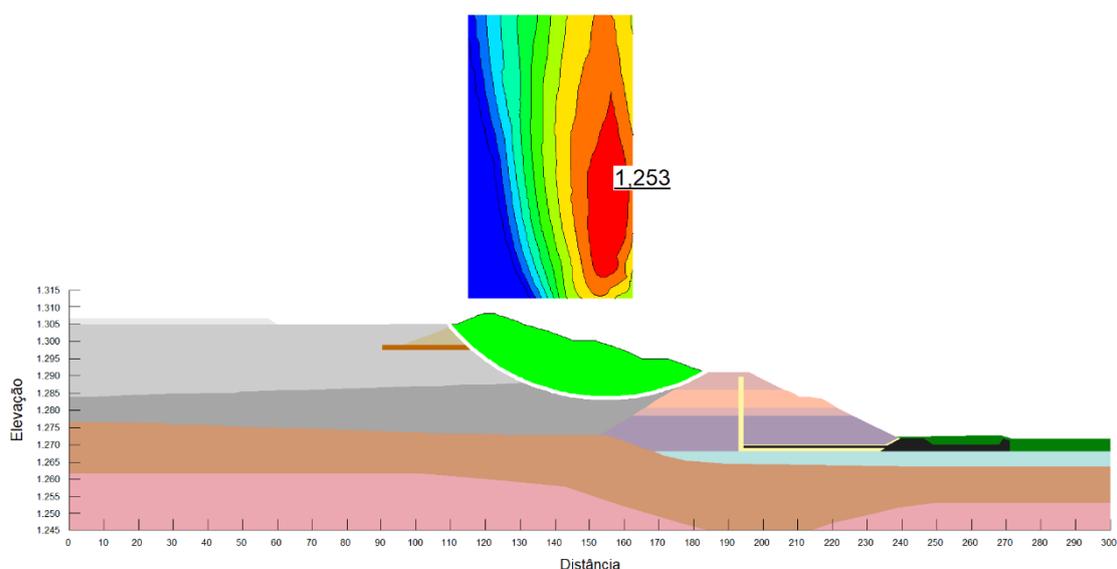


Figura 57 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

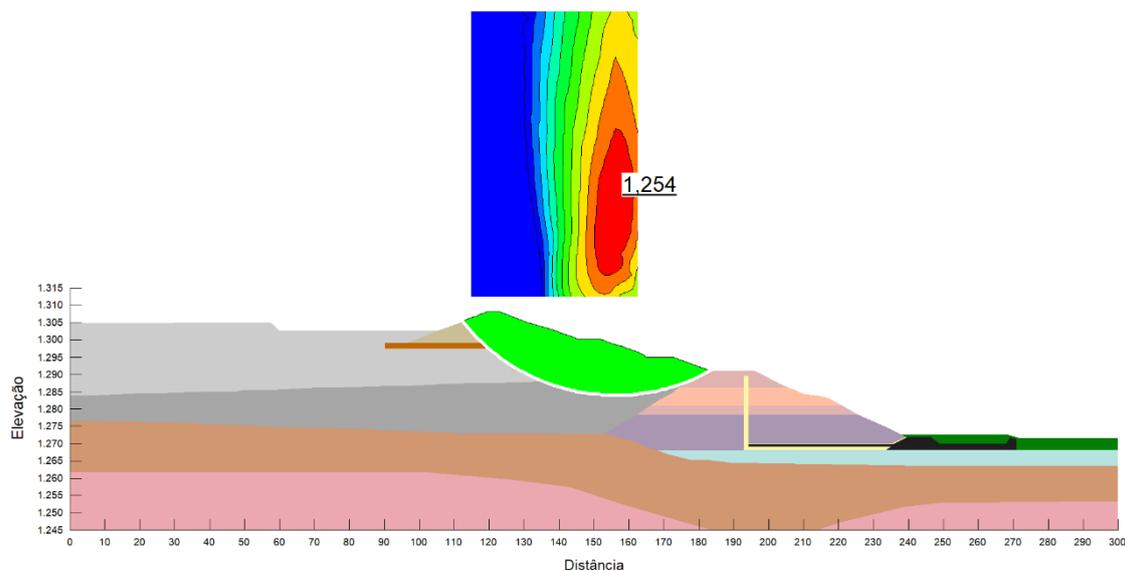


Figura 58 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 18 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

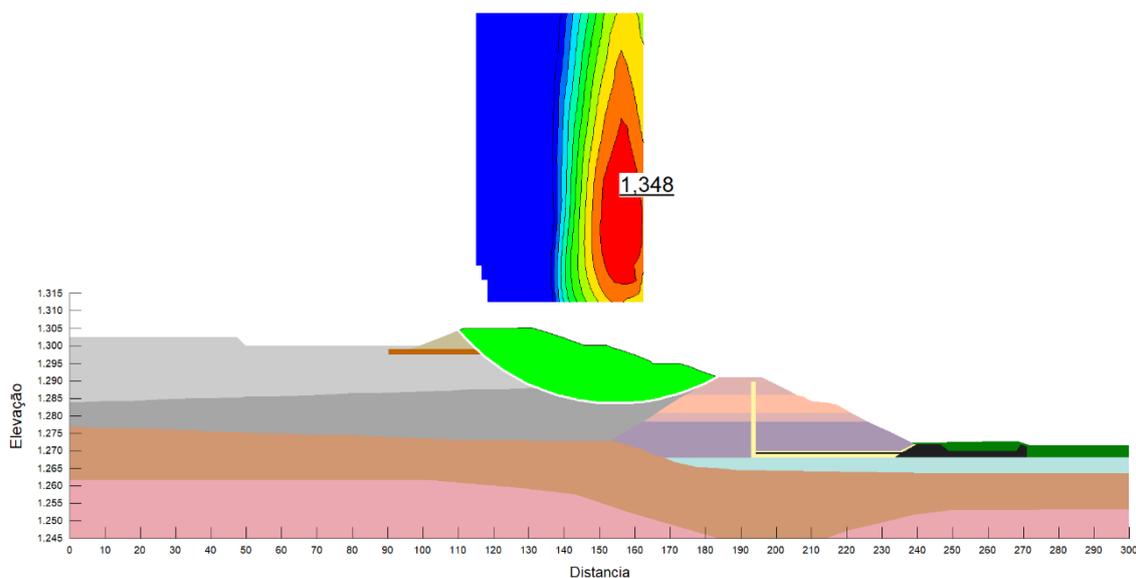


Figura 59 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

A Figura 57 traz os resultados com a retirada da camada de Rejeito A, localizado na superfície do reservatório da barragem. O Fator de segurança obtido, igual a 1,25, é 3,7% maior que o valor encontrado para a seção típica inicial, o que indica que essa camada de material não possui influência significativa na estabilidade da estrutura. O

Fator de segurança encontrado para a Seção Típica 7 é 1,5% maior que o encontrado para a essa seção considerando a descaracterização ocorrendo de montante para jusante.

A Figura 58 apresenta um Fator de segurança de 1,25, 0,1% maior que se comparado ao resultado apresentado para a elevação de 1305 m. Já a Figura 59 apresenta Fator de segurança de 1,35, um resultado 7,5% maior que o verificado para cota de 1302,5 m. Portanto, é possível verificar a tendência de melhora dos resultados obtidos ao longo do processo de descaracterização, indicando que a retirada de material gradativamente aumenta as condições de segurança global da estrutura, sob a ótica da estabilidade de taludes. O Fator de segurança encontrado para a Seção Típica 18 e Seção Típica 30, respectivamente, são 1,7% e 1% menores que os encontrados para essas seções nas análises de pico considerando escavação de montante para jusante.

Quanto as superfícies de ruptura, verifica-se que todas passam pela região de material de alteamento da barragem nas extremidades, com a porção central atingindo as camadas de rejeito que estruturam os alteamentos acima, conforme já verificado nas análises com escavação de montante para jusante. As Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 apresentam os resultados obtidos até a elevação de 1285 m para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

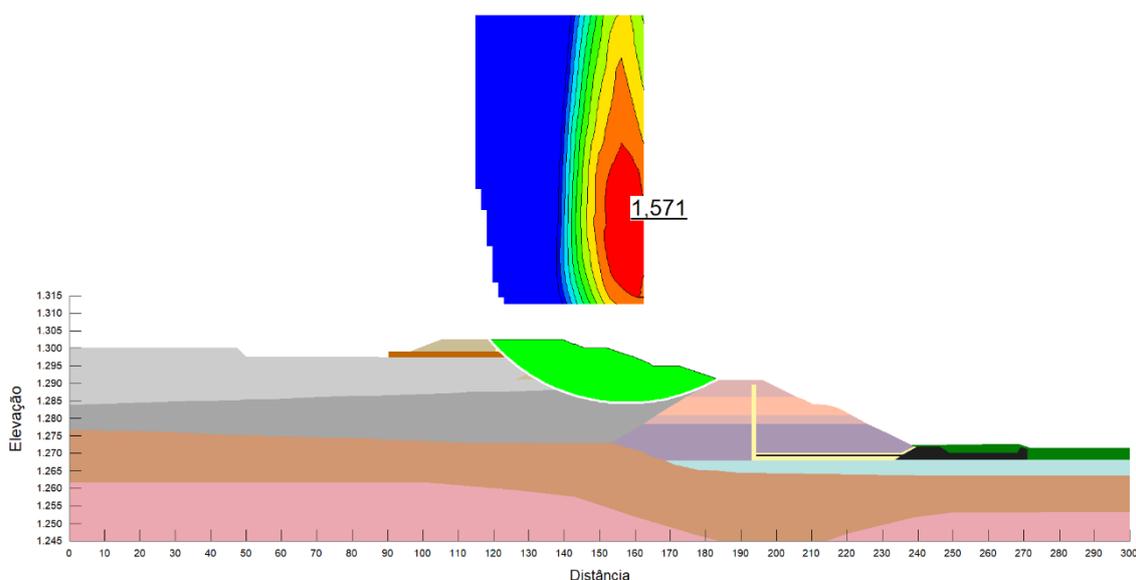


Figura 60 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

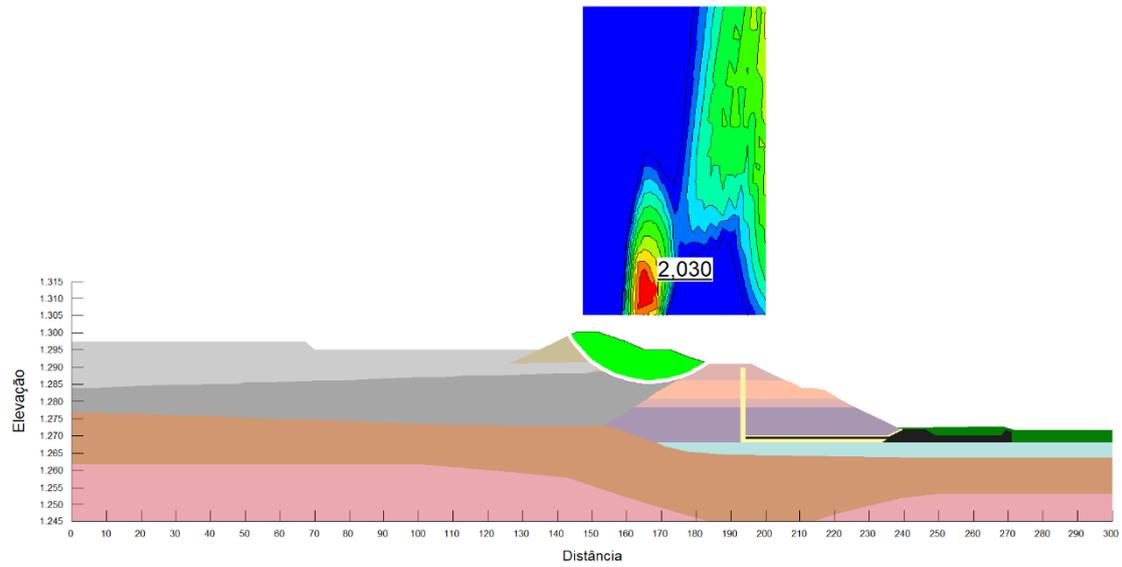


Figura 61 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

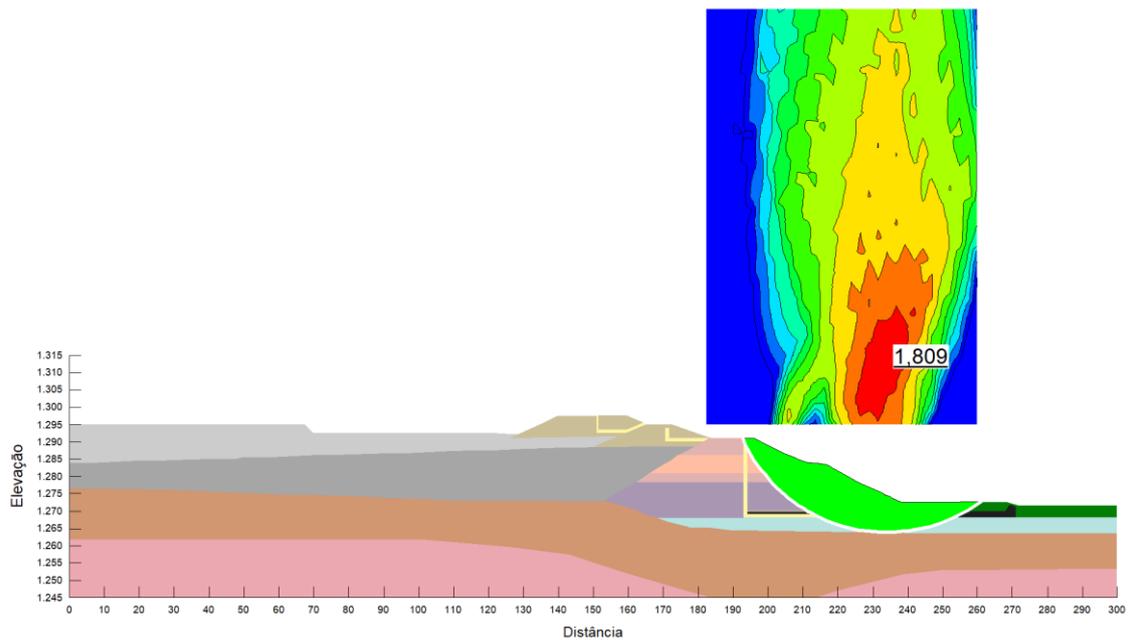


Figura 62 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

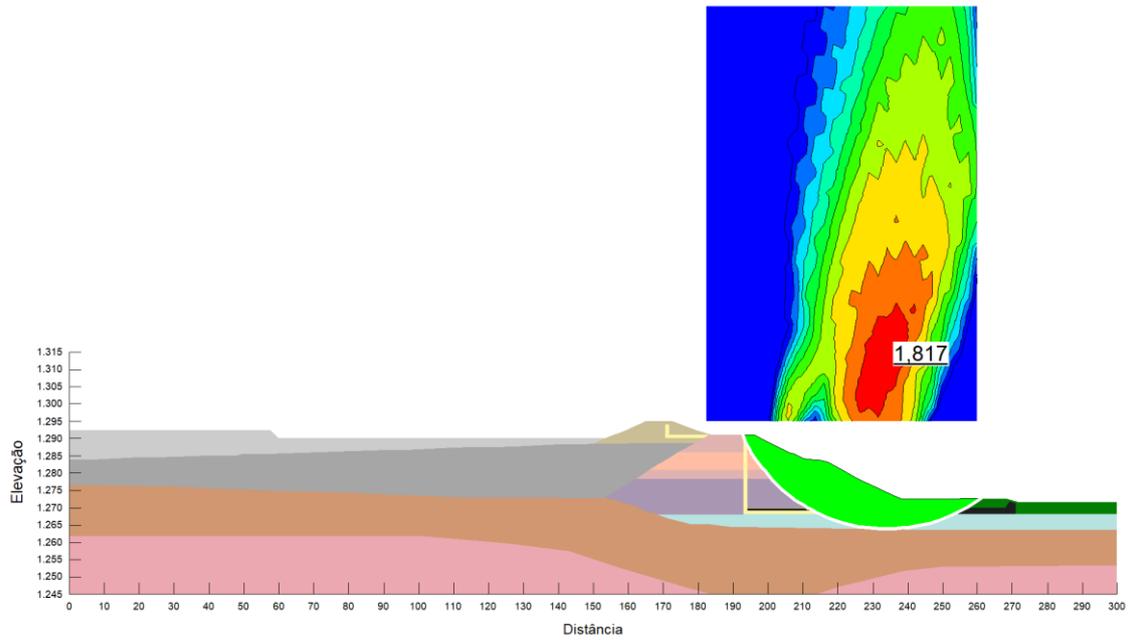


Figura 63 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

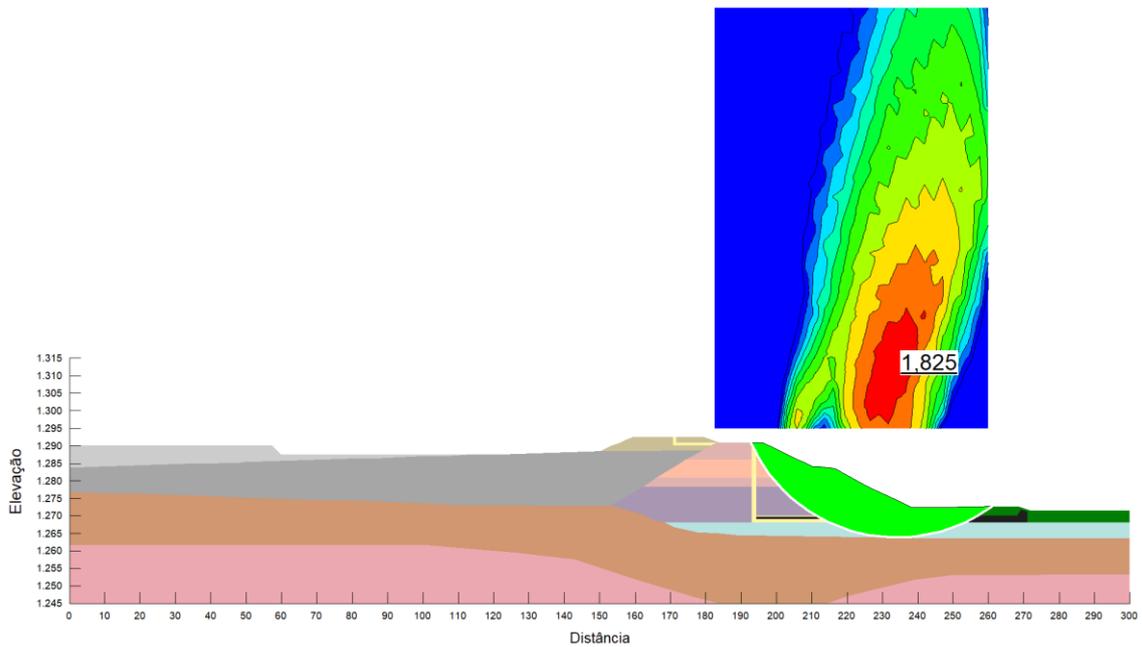


Figura 64 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

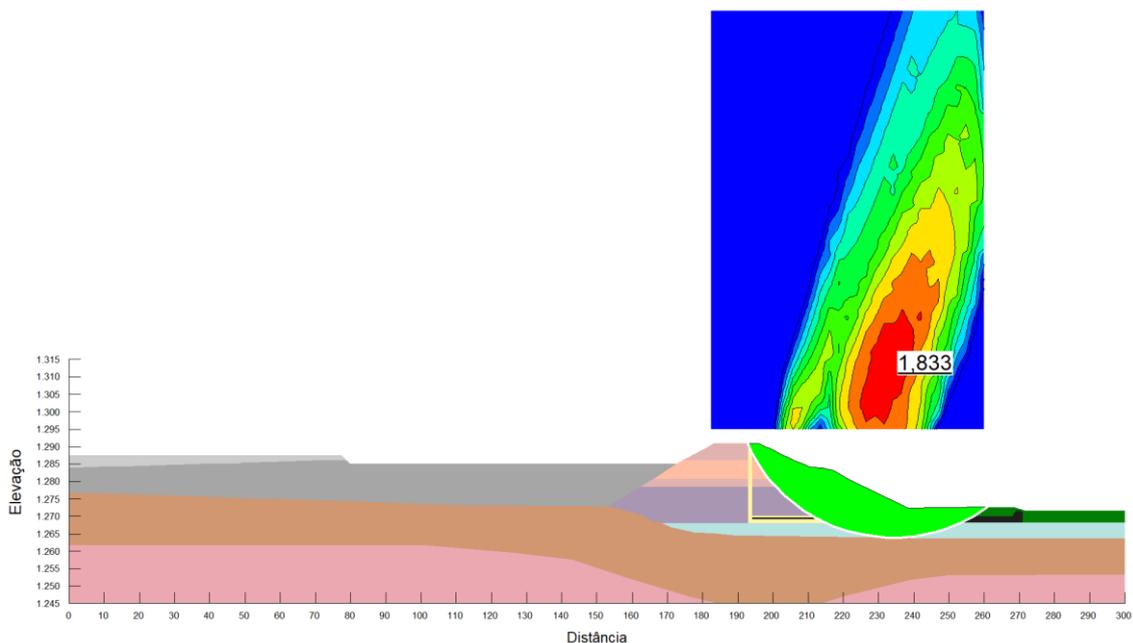


Figura 65 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

As Figura 60 e Figura 61 ainda apresentam superfície de ruptura delimitada pela região de alteamento da estrutura. A Seção Típica 41 possui fator de segurança igual a 1,57, 16,5% maior que o encontrado para Seção Típica 30, referente a escavação na cota de 1300 m.

O Fator de segurança apresentado na Figura 61, igual a 2,03, é bastante superior ao observado nas demais elevações, sendo 29,2% maior que o resultado encontrado para a Seção Típica 41. Verifica-se que, nessa camada, há uma superfície de ruptura pequena e restrita a região de alteamento, com abrangência de uma parcela pequena de região de rejeitos, portanto, o material de maior qualidade confere maior fator de segurança para esse formato de cunha de ruptura. Os valores obtidos são respectivamente, 0,5% e 9% menores, que para as seções correspondentes nas análises de pico com escavação de montante para jusante.

As Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 apresentam resultados em que a superfície de ruptura se desloca para a região do dique de partida, em que as cunhas de rupturas passam a ser menos profundas e mais alongadas. Os resultados obtidos, apesar de menores que os observados para a camada de escavação na cota de 1295, são maiores

que o obtido na cota de 1297,5 m e, portanto, continuam apresentando aumento nos Fatores de segurança da estrutura ao longo da escavação, embora já haja uma tendência de estabilização do cenário.

A seção com escavação na cota de 1292,5 apresenta Fator de segurança igual a 1,90, resultado 6,6% menor que na cota de 1295 m e 20,7% maior que da elevação de 1297,5 m. A seção com escavação na cota de 1290 m, 1287,5 m e 1285 m apresentam, respectivamente, Fatores de segurança 1,82, 1,83 e 1,83.

Entre a camada nas elevações 1292,5 m e 1290 m, há um decréscimo de 4,2% e entre as camadas nas cotas de 1290 m e 1287,5 m e entre 1287,5 m e 1285 m, um acréscimo de 0,4%. Os resultados obtidos para todas as camadas de escavação são 0,2% menores, se comparados com as seções correspondentes para a metodologia de escavação de montante para jusante. As Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71 apresentam os resultados obtidos até a completa descaracterização da estrutura, para as análises de pico com escavação no sentido de montante para jusante.

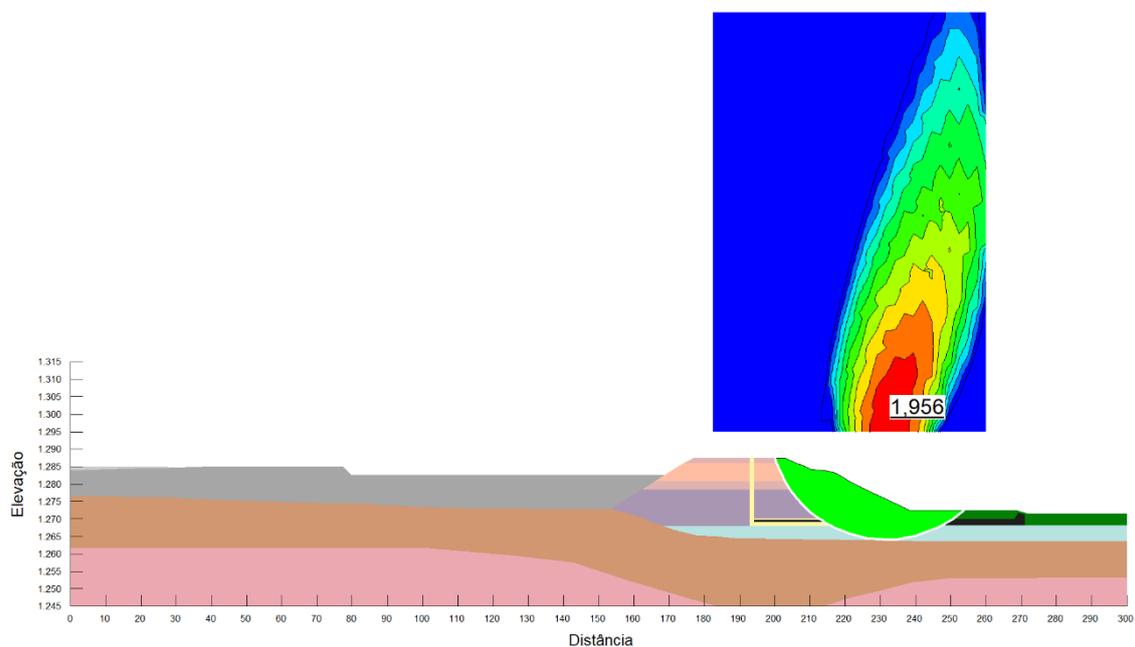


Figura 66 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

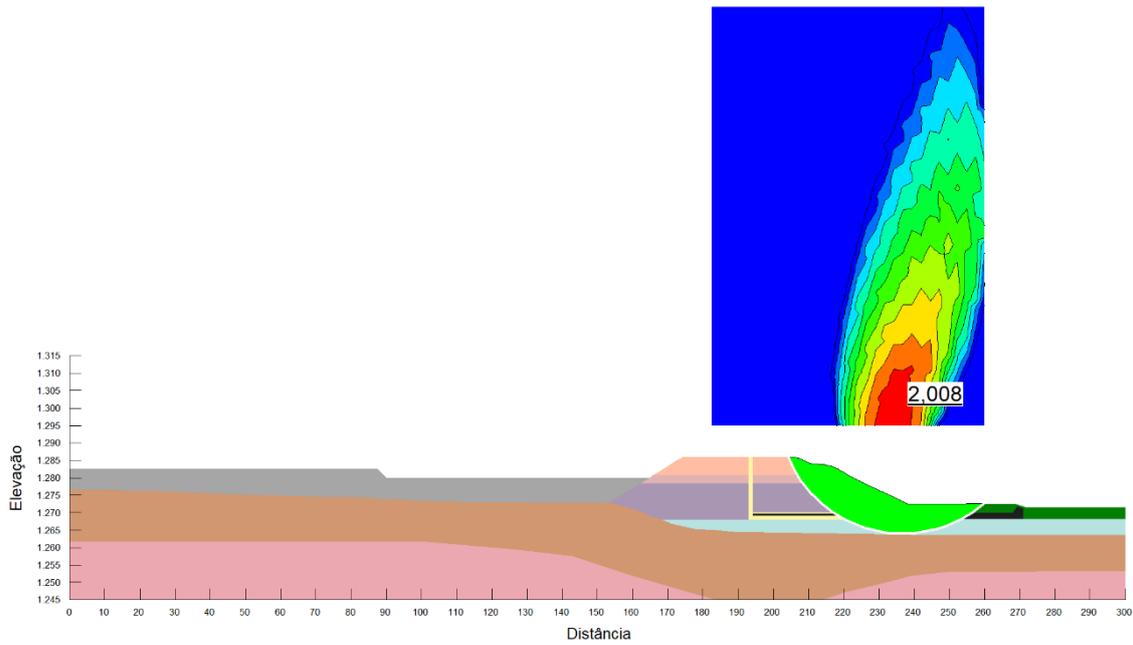


Figura 67 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

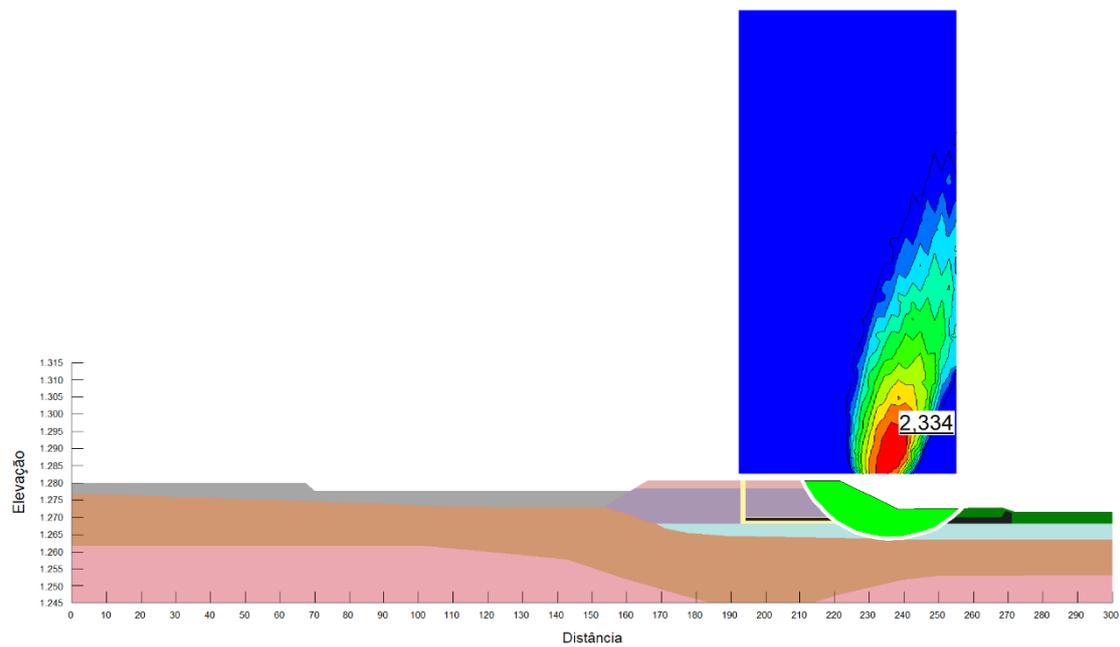


Figura 68 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

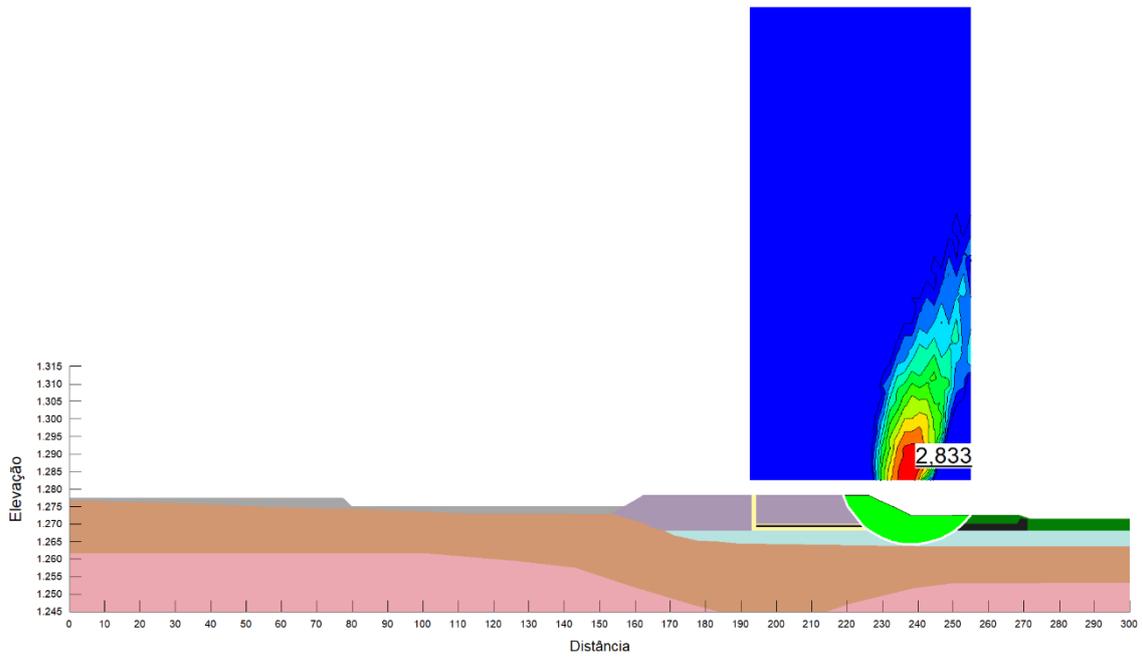


Figura 69 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

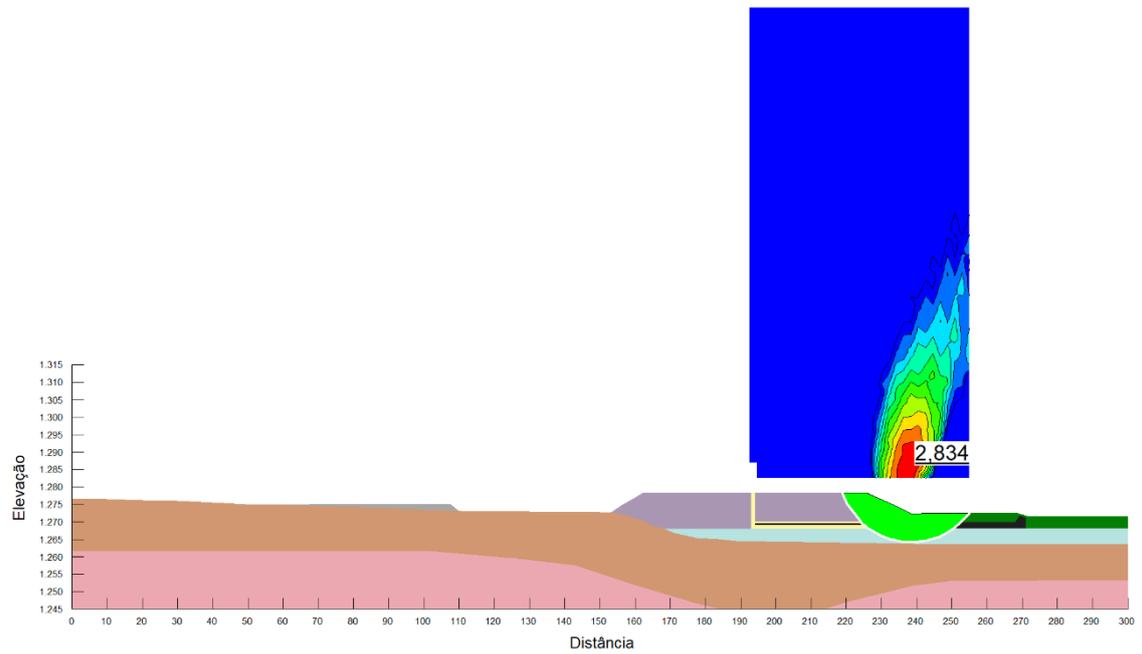


Figura 70 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

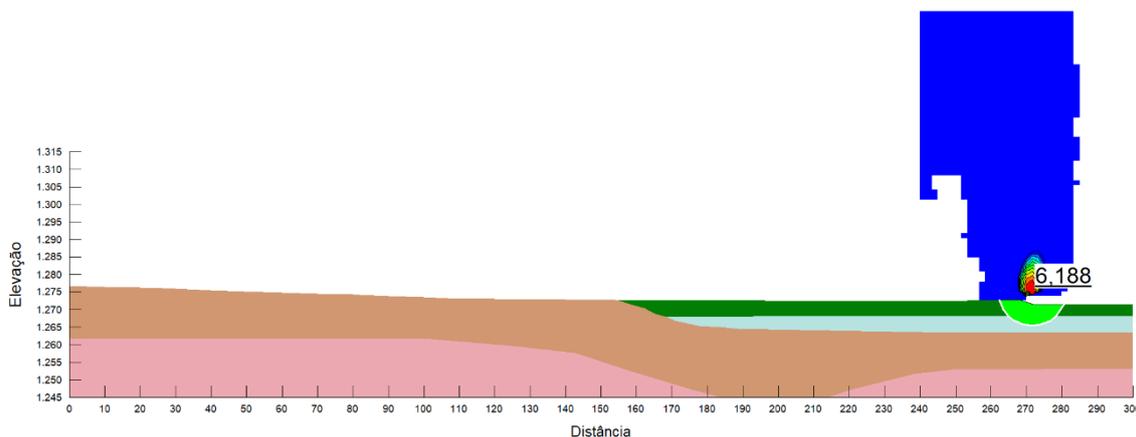


Figura 71 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

Os resultados apresentados pelas Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70 apresentam fatores de segurança mais elevados e relativamente com valores estabilizados. Segue-se a tendência para essas camadas de análises: a superfície de ruptura fica toda contida no dique de partida, portanto a resistência do rejeito não influencia nos fatores de segurança.

A seção com escavação na cota de 1282,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,96, 6,7% maior que a da cota de 1285 m. Já na cota de 1280 m, verifica-se Fator de segurança de 2,01, 2,7% maior que o obtido a elevação anterior. A elevação de 1277,5 m possui Fator de segurança de 2,33, 16,2% maior que da cota anterior.

A elevação de 1275 m apresenta Fator de segurança de 2,83, 21,4% superior ao da cota 1277,5 e, por fim, a cota de 1272,5 m apresentam Fator de segurança igual a 2,83, igual ao da cota de 1275 m. O Aumento gradativo observado nas ultimas camadas ocorre devido a diminuição da altura do dique de partida devido a escavação, o que gera o abatimento da inclinação global dos taludes.

Comparando com as seções típicas correspondentes no cenário de escavação de montante para jusante, a Seção Típica 133 apresenta resultados 0,9% maiores e a Seção Típica 150 é 0,1% maior. Os resultados obtidos para a análise de pico considerando escavação de jusante para montante para a Seção Típica 169 é 0,2% maior, já a da Seção

Típica 185 é 0,4% menor e da Seção Típica 197 é 0,4% menor. Verifica-se que os resultados obtidos são bastante próximos.

A Figura 71 apresenta a formatação final do terreno pós descaracterização, em que foi utilizado material de reaterro para preenchimento das regiões descaracterizadas. O Fator de segurança, por se tratar, agora, de um terreno reincorporado a topografia local, é extremamente alto, com o talude mais íngreme apresentando um valor de 6,09.

5.3.2. ANÁLISES LIQUEFEITAS

Finalizada as análises de pico com escavação de jusante para montante, foi realizada as análises liquefeitas, também considerando a descaracterização de jusante para montante. As análises subsequentes também apresentaram, em sua maioria, fatores de segurança crescentes ao longo da simulação de escavação, embora com resultados semelhantes ao longo da mesma camada de escavação, como já observado no outro cenário.

Para esse grupo de análises, foram utilizadas as razões de resistência liquefeita para os rejeitos localizados abaixo da linha freática da seção típica inicial da estrutura. Da mesma forma empregada para as análises liquefeitas com escavação de montante para jusante, a razão de resistência não é reajustada pois se considera que, por se tratar de um processo relativamente rápido, não há tempo hábil para completa dissipação da água desse material, podendo, portanto, ainda considerá-lo saturado conforme definição da linha piezométrica de partida.

Novamente, cada camada possui 2,5 m de altura e foi considerada uma escavação de 20 m de comprimento entre uma análise e outra. Figura 72, Figura 73 e Figura 74 trazem os resultados obtidos até a cota de escavação de 1300 m para as análises liquefeitas.

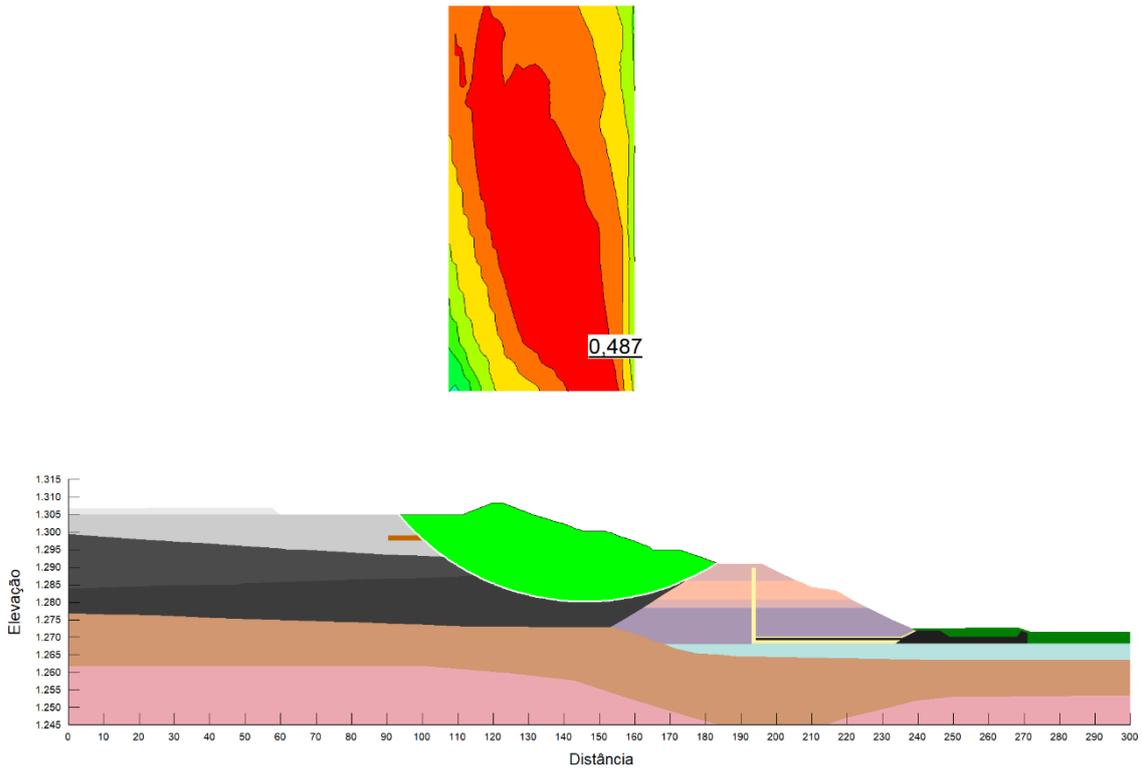


Figura 72 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 7 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

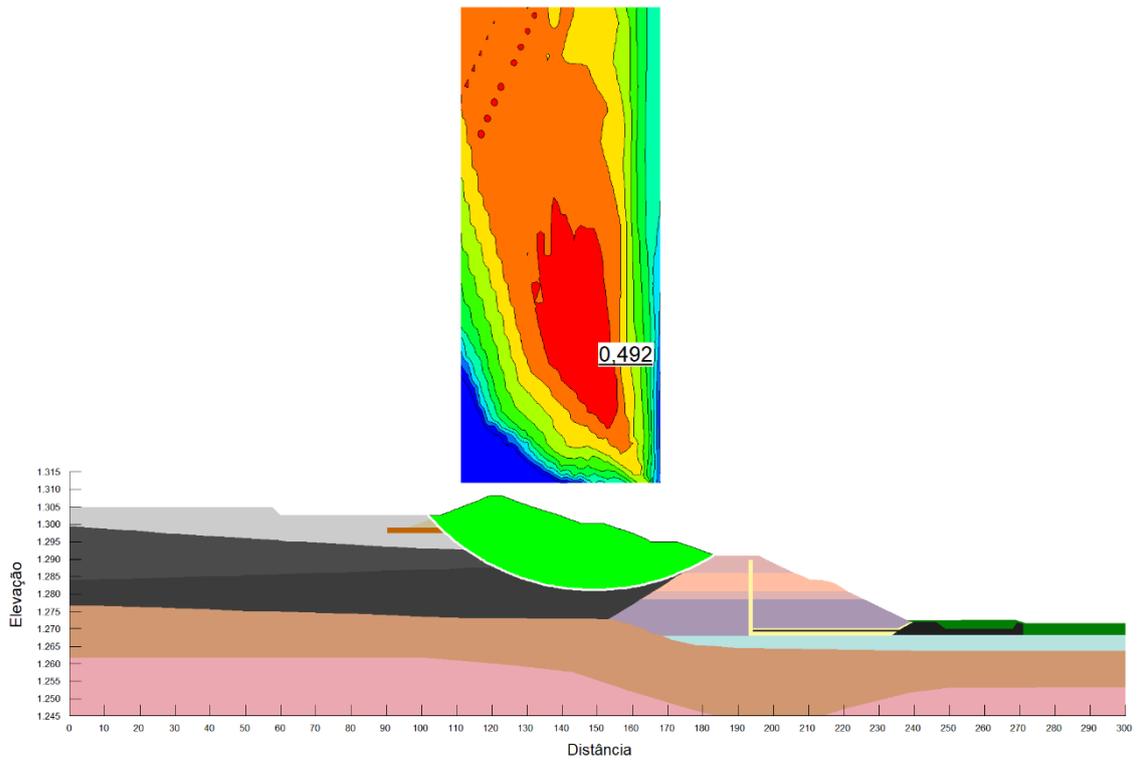


Figura 73 – Fator de segurança e superfície de ruptura da Seção liquefeita 18 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

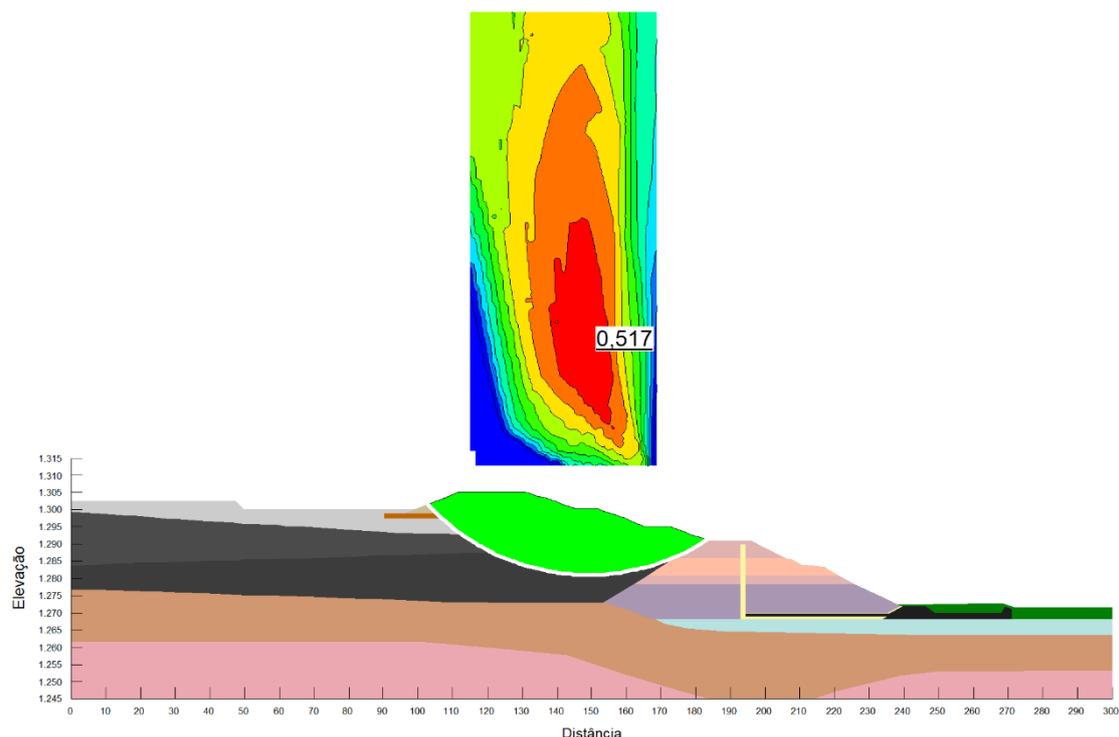


Figura 74 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 30 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

A Figura 72 traz os resultados obtidos para a Seção Típica 7. O Fator de segurança obtido, igual a 0,49, é 4,5% maior que o valor encontrado para a seção típica inicial, o que indica que a camada de Rejeito A não possui influência significativa na estabilidade da estrutura. A alteração da razão de resistência de pico para a liquefeita gera uma redução de 61,1% no Fator de segurança para as seções típicas correspondentes, o que reforça a importância de monitorar e controlar eficiente os parâmetros de resistência do material acondicionado na barragem para a segurança global da estrutura. Além disso, o resultado obtido é 1,2% menor que para a análise liquefeita da seção correspondente considerando descaracterização de montante para jusante.

A Figura 73 apresenta um Fator de segurança de 0,49, 1% maior que se comparado ao resultado apresentado para a elevação de 1305 m. A Figura 74 apresenta Fator de segurança de 0,52, um resultado 5,1% maior que o verificado para cota de 1302,5 m. Portanto, também para as análises liquefeitas verifica-se a tendência de melhora dos resultados obtidos ao longo do processo de descaracterização, indicando que a retirada de material gradativamente aumenta a segurança da estrutura para estabilidade dos taludes. Para a Seção Típica 18 e Seção Típica 30, os Fatores de segurança liquefeitos, se

comparados aos de pico, são 60,8% e 61,7% menores, respectivamente. Verifica-se, portanto, que para as camadas mais iniciais, o avanço da descaracterização não influencia significativamente numa alteração entre as diferenças entre os resultados de pico e liquefeitos. Observa-se também que os resultados são, respectivamente, 6,6% e 7,8% menor que os obtidos para as análises correspondentes considerando a outra metodologia de descaracterização.

Quanto ao formato das superfícies de rupturas obtidas, verifica-se que todas passam pela região de material de alteamento da barragem nas extremidades, com a porção central atingindo as camadas de rejeito que estruturam os alteamentos acima. Verifica-se também que as superfícies das análises liquefeitas são mais profundas, em relação as de pico, atingindo cotas inferiores de rejeito, do mesmo modo já observado para as análises com escavação de montante para jusante. As Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 apresentam os resultados obtidos até a elevação de 1285 m para as análises liquefeitas simulando a outra metodologia.

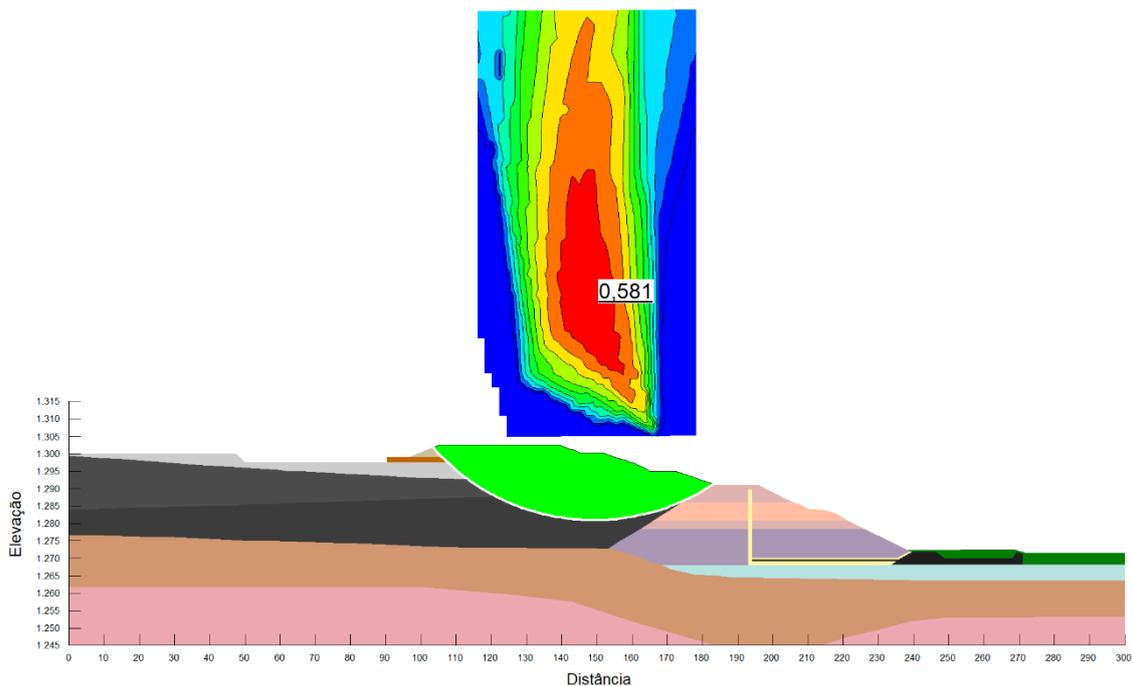


Figura 75 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 41 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

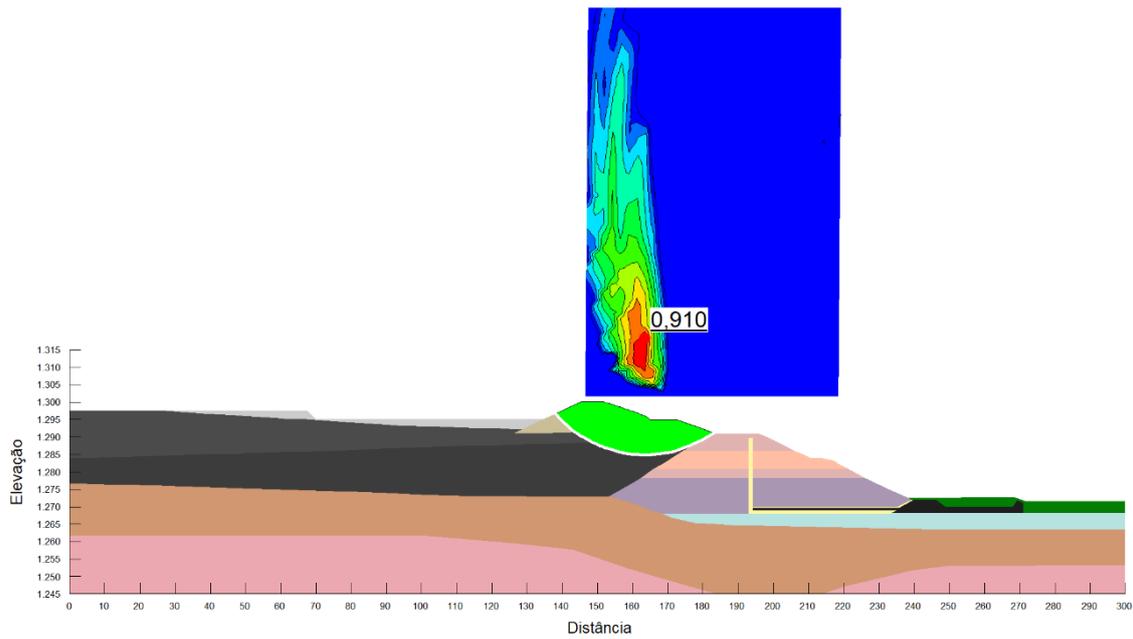


Figura 76 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 54 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

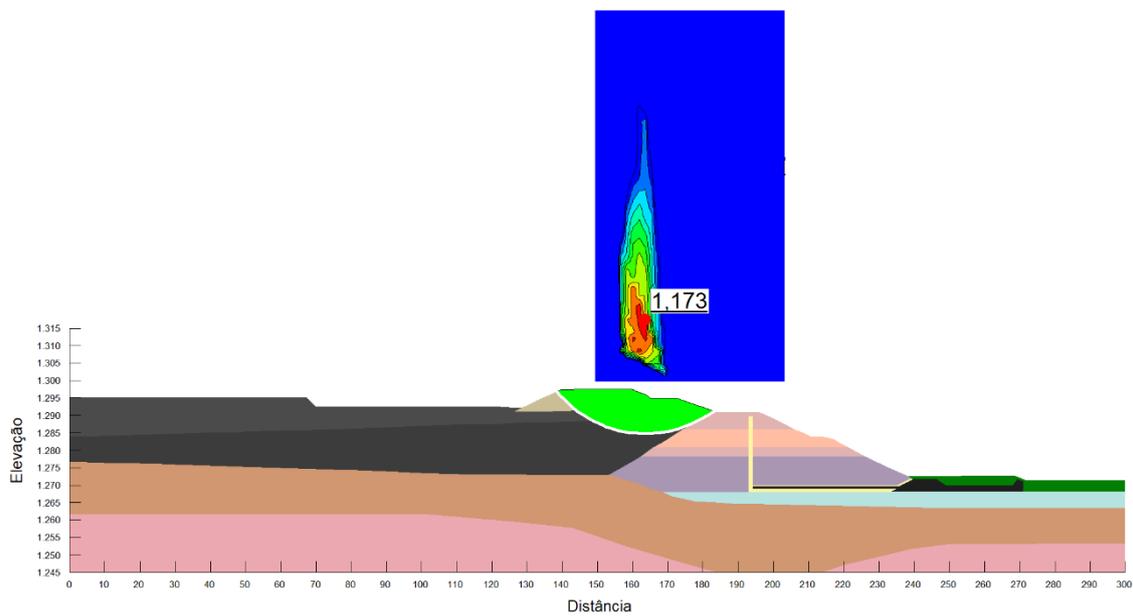


Figura 77 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 68 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante

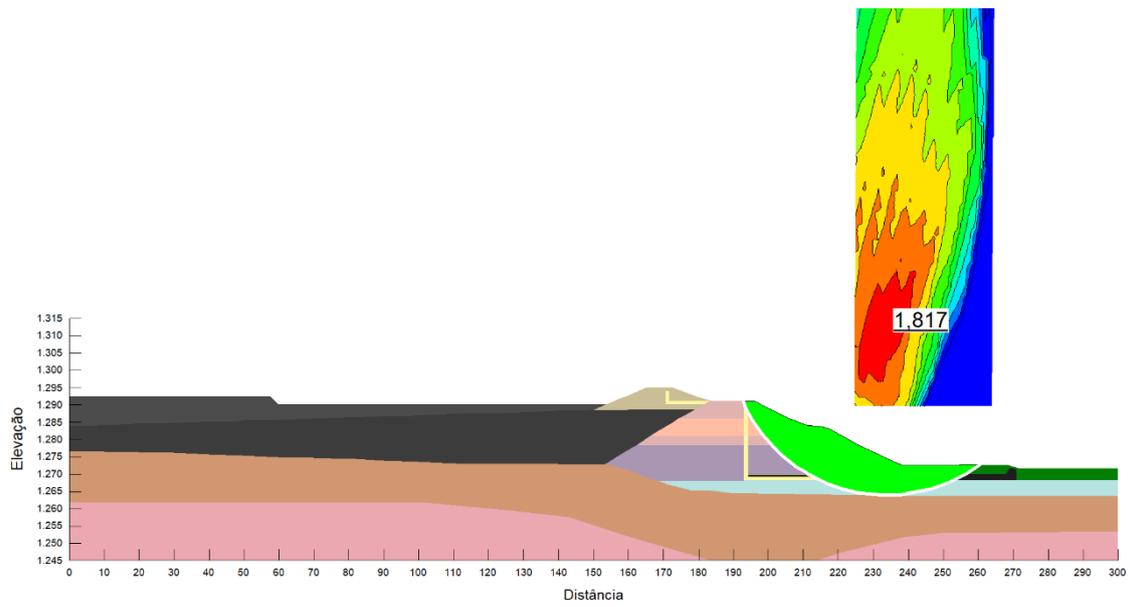


Figura 78 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 83 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

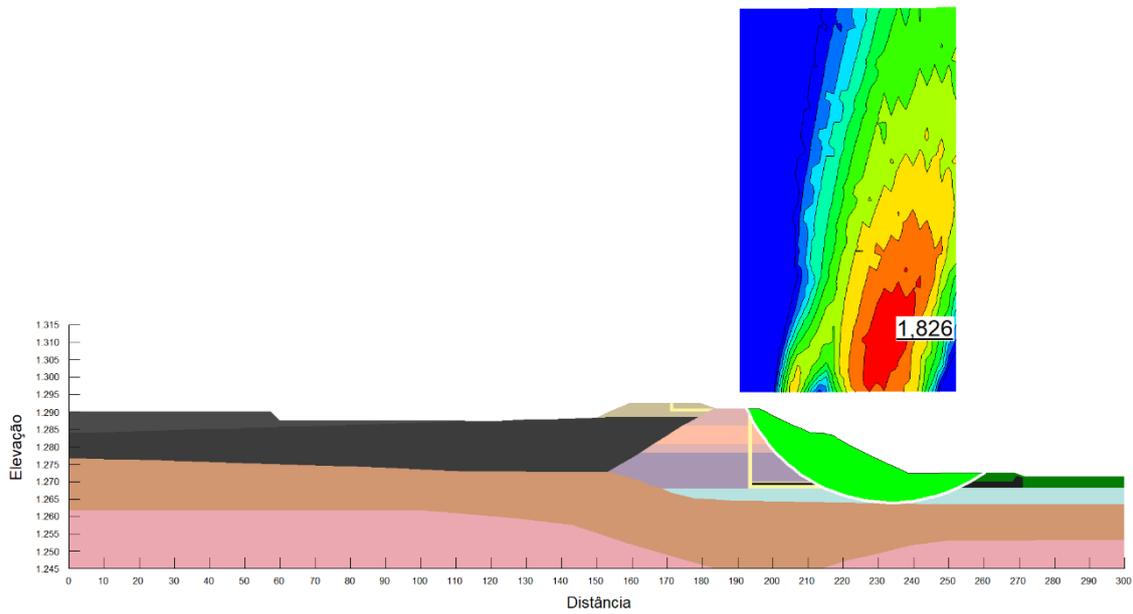


Figura 79 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 99 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

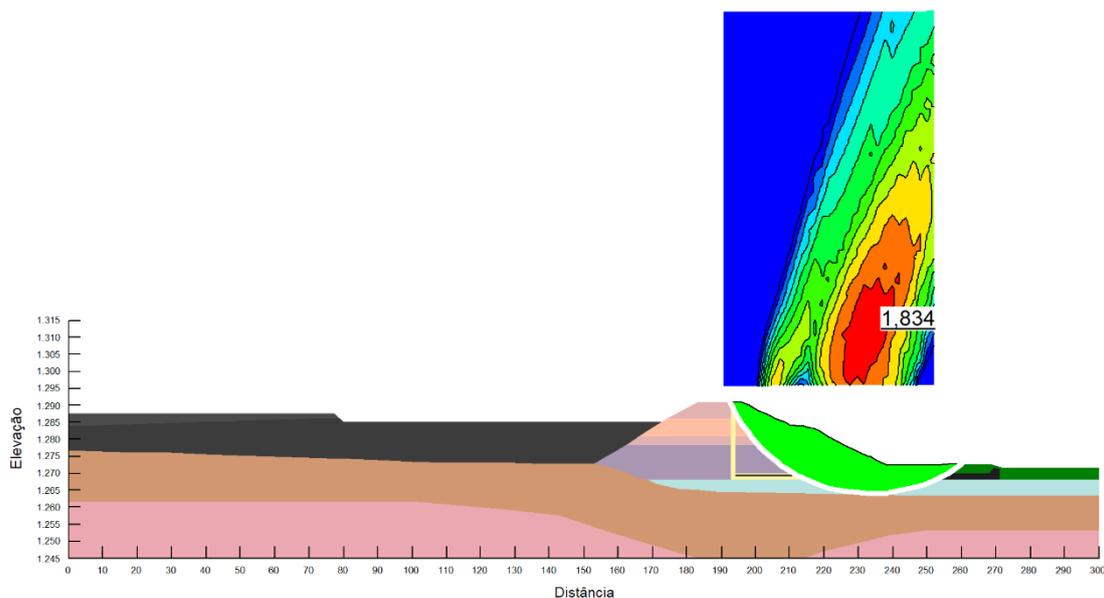


Figura 80 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 115 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

As Figura 75 e Figura 76 ainda apresentam superfície de ruptura delimitada pela região de alteamento da estrutura. A Seção Típica 41 possui fator de segurança igual a 0,58, 12,4% maior que o encontrado para Seção Típica 30, referente a escavação na cota de 1300 m. O resultado obtido é 63% menor se comparado com a análise de pico da mesma seção típica e 8,1% menor se comparado a análise da seção correspondente considerando a primeira metodologia de escavação.

O Fator de segurança apresentado na Figura 76, igual a 0,91, seguindo a tendência apresentada nas análises de pico, é expressivamente superior ao observado nas demais elevações, sendo 56,6% maior que o resultado encontrado para a Seção Típica 41. O resultado obtido é 55,2% menor que o Fator de segurança para a análise de pico da Seção Típica 54, ainda demonstrando um cenário de estabilidade entre as análises de pico e liquefeita e reforçando a relevância das propriedades do rejeito para a estabilidade da estrutura. O Fator de segurança obtido é 2,1% menor que o verificado na análise considerando escavação de montante para jusante.

Nessas seções, ainda se observam superfícies de rupturas localizadas na região da crista da barragem, com alta predominância de material de rejeito na região delimitada por a cunha de ruptura.

Nas Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80, verifica-se que as superfícies de ruptura se desloca para a região do dique de partida, em que as cunhas de rupturas passam a ser menos profundas e mais alongadas. Os resultados obtidos revelam um aumento muito grande de resistência entre a Seção Típica 54 e Seção Típica 68, que é quando ocorre o deslocamento da superfície de ruptura. Nas demais análises, já se observa uma tendência de estabilização dos fatores de segurança apresentados.

A seção com escavação na cota de 1292,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,17, resultado 28,9% maior que da elevação de 1295 m. O resultado é 38,1% menor que o obtido para a análise de pico e 35,2% menor que em relação a análise liquefeita correspondente com escavação de montante para jusante.

A seção com escavação na cota de 1290 m, 1287,5 m e 1285 m apresentam, respectivamente, Fatores de segurança de 1,82, 1,83 e 1,83. Entre as camadas 1292,5 m e 1290 m há um acréscimo de 54,9% no Fator de segurança. Já entre as camadas de 1290 m e 1287,5 m e 1287,5 e 1285 m há um acréscimo, respectivamente, de 0,5% e 0,4%, o que denota uma estabilização dos resultados obtidos. Se comparado com os resultados das análises de pico, a Seção Típica 83 apresenta o mesmo resultado e as Seções Típicas 99 e 115 Fatores de segurança 0,1% maiores. Já em correlação às análises correspondentes com escavação de montante para jusante, a Seção Típica 83 apresenta Fator de segurança 0,3% menor e as demais 0,2% menores.

Diferenças tão baixas indicam que o deslocamento da superfície de ruptura faz com que a resistência do rejeito não mais influencie na estabilidade dos taludes. Portanto, a cunha de ruptura passa a estar contida na região do dique e o valor da razão de resistência não é mais condição crítica para a estrutura.

As Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84, Figura 85 e Figura 86 apresentam os resultados obtidos até a completa descaracterização da estrutura, para as análises liquefeitas com escavação no sentido de montante para jusante.

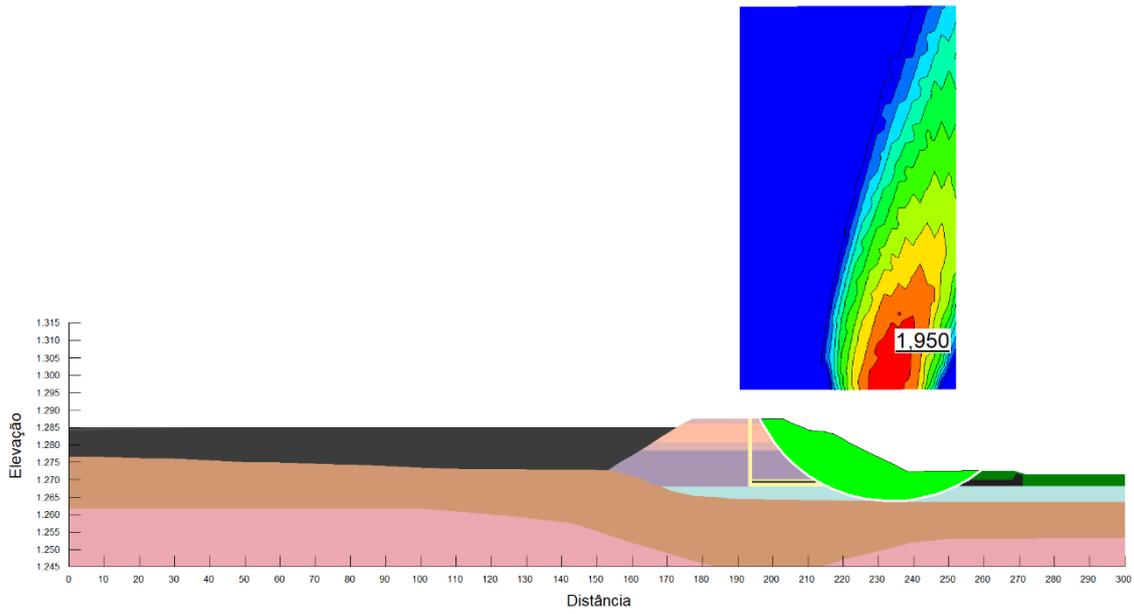


Figura 81 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 133 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

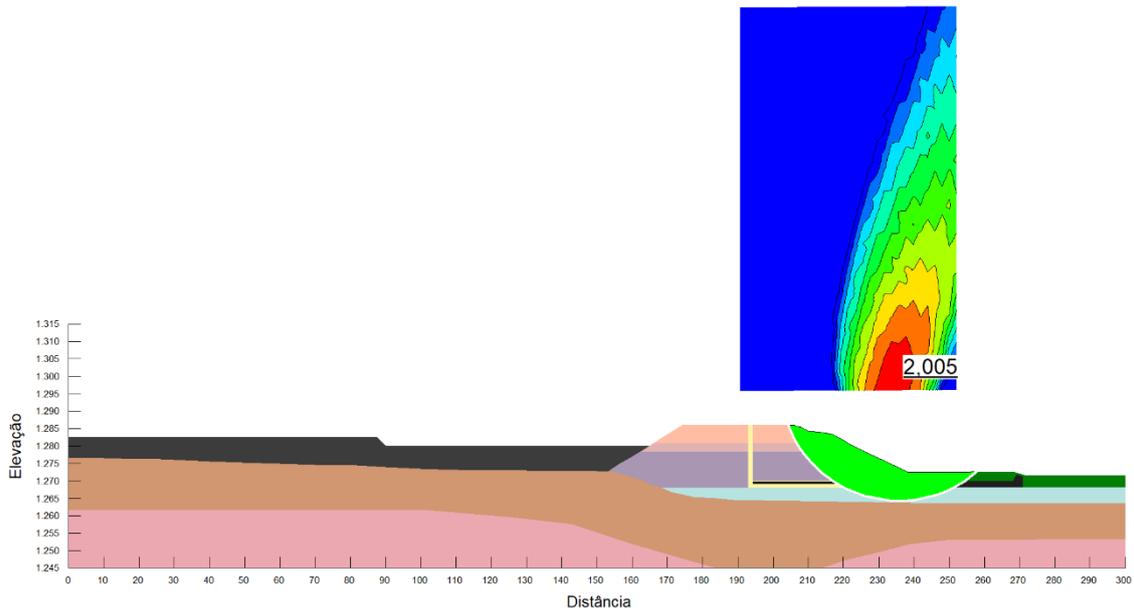


Figura 82 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 150 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

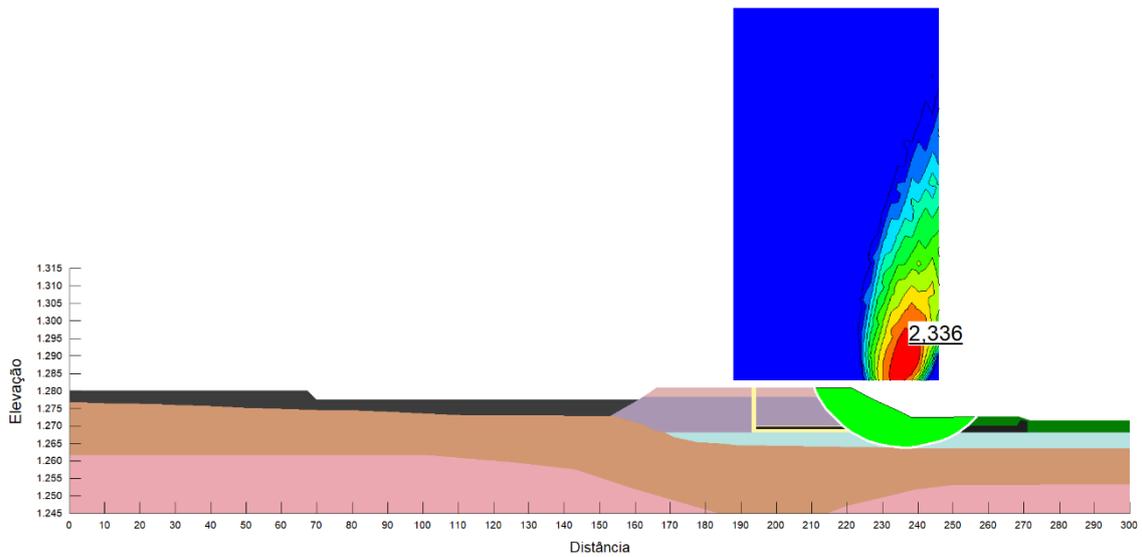


Figura 83 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 169 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

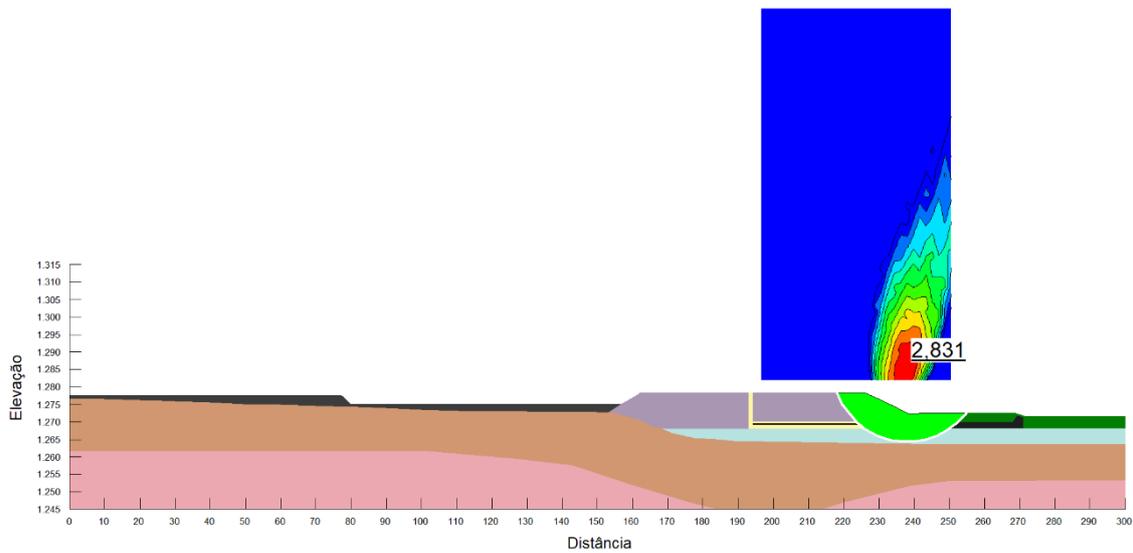


Figura 84 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 185 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

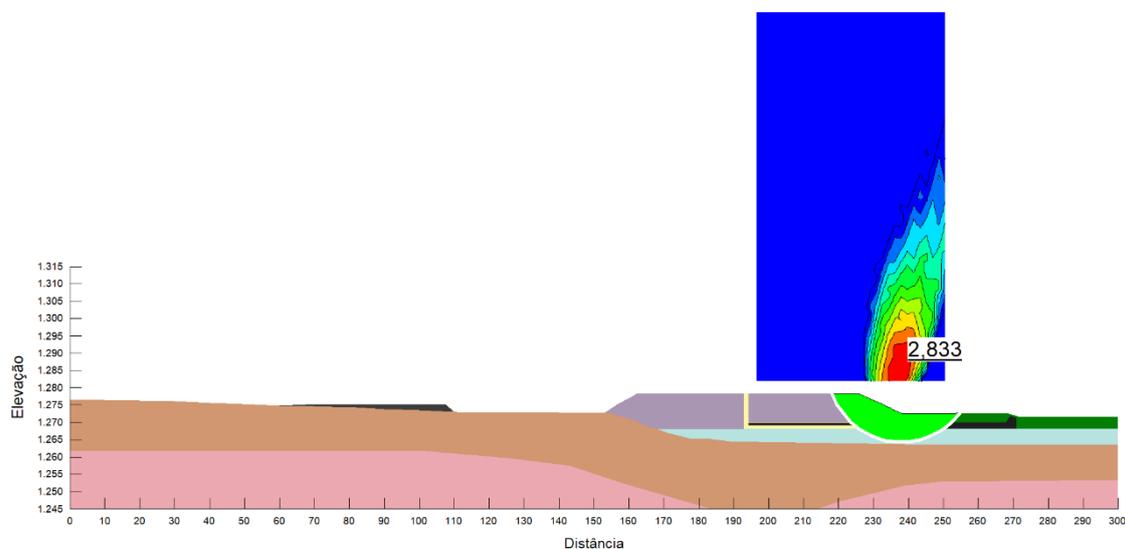


Figura 85 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 197 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

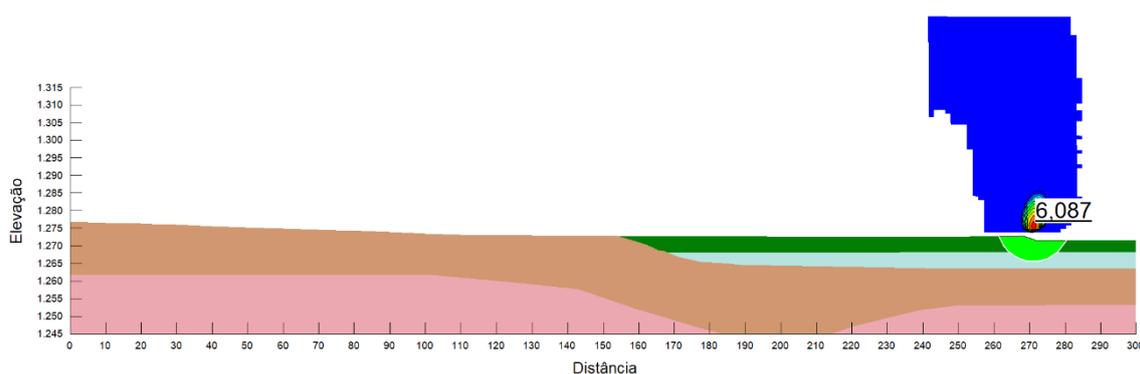


Figura 86 – Fator de segurança e superfície liquefeita da Seção Típica 200 para a análise de pico com escavação no sentido de jusante para montante.

Conforme tendência estabelecida nas últimas análises supracitadas, os resultados apresentados pelas Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84 e Figura 85 apresentam fatores de segurança mais elevados e relativamente com valores estabilizados. O que se verifica nas análises realizadas para essa camada é que a superfície de ruptura fica toda contida no dique de partida, portanto a resistência do rejeito não influencia nos fatores de segurança.

A seção com escavação na cota de 1282,5 m apresenta Fator de segurança igual a 1,95, 6,3% maior que a da cota de 1285 m. Já na cota de 1280 m, verifica-se Fator de

segurança de 2,01, 2,8% maior que o obtido a elevação anterior. A elevação de 1277,5 m possui Fator de segurança de 2,34, 16,5% maior que da cota anterior e as elevações 1275 m e 1272,5 m apresentam Fator de segurança igual a 2,83 e 2,83, respectivamente. Valores 21,2% e 0,1% maior que das cotas anteriores. O Aumento gradativo observado nas ultimas camadas ocorre devido a diminuição da altura do dique de partida devido a escavação, o que gera o abatimento da inclinação global dos taludes.

O Fator de segurança da análise liquefeita da Seção Típica 133 é 0,3% menor que da análise de pico 0,83% maior em relação a escavação de montante para jusante. Para a Seção Típica 150, o Fator de segurança é 0,15% menor em relação a análise de pico e 0,05% em relação a outra metodologia. Já para a Seção Típica 169, o resultado apresentado é 0,1% maior que da análise de pico 0,3% menor comparado a escavação de montante para jusante. Na Seção Típica 185 verifica-se um valor 0,1% inferior ao Fator de segurança para análise de pico e 0,6% inferior para a metodologia de montante para jusante e, por fim, na Seção Típica 197, tem-se um Fator de segurança 0,04% menor em relação a análise de pico e 0,5% menor em comparação a análise liquefeita com escavação de montante para jusante.

A Figura 86 apresenta a formatação final do terreno pós descaracterização, em que foi utilizado material de reaterro para preenchimento das regiões descaracterizadas. O Fator de segurança apresentado é igual a 6,09.

5.4. COMPARATIVO

A Tabela 5 compila os Fatores de segurança obtidos ao longo de todo o processo de descaracterização, considerando tanto escavação de montante para jusante quanto de jusante para montante, nos cenários de pico e liquefeitos. As seções típicas utilizadas previamente, nas discussões realizadas nos tópicos anteriores, estão diferenciadas pelo uso da cor vermelha.

Tabela 5 – Fatores de segurança.

Seção Típica	Elevação	Análise de Pico com escavação de montante para jusante	Análise Liquefeita com escavação de montante para jusante	Análise de Pico com escavação de jusante para montante	Análise Liquefeita com escavação de jusante para montante
1	1306,67	1,23	0,49	1,21	0,47
2	1305	1,23	0,49	1,17	0,47
3	1305	1,23	0,49	1,25	0,48
4	1305	1,23	0,49	1,25	0,49
5	1305	1,23	0,49	1,25	0,49
6	1305	1,24	0,49	1,25	0,49
7	1305	1,24	0,49	1,25	0,49
8	1305	1,24	0,49	1,25	0,49
9	1305	1,24	0,49	1,25	0,49
10	1305	1,24	0,50	1,25	0,49
11	1305	1,24	0,51	1,25	0,49
12	1305	1,28	0,53	1,25	0,49
13	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
14	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
15	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,50
16	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
17	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
18	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
19	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
20	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,50
21	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
22	1302,5	1,28	0,53	1,25	0,49
23	1302,5	1,28	0,54	1,25	0,49
24	1302,5	1,36	0,56	1,25	0,49
25	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
26	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
27	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
28	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
29	1300	1,36	0,56	1,35	0,51
30	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
31	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
32	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
33	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
34	1300	1,36	0,56	1,35	0,52
35	1300	1,52	0,62	1,35	0,52
36	1297,5	1,58	0,63	1,51	0,56
37	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
38	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
39	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
40	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58

Seção Típica	Elevação	Análise de Pico com escavação de montante para jusante	Análise Liquefeita com escavação de montante para jusante	Análise de Pico com escavação de jusante para montante	Análise Liquefeita com escavação de jusante para montante
41	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
42	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
43	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
44	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
45	1297,5	1,58	0,63	1,57	0,58
46	1297,5	2,14	0,90	1,57	0,58
47	1295	2,23	0,93	1,95	0,80
48	1295	2,23	0,93	2,03	0,88
49	1295	2,23	0,93	2,03	0,90
50	1295	2,23	0,93	2,03	0,88
51	1295	2,23	0,93	2,03	0,89
52	1295	2,23	0,93	2,03	0,89
53	1295	2,23	0,92	2,03	0,89
54	1295	2,23	0,93	2,03	0,91
55	1295	2,23	0,93	2,03	0,89
56	1295	2,23	0,93	2,03	0,88
57	1295	2,23	0,93	2,03	0,88
58	1295	2,23	0,96	2,03	0,88
59	1295	2,23	1,03	2,03	0,89
60	1295	2,23	1,05	2,03	0,93
61	1295	1,81	1,38	2,03	0,90
62	1292,5	1,81	1,81	1,80	1,15
63	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
64	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
65	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
66	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
67	1292,5	1,81	1,81	1,90	1,17
68	1292,5	1,81	1,81	1,90	1,17
69	1292,5	1,81	1,81	1,90	1,17
70	1292,5	1,81	1,81	1,90	1,17
71	1292,5	1,81	1,81	1,90	1,17
72	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
73	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
74	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
75	1292,5	1,81	1,81	1,81	1,17
76	1290	1,82	1,82	1,81	2,04
77	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
78	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
79	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
80	1290	1,82	1,82	1,82	1,83
81	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
82	1290	1,82	1,82	1,82	1,82

Seção Típica	Elevação	Análise de Pico com escavação de montante para jusante	Análise Liquefeita com escavação de montante para jusante	Análise de Pico com escavação de jusante para montante	Análise Liquefeita com escavação de jusante para montante
83	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
84	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
85	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
86	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
87	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
88	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
89	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
90	1290	1,82	1,82	1,82	1,82
91	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
92	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
93	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
94	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
95	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
96	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
97	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
98	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
99	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
100	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
101	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
102	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
103	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
104	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
105	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
106	1287,5	1,83	1,83	1,83	1,83
107	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
108	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
109	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
110	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
111	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
112	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
113	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
114	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
115	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
116	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
117	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
118	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
119	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
120	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
121	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
122	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
123	1285	1,84	1,84	1,83	1,83
124	1285	1,93	1,92	1,95	1,94

Seção Típica	Elevação	Análise de Pico com escavação de montante para jusante	Análise Liquefeita com escavação de montante para jusante	Análise de Pico com escavação de jusante para montante	Análise Liquefeita com escavação de jusante para montante
125	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
126	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
127	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
128	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
129	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
130	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
131	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
132	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
133	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
134	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
135	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
136	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
137	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
138	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
139	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
140	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
141	1282,5	1,94	1,93	1,96	1,95
142	1282,5	1,99	1,99	1,99	1,99
143	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
144	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
145	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
146	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
147	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
148	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
149	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
150	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
151	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
152	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
153	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
154	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
155	1280	2,01	2,01	2,01	1,99
156	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
157	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
158	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
159	1280	2,01	2,01	2,01	2,01
160	1280	2,31	2,33	2,32	2,31
161	1277,5	2,34	2,34	2,33	2,34
162	1277,5	2,34	2,34	2,33	2,34
163	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,34
164	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,34
165	1277,5	2,35	2,34	2,33	2,34
166	1277,5	2,34	2,34	2,33	2,33

Seção Típica	Elevação	Análise de Pico com escavação de montante para jusante	Análise Liquefeita com escavação de montante para jusante	Análise de Pico com escavação de jusante para montante	Análise Liquefeita com escavação de jusante para montante
167	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,35
168	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,33
169	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,34
170	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,33
171	1277,5	2,35	2,34	2,33	2,34
172	1277,5	2,33	2,34	2,33	2,33
173	1277,5	2,34	2,34	2,33	2,34
174	1277,5	2,33	2,34	2,34	2,34
175	1277,5	2,34	2,34	2,34	2,33
176	1277,5	2,35	2,34	2,34	2,33
177	1277,5	2,83	2,83	2,82	2,82
178	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
179	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
180	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
181	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
182	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
183	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
184	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
185	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
186	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
187	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
188	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
189	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
190	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
191	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
192	1275	2,85	2,85	2,83	2,83
193	1275	2,84	2,85	2,83	2,83
194	1272,5	2,85	2,85	2,83	2,83
195	1272,5	2,84	2,85	2,83	2,83
196	1272,5	2,84	2,85	2,83	2,83
197	1272,5	2,84	2,85	2,83	2,83
198	1272,5	2,85	2,85	2,83	2,83
199	1272,5	2,85	2,85	2,83	2,83
200	1272,5	6,08	6,05	6,19	6,09

O método de Olson, como explicitado, define que, como todas as análises de pico (em ambos os sentidos de escavação) apresentaram fatores de segurança acima de 1, não há possibilidade de disparo de gatilho de liquefação para carregamento estático. Porém o valor de referência para verificação de disparo de liquefação fica a cargo do projetista, sendo usualmente adotado 1,3. Com base nessa referência, até aproximadamente a seção

típica 24, correspondente a cota de 1302,5 m, há maior possibilidade de disparo de gatilho de liquefação, evidenciando que a escavação das duas primeiras camadas seria a etapa mais crítica do processo.

Como abordado por Mendes (2019), com o uso do *Geostudio* não é possível utilizar o Método de Olson conforme originalmente preconizado pelo autor, sendo necessário adaptá-lo. Isso se deve pois o *software* não apresenta a possibilidade de verificação do fator de segurança fatia por fatia, apresentando apenas um fator de segurança único para a seção crítica. O fator de segurança fatia por fatia permitiria simular o efeito de propagação da liquefação para regiões vizinhas e determinar se a ocorrência de uma liquefação pontual teria condições de se espalhar causando uma ruptura global da estrutura.

Dessa forma, como explicado anteriormente, utilizou-se a razão de resistência liquefeita para todo o rejeito abaixo da linha freática nas análises liquefeitas. Com essa consideração, adota-se a premissa de que a liquefação se propaga e atinge toda a massa de rejeito saturada.

A Figura 87 compila em um gráfico os Fatores de segurança obtidos. Os resultados foram divididos em 4 grupos, os mesmos estabelecidos para as famílias de análises.

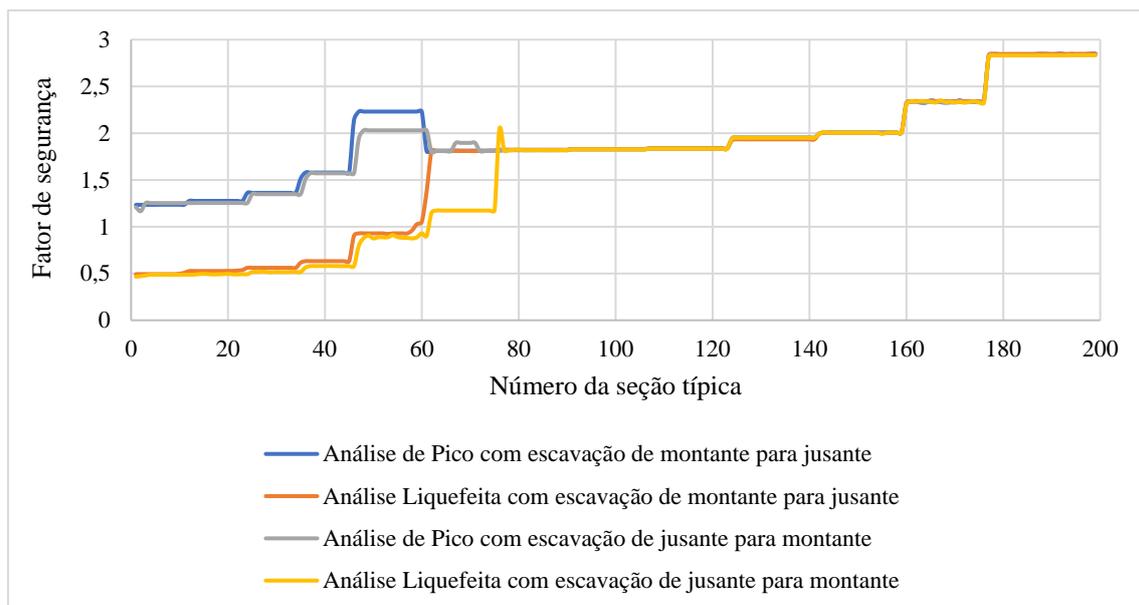


Figura 87 – Fatores de segurança ao longo da descaracterização da barragem.

Caso a liquefação fosse ativada, observa-se que haveria ruptura por fluxo de liquefação nas escavações até, aproximadamente, a seção típica de número 60, em que as análises liquefeitas apresentam fatores de segurança menores que 1. Essa seção típica está na cota 1295 m. Dessa forma, infere-se que seria uma possibilidade de descaracterização da estrutura considerar que a escavação é necessária apenas até a cota de 1292,5 m.

Com o avanço da escavação em cotas inferiores, há um significativo ganho de resistência na estrutura, mas olhando puramente do ponto de vista legal, partindo do pressuposto que as barragens de rejeito com alteamento a montante foram proibidas devido ao alto potencial de liquefação desse tipo de estrutura, a partir do momento em que a estrutura não apresenta mais risco de ruína por esse tipo de ruptura, pode-se considerar a descaracterização completa. Após a escavação até essa cota, caso fosse considerado a descaracterização concluída, é necessário promover a vegetação da região e incorporação da estrutura com a topografia local, realizando monitoramento e manutenções relacionadas à boas práticas de engenharia já adotadas para fechamento de mina.

A Figura 87 também permite inferir que as análises com escavação de montante para jusante, tanto utilizando razão de resistência de pico quanto liquefeita, apresentam fatores de segurança ligeiramente superiores do que no sentido de jusante para montante. O resultado obtido está em contramão ao observado em campo.

Usualmente, as descaracterizações de barragens de rejeito iniciam-se na região do alteamento e prosseguem até o limite da estrutura, ou seja, no sentido de jusante para montante. Essa tomada de decisão, à primeira vista contrária a segurança das estruturas, se analisado puramente os resultados apresentados na Figura 87, se deve graças aos estudos realizados em projetos de descaracterização de barragens de rejeito a montante para tensão-deformação.

As peculiaridades das estruturas definem a necessidade de estudos caso a caso, bem como uma visão ampla do cenário. A estabilidade de talude é um fator de extrema importância para a segurança de barramentos, mas há outros atributos que devem ser

levados em consideração e que embasam a execução de alternativas distintas. Nesse caso, como a diferença do Fator de segurança para metodologias distintas é de apenas, em média, de cerca de 1%, os resultados de tensão-deformação, características logísticas do site e construtibilidade são fatores que irão determinar a metodologia de descaracterização da estrutura.

Alguns resultados apresentados pela Figura 87 fogem da tendência observada para as demais análises. Observa-se, por exemplo, um brusco aumento e depois uma queda no Fator de segurança entre as análises de pico 45 e 60, para as duas metodologias de escavação. Esse fenômeno é observado na elevação de 1295 m.

A diferença nas superfícies de ruptura explica tal fenômeno. Na camada de escavação alocada na cota de 1295 m verifica-se uma superfície de ruptura mais localizada e profunda, na região da crista da barragem e com Fator de segurança maior. Já na cota de 1292,5 m, verifica-se que com a retirada do material alocado na elevação de 1295 m, há um rearranjo no equilíbrio de forças da seção, alterando a superfície de ruptura para a região do pé do talude, onde há predominância de outros materiais, com características dos solos distintas. Isso acarreta em uma cunha de ruptura mais superficial e com o Fator de segurança menor.

A convergência dos resultados para os quatro grupos de análises ocorre na elevação de 1290 m, aproximadamente na Seção Típica 76. Portanto, em resumo, verifica-se que para estabilidade de taludes ambas as logísticas de escavações apresentam resultados satisfatórios e na medida em que a escavação avança há um crescimento significativo e progressivo dos Fatores de segurança.

6. CONCLUSÕES

O uso do Método de Olson é uma ferramenta importante para a identificação de potencial de liquefação sem a necessidade de modelos constitutivos mais complexos e com resultados satisfatórios. A escolha de se adotar a escavação como método de descaracterização está em acordo com o observado empiricamente, sendo a técnica que mais se adequa às características dos rejeitos encontrados nos complexos minerários brasileiros.

Para a seção típica inicial utilizada, o sentido de escavação não influenciou significativamente nos Fatores de segurança obtidos, sendo que os resultados foram ligeiramente superiores com escavação de montante para jusante na maioria das seções, porém é necessário abordagens mais abrangentes e considerando outras características das estruturas para tomadas de decisões, tais como alívios de tensões e logística do complexo minerário. Verifica-se que atualmente os projetos de descaracterização utilizam a premissa de escavação de jusante para montante, justamente por abarcarem outras variáveis pertinentes ao projeto, tal como tensão-deformação, e construtibilidade da obra de descaracterização.

Conforme definido pelo Método de Olson, quando os fatores de segurança das análises de pico são menores que 1, há possibilidade de disparo de gatilho de liquefação, e caso o fator de segurança para análise liquefeita for menor que 1, a liquefação gerada ocasionaria na ruptura por fluxo por liquefação. Sendo assim, verifica-se que para a seção transversal utilizada, há baixa possibilidade de gatilho de liquefação em condições normais da estrutura.

Porém, em eventual existência de algum fator de influência externa que atue como gatilho de liquefação, haveria ruptura da estrutura até a elevação de 1295 m. Torna-se explícito a importância de assegurar que as condições no canteiro de obras sejam controladas o máximo possível, principalmente durante a escavação das primeiras camadas da barragem.

Ainda, é importante destacar que, ao longo da escavação, verificou-se uma região de abrupto crescimento e posterior queda nos fatores de segurança. As superfícies de ruptura nessa elevação evidenciam que as complexidades da geometria influenciam substancialmente nos resultados apresentados e não devem ser ignoradas. Portanto, apesar dos resultados apresentados definirem uma clara tendência de aumento de resistência ao longo do processo de escavação, geometrias distintas podem apresentar peculiaridades que determinem resultados contrários.

Quanto a influência da razão de resistência liquefeita, verifica-se que a mesma ocorre até a elevação de 1290 m. Como validado nos estudos de caso apresentados, geralmente a influência da fundação, diques e alteamento são menores, sendo que o que determina a estabilidade da barragem são as propriedades dos rejeitos. Corroborando com o exposto, nas camadas iniciais os fatores de segurança para as análises liquefeitas são cerca de 60% menores que para as análises de pico. Na medida em que a cunha de ruptura se desloca ao longo da estrutura e o rejeito passa a ser menos influente, ocupando uma menor região da superfície de ruptura, essa influência cai e os resultados convergem para valores próximos, com fatores de segurança acima de 1,8.

As metodologias de descaracterização de barragens de rejeito apresentadas requerem especial atenção nas primeiras camadas de escavação. Nessas etapas são onde verifica-se maior variabilidade dos resultados e fatores de segurança menores. Por isso, o uso de equipamentos não tripulados e a construção de estruturas de contenção a jusante são ferramentas que evitam perdas de vidas humanas e a viabilidade de implementação delas devem ser estudadas.

Vale frisar que o método de equilíbrio limite é uma ferramenta que permite uma abordagem inicial do tema, mas que carece de análises mais aprofundadas para fins de tomada de decisão de projeto. O uso de modelo constitutivos é primordial para definição de liquefação em barragens, sendo que o Método de Olson é uma ferramenta que fornece um panorama geral de cenários mais incipientes ao longo do processo de projeto, quando há carência de dados disponíveis.

Por fim, verifica-se que o processo de descaracterização de barragens de rejeitos ainda apresenta algumas indefinições, com premissas que variam muito conforme a

estrutura e região em que o complexo minerário está inserido, da disponibilidade de recursos financeiros e características hidrológicas e geomorfológicas da região. É necessário inspeção e monitoramento das estruturas ao longo da descaracterização, de modo a garantir sua segurança e eficiente gestão de risco das estruturas.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Uso do Método de Olson para realização de análises considerando outros métodos de descaracterização, tais como: rebaixamento de lençol freático e cravação de estacas com tecnologias de controle de vibração.
- Expandir o estudo atual realizando análises tensão-deformação de modo a permitir uma tomada de decisão embasada em um cenário mais completo.
- Realizar o estudo em seções transversais com outra geometria e propriedades geotécnicas distintas, de modo a avaliar se os resultados obtidos podem ser generalizados para estruturas diferentes.
- Utilizar o Método de Olson em abordagens tridimensionais.
- Usar a seção típica utilizada em diferentes análises numéricas com modelos constitutivos distintos para permitir a comparação dos resultados encontrados com as demais metodologias.

7. REFERÊNCIAS

- ABMS. (2022). Nota Técnica nº 001/2022 - PRAZO PARA DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO CONSTRUÍDAS PELO MÉTODO À MONTANTE.
- ABNT. (2017). Mineração-Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água-Requisitos Mining-Preparation and presentation of design of tailings, sediments and/or water dams-Requirements. www.abnt.org.br
- AMBRASEYS, N. N. (1988). Engineering seismology: Part I. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 17(1), 1–50. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290170101>
- ANCOLD. (2012). Australian National Committee on Large Dams. Guidelines on tailings dams: planning, design, construction, operation and closure. In Ancold (Issue May).
- ANM. (2021). Minuta de Resolução ANM n 2607242, de 09 de junho de 2021.
- ANM. (2022). Report trimestral de Descaracterização de Barragens a montante. <https://app.dnpm.gov.br/Sigbm/publico>.
- APOLINAR AGUILAR CHUQUIMUNI, R. (2005). Análise numérica do alteamento de barragens de terra [pontifícia universidade católica do rio de janeiro]. In Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.8624>
- LEI Nº 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000., 1 (2010). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm
- LEI Nº 14.066, DE 30 DE SETEMBRO DE 2020. Altera a Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei no 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei no 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração), 1 (2020). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#view
- CASAGRANDE, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. 23, 257–275.

- CIMNE - CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA (UPC - UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA). (2021). Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho Final Report.
- DAVIES, M., MCROBERTS, E., & MARTIN, T. E. (2002). Static liquefaction of tailings: fundamentals and case histories. Tailing Dams 2002: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Society on Dams, April 29-May 1, 2002, Orleans Hotel, Las Vegas, Nevada.
- DUARTE, A. P. (2008). Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco. Dissertação de Mestrado, 130.
- ESPÓSITO, T. J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Universidade de Brasília.
- FEAM. (2021). PORTARIA FEAM Nº 679, DE 06 DE MAIO DE 2021. . . Informativo Nº 4, 1–31. <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/3198>
- FEAR, C. E., & ROBERTSON, P. K. (1995). Estimating the undrained strength of sand: a theoretical framework. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 859–870. <https://doi.org/10.1139/t95-082>
- IBRAM. (2016). Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. In Instituto Brasileiro de Mineração. <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>
- IBRAM. (2020). Infográfico Mineração em Números - 2020.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). (1996). A guide to tailings dams and impoundments. bulletin.
- KRAMER, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (Prentice Hall, Ed.).
- MAO, Y., & KAM, S. (2011). Closure of tailings dams. *Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure*, 361–372. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1152_38_mao
- MENDES, L. O. (2019). Análise Probabilística do Potencial de Falha Por Liquefação Estática e Dinâmica de Barragens. Universidade de Brasília.
- MORGENSTERN, N. R., VICK, S. G., VIOTTI, C. B., & WATTS, B. D. (2016). Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão. 95. <http://fundaoinvestigation.com/wp-content/uploads/general/PR/pt/FinalReport.pdf>
- NETO, P. F. (2009). Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia. 154.

- OLSON, S. (2001). Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance. 564.
- PEREIRA, E. L. (2005). Estudo de potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 210.
- POULOS, S. J., CASTRO, G., & FRANCE, J. W. (1985). Liquefaction Evaluation Procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(6), 772–792. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:6\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:6(772))
- PULINO, A. M. (2010). Índices De Estimativa de Custos de Fechamento de Pilhas de Estéril E Barragens De Rejeitos. Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG.
- RAFAEL, H. M. A. M., & ROMANEL, C. (2014). Potencial de Liquefação Estática no Alçamento de uma Barragem de Rejeito. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica, 10.
- RIBEIRO, L. F. M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragens de Rejeitos. Universidade de Brasília.
- ROBERTSON, P. K., MELO L., WILLIAMS, D. J., & WILSON, G. W. (2019). Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão (versão em Português). 88.
- SÁNCHEZ, L. E., SILVA-SÁNCHEZ, S. S., & NERI, A. C. (2013). Guia para planejamento do Fechamento de mina. www.ibram.org.br
- SOARES, L. (2010). Barragem de Rejeitos. *Tratamento de Minérios*, 831–896.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B., & MESRI, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John wiley & sons.
- VICK, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*.
- WANG, W. (1979). Some Findings in Soil Liquefaction. *Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*, 2(3), 55–63.