

aumento no recalque. Esta situação foi avaliada de tal forma que a o aumento da altura do dique seja coincidente com o recalque da camada de argila mole fazendo com que a cota do topo do dique não seja inferior a cota de projeto (cota 7 metros). Para as alturas iniciais na cota de projeto 7 metros os recalques encontrados constam no Quadro 6.

Quadro 6 - Recalques como dique na cota 7,0 metros

Parâmetros	Setor 2	Setor 3	
		Camada 1	Camada 2
Recalque (m)	0,14	0,24	0,20
Recalque Total (m)	0,14	0,45	

Fonte: Consultora (2019)

Conforme apresentado acima a altura final do dique foi definida em função da avaliação do recalque da camada de argila mole. O procedimento para a definição da altura final do dique foi realizado calculando-se o recalque da camada de argila mole e aumentando-se a altura, para a nova altura, onde foi calculado um novo recalque e conseqüentemente uma nova altura final para o dique. Tal procedimento foi repetido até que o acréscimo na altura do dique fosse igual ou ligeiramente superior ao recalque calculado para a camada de argila mole. A partir destes cálculos definiram-se as geometrias finais para o dique. Para o setor 2 adotou-se uma elevação de 30 cm e para o setor 3 uma elevação de 60 cm. No Quadro 7 os novos valores dos recalques considerando as novas alturas. Com os valores obtidos optou-se por considerar estes valores como acréscimo de elevação de modo a se obter uma folga em relação a cota 7 metros.

Quadro 7 – Recalques com dique na cota 7,3 metros e 7,6 metros

Parâmetros	Segmento 2	Setores 3	
		Camada 1	Camada 2
Recalque (m)	0,15	0,26	0,20
Recalque Total (m)	0,15	0,50	

Fonte: Consultora (2019)

5.4.2 Estudo do tempo de recalque

O tempo de recalque é influenciado, principalmente, pelas características de permeabilidade e condição de drenagem do solo. O método utilizado para estimar o tempo de adensamento foi a teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi. A teoria baseia-se nas seguintes premissas: o solo é considerado homogêneo e saturado; a compressibilidade dos grãos sólidos e da água são desprezíveis em relação a compressibilidade da massa de solo; não há diferença de comportamento entre massas

de solo de pequenas e grandes espessuras; o fluxo de água é vertical e unidimensional; na validade da Lei de Darcy; o índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento. O tempo de recalque é encontrado pela Equação 6.

$$t = \frac{T \times C_v}{Hd^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde

$T = 0,848$ (determinado segundo Taylor (1948), sendo que para o grau de adensamento de 90%)

Hd = distância de drenagem;

C_v = coeficiente de adensamento vertical e;

t = tempo estimado para que ocorra o determinado grau de adensamento.

O coeficiente de adensamento (C_v) é obtido por relação com o coeficiente de adensamento horizontal (C_h) determinado a partir de dados de ensaios de dissipação de poro-pressão da sondagem de piezocone. O valor de C_h foi estimado utilizando o modelo proposto por Houlsby e Teh (1988) corrigido pela equação apresentada por Balish e Levadoux (1986), resultando na Equação 7.

$$C_{h(\text{piezocone})} = (T * R^2 * \sqrt{I_r})/t \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

T^* = fator de tempo (Houlsby e Teh, 1988);

R = raio da base do cone

I_r = índice de rigidez ($I_r = G/Su = 135$, conforme Soares, 1997)

t = tempo de dissipação.

O índice de rigidez pode variar de 50 a 500, sendo que, $I_r = 135$ foi o valor adotado no estudo geotécnico de argilas moles da Grande Porto Alegre e recomendado por Soares (1997). O tempo de dissipação e o fator de tempo T^* correspondem a 50% da dissipação das poro-pressões, designados $t_{50\%}$ e $T^*50\%$, respectivamente. O valor de T^* para 50% de adensamento é igual a $T^* = 0,243$. O $t_{50\%}$ é determinado através do ensaio de dissipação.

Os valores de Ch obtidos por esse procedimento correspondem a propriedades de solo na faixa pré-adensada, uma vez que, durante a penetração, o material ao redor do cone é submetido a elevados níveis de deformação, comportando-se como solo em recompressão. Com o intuito de corrigir este efeito, Jamiolowski e outros (1985) propuseram uma abordagem semi-empírica para estimativa do Ch, conforme apresentada na Equação 8.

$$C_{h(piezocone)} = (T * R^2 * \sqrt{Ir})/t \tag{Equação 8}$$

Onde, segundo os autores, os valores experimentais medidos do coeficiente RR/CR variam na faixa entre 0,13 e 0,15. O valor adotado no projeto para este coeficiente foi de RR/CR = 0,15.

A partir do Ch obteve-se, por correlação o coeficiente de adensamento vertical (Cv) em função da anisotropia entre permeabilidade horizontal (Kh) e vertical (Kv). O Cv foi estimado considerando argilas homogêneas sem macroestrutura definida, com a relação Kh/Kv = 2,5 aplicados na Equação 9:

$$C_v = \frac{K_v}{K_h} \tag{Equação 9}$$

Tabela 12 - Parâmetros relacionados à dissipação no CPTu.

Prof. (m)	NA (m)	u0 (kPa)	umáx(kPa)	tmáx (s)	u50 (kPa)	t50 (s)
4,5	1,5	30	121,77	154	75,89	638
7,5	1,5	60	251,28	72	155,64	880

Fonte: Consultora (2019)

Tabela 13 - Parâmetros relacionados à dissipação no CPTu

Tempo dissipação (s)	Ch CPTu (cm²/s)	Ch NA (cm²/s)	Cv (cm²/s)	Cv (m²/s)
711	1,41E-02	2,12E-03	5,29E-04	5,29E-08
1016	1,02E-02	1,53E-03	3,83E-04	3,83E-08
Média	1,22E-02	1,82E-03	4,56E-04	4,56E-08

Fonte: Consultora (2019)

Os valores encontrados nos ensaios de CPTu foram confrontados com os resultados dos ensaios de adensamento conforme consta em anexo.

Conforme metodologia exposta acima os resultados encontrados para que ocorra todo o recalque são na ordem de 9,5 anos.

5.4.3 Análise de Estabilidade dos Taludes do Dique

Após definida a altura final do dique, realizou-se, análise de estabilidade dos taludes do dique para as mesmas condições apresentadas. Cabe ressaltar que dentro do setor 3 existem variações de alturas em função da topografia existente. Assim para determinação dos estudos foram selecionadas as seções mais críticas, no caso as de maior altura e menor distância entre o dique e o canal e o arroio Araçá, pois fornecerão menores valores de fator de segurança.

A análise de estabilidade dos taludes do dique foi realizada em função de várias situações, variando o nível de água no arroio e no canal e a saturação do dique.

A saturação do aterro foi simulada através do parâmetro de poropressão (r_u), considerado igual a 0,2. Para termos de comparação valores de $r_u = 0$ indicam talude seco e $r_u = 0,4$ indicam talude praticamente saturado, para o material em questão. Esta medida foi adotada para melhor simular as condições de ruptura do aterro, visto que o nível da água se encontra na interface do aterro/solo de fundação e, deste modo, pode ocorrer o fenômeno de capilaridade, ou ainda, qualquer infiltração que venha ocorrer.

Abaixo será apresentado o resultado da análise de estabilidade para a pior condição ao qual o dique estaria submetido em termos de estabilidade de taludes. Esta condição é o rebaixamento rápido do nível do arroio mantendo o dique saturado. A condição de saturação para o dique foi representa por um valor de r_u igual a 0,2 e 0,4.

Quanto aos critérios de dimensionamento foi adotado o fator de segurança mínimo igual a 1,5, de acordo com o que preconiza a norma NBR 11682 (Estabilidade de Encostas) nas condições normais de uso. Em situações extremas de solicitação (rebaixamento do nível de água rápido) foi aceito um fator de segurança mínimo de 1,30.

5.4.4 Altura máxima de aterro

De todas as condicionantes a natureza geotécnica e de fundação estão entre as mais relevantes, visto que deverão atender aos requisitos mínimos de estabilidade segurança das obras de terra, conforme exigido pela NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações.

Desta forma faz-se necessário saber que alturas de aterro a executar diretamente sobre as fundações existentes não poderão ser superiores ao determinado conforme Equação 10, exceto com adoção de medidas preventivas de estabilização e ou melhorias da resistência da camada mole.

$$hadm = \frac{5,14 \cdot Su}{\gamma_{aterro} \times FS}$$

Equação 10

No Quadro 8 podemos observar as alturas máximas para cada segmento. O cálculo expedito acima corresponde a uma situação limite (crítica), para Fator de Segurança (FS) unitário. Estabelecendo-se FS = 1,50 (mínimo), então a máxima altura de aterro para uma estabilidade minimamente satisfatória sem que haja ruptura de fundação resulta em:

Quadro 8 - Alturas admissíveis máxima por segmento.

	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
hadm (m)	3	4,3	5,80

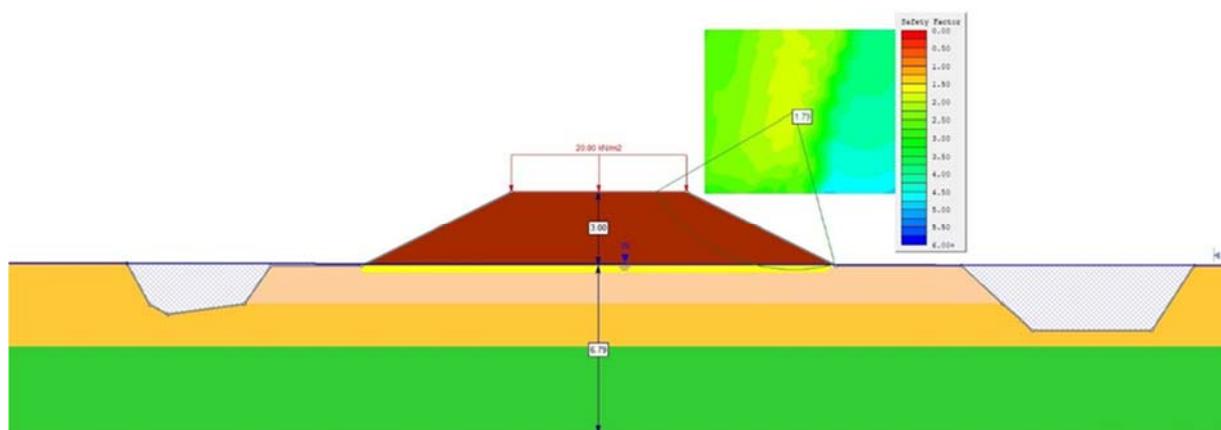
Fonte: Consultora (2019)

5.4.5 Análise de Estabilidade Equilíbrio Limite

5.4.5.1 Setor 01

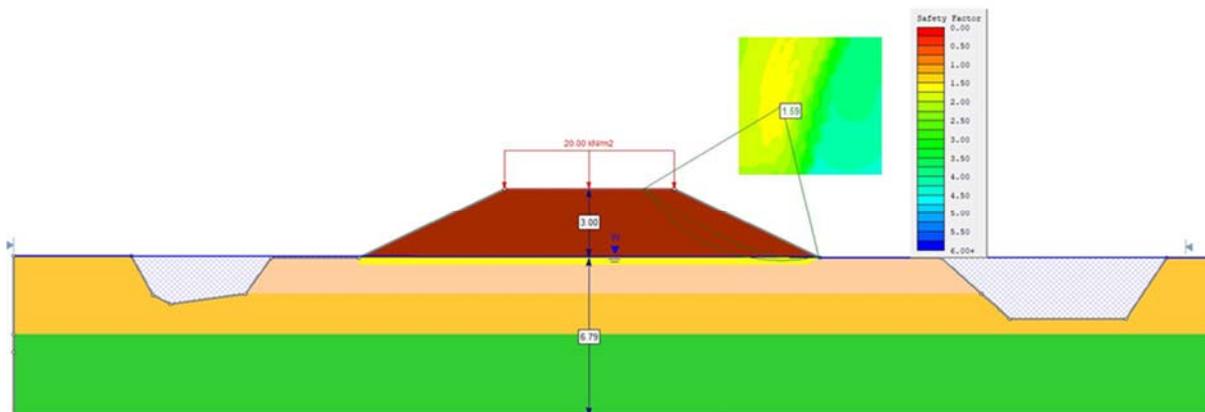
O segmento 1 que percorre da estaca 0+000 até à estaca 0+0+240, tem altura de 3 metros. A Figura 23 apresenta o resultado da análise de estabilidade, para a geometria do dique definida com rebaixamento rápido e considerando o aterro saturado $ru = 0,2$. A superfície de ruptura com menor fator de segurança é um fator de ruptura global de 1,79, atendendo assim a norma.

Figura 23 - Seção de Subleito e Aterro Projetado (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) $ru = 0,2$



Fonte: Consultora (2019)

Figura 24 - Seção de Subleito e Aterro Projetado (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) ru = 0,4

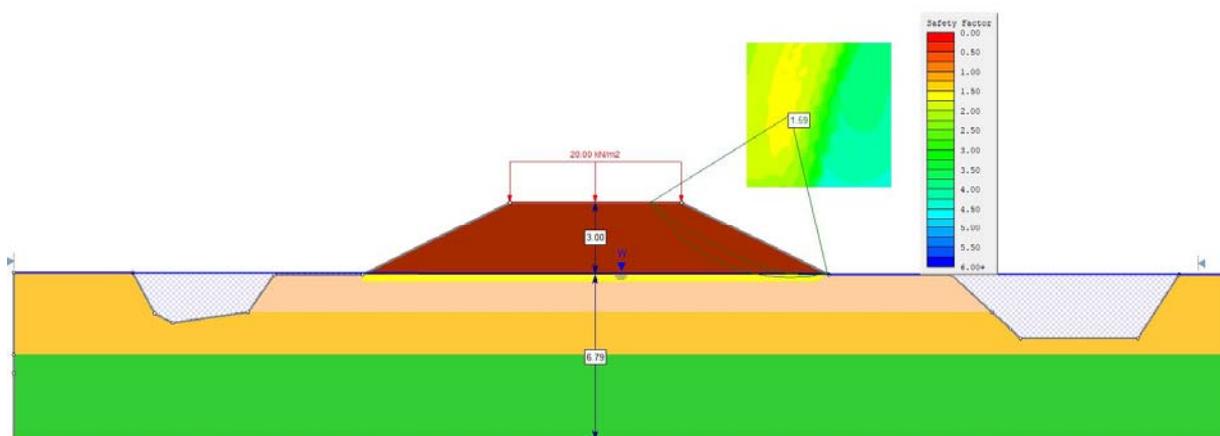


Fonte: Consultora (2019)

A Figura 24 apresenta o resultado da análise de estabilidade, para a geometria do dique definida com rebaixamento rápido e considerando o aterro saturado $ru = 0,4$. Observa-se a superfície de ruptura com menor fator de segurança é de 1,59, atendendo assim a norma.

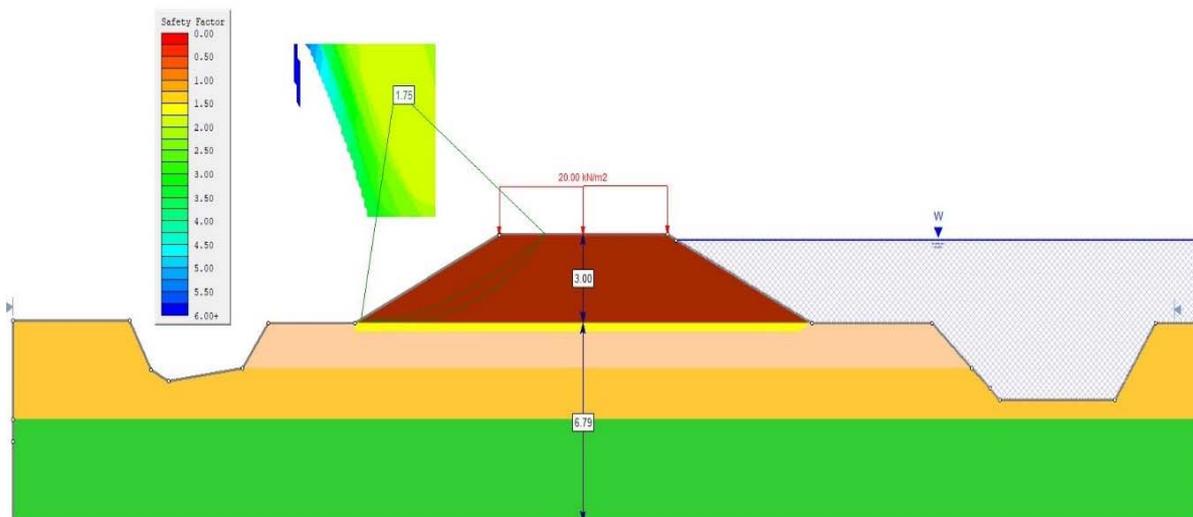
A Figura 25 apresenta o resultado da análise de estabilidade, para a geometria do dique definida com rebaixamento rápido e considerando o aterro saturado $ru = 0,2$ a superfície de ruptura com menor fator de segurança é um fator de uma ruptura global de 2,04, atendendo assim a norma.

Figura 25 - Seção de Subleito e Aterro Projetado (Análise de Ruptura – cota de cheia) ru = 0,2



Fonte: Consultora (2019)

Figura 26 - Seção de Subleito e Aterro Projetado (Análise de Ruptura – cota de cheia) ru = 0,4



Fonte: Consultora (2019)

Quadro 9 – Fator de Segurança para o setor 1

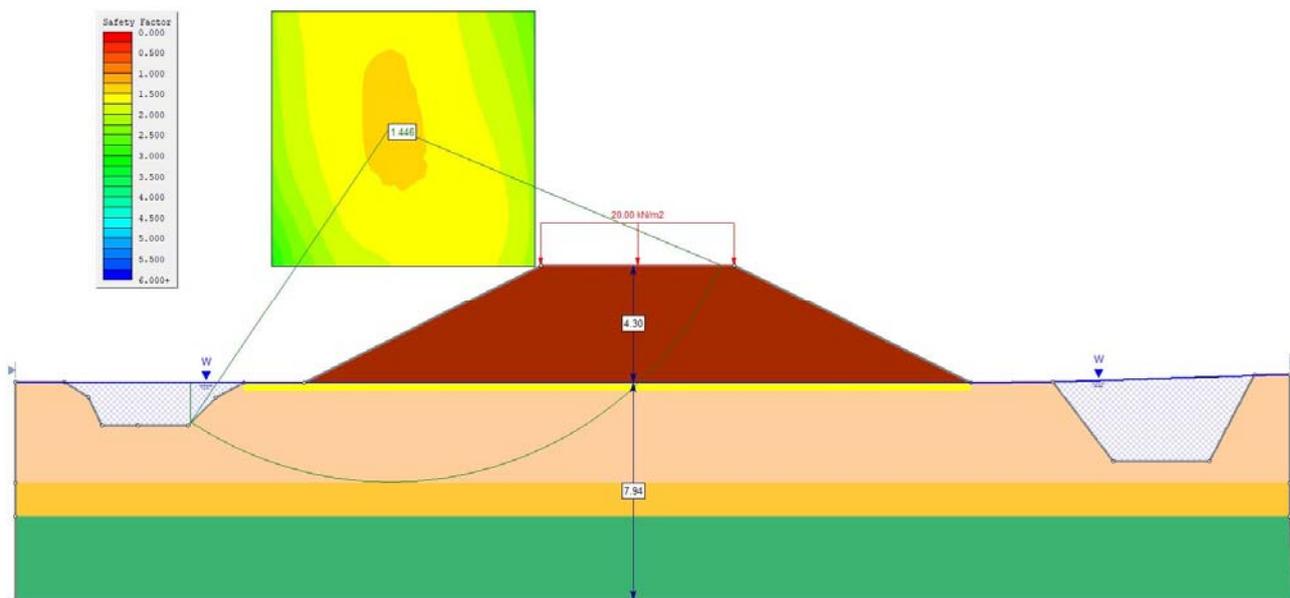
Estaca	Rebaixamento Rápido		Cota Cheia	
	Lado Canal	Lado Arroio Araçá	Lado Canal	Lado Arroio Araçá
0+0+240	Ru = 0,2			
	1,76	1,80	2,04	1,79
	Ru = 0,4			
	1,57	1,59	1,75	2,23

Fonte: Consultora (2019)

5.4.5.2 Setor 02

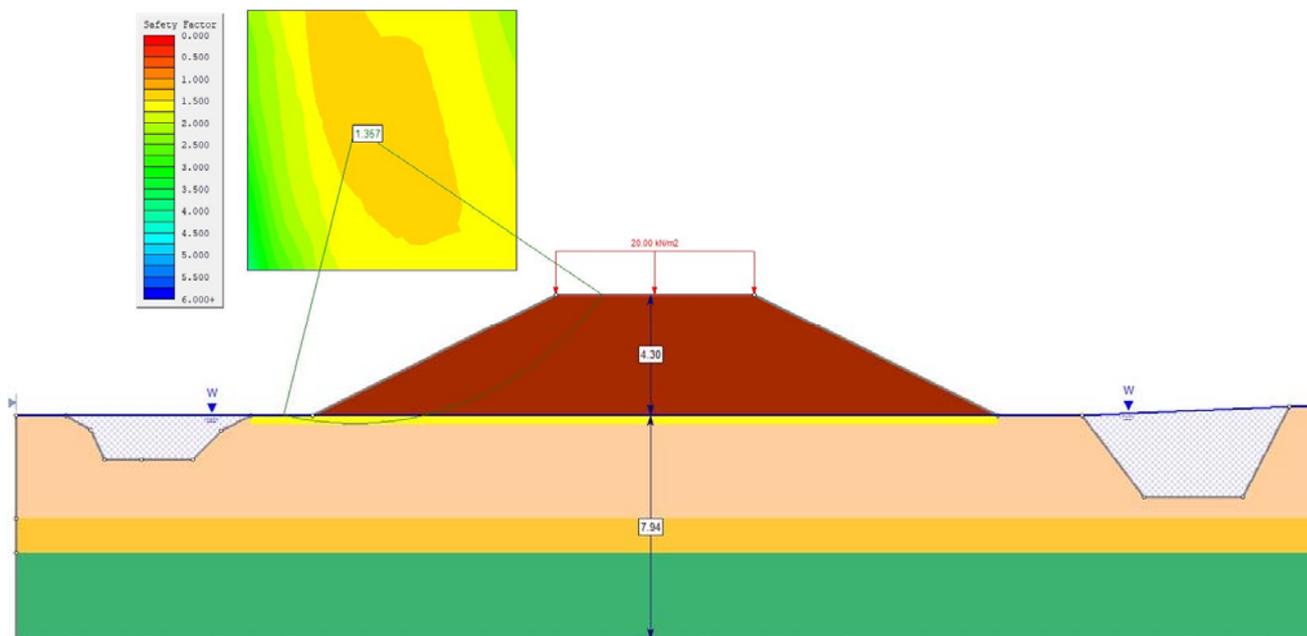
O segmento 2 percorre da estaca 0+240 até à estaca 0+900, tem altura de 4,3 metros.

Figura 27 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) $ru = 0,2$



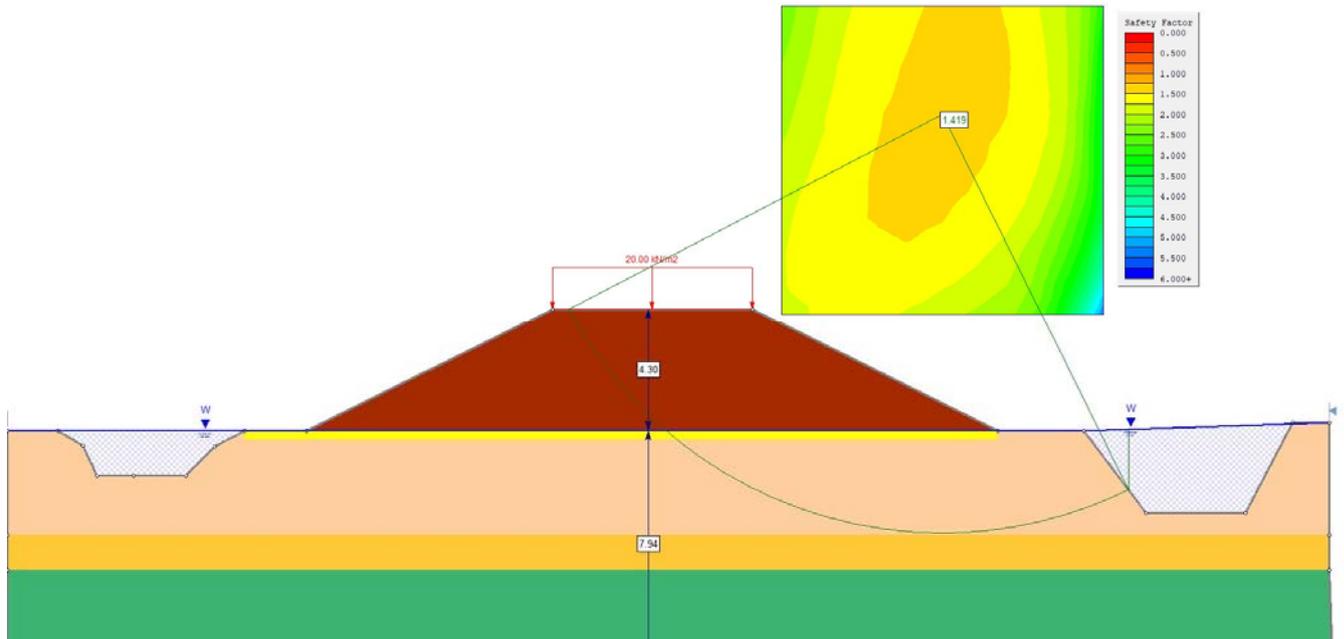
Fonte: Consultora (2019)

Figura 28 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) $ru = 0,4$



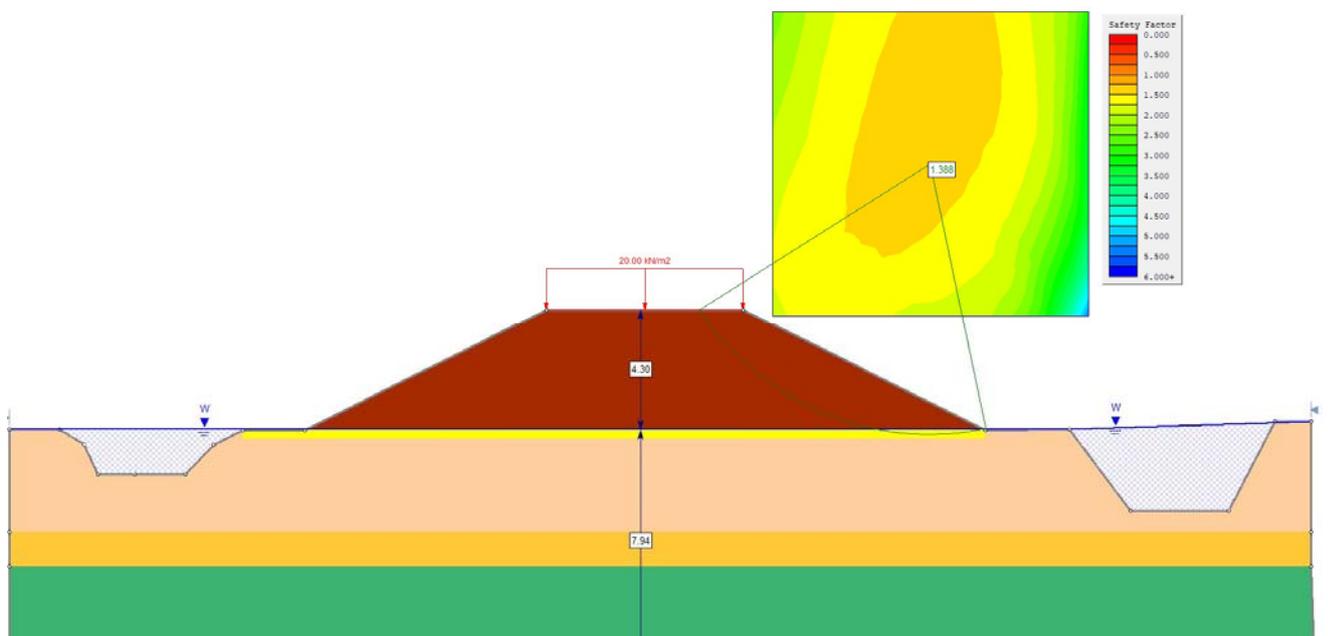
Fonte: Consultora (2019)

Figura 29 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) $ru = 0,2$



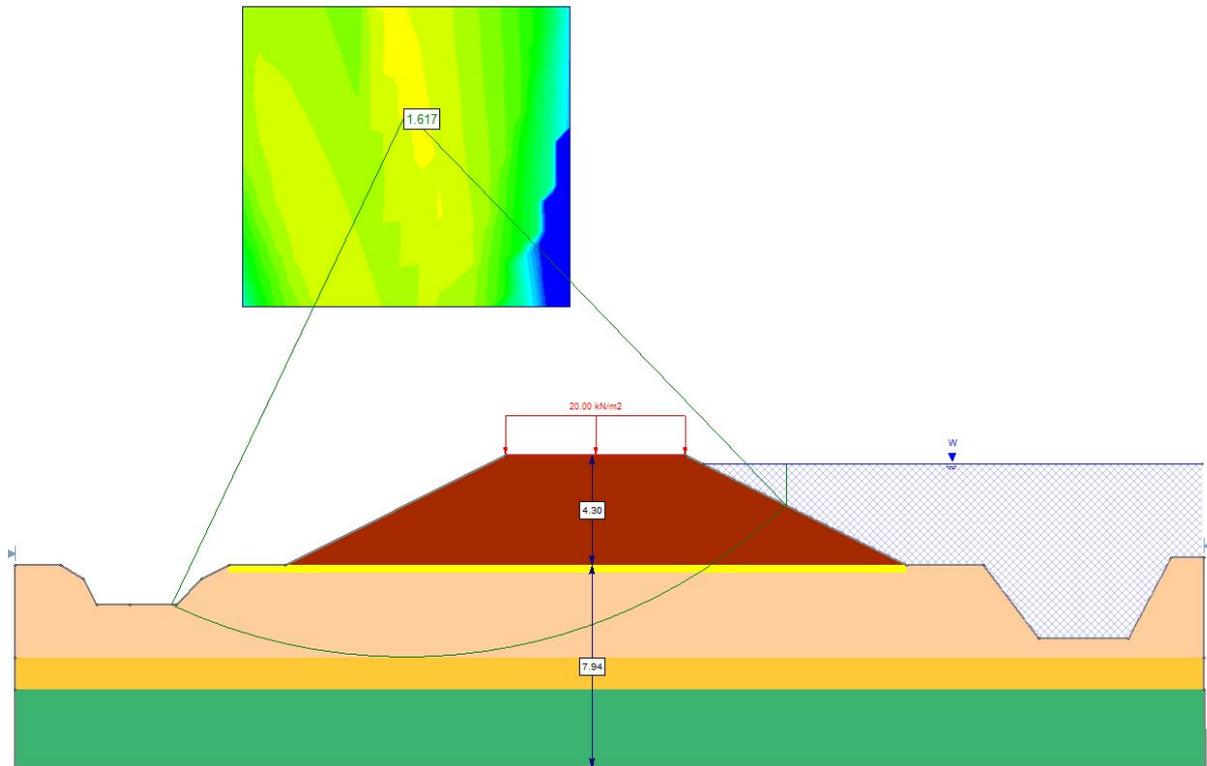
Fonte: Consultora (2019)

Figura 30 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura - rebaixamento rápido) $ru = 0,4$



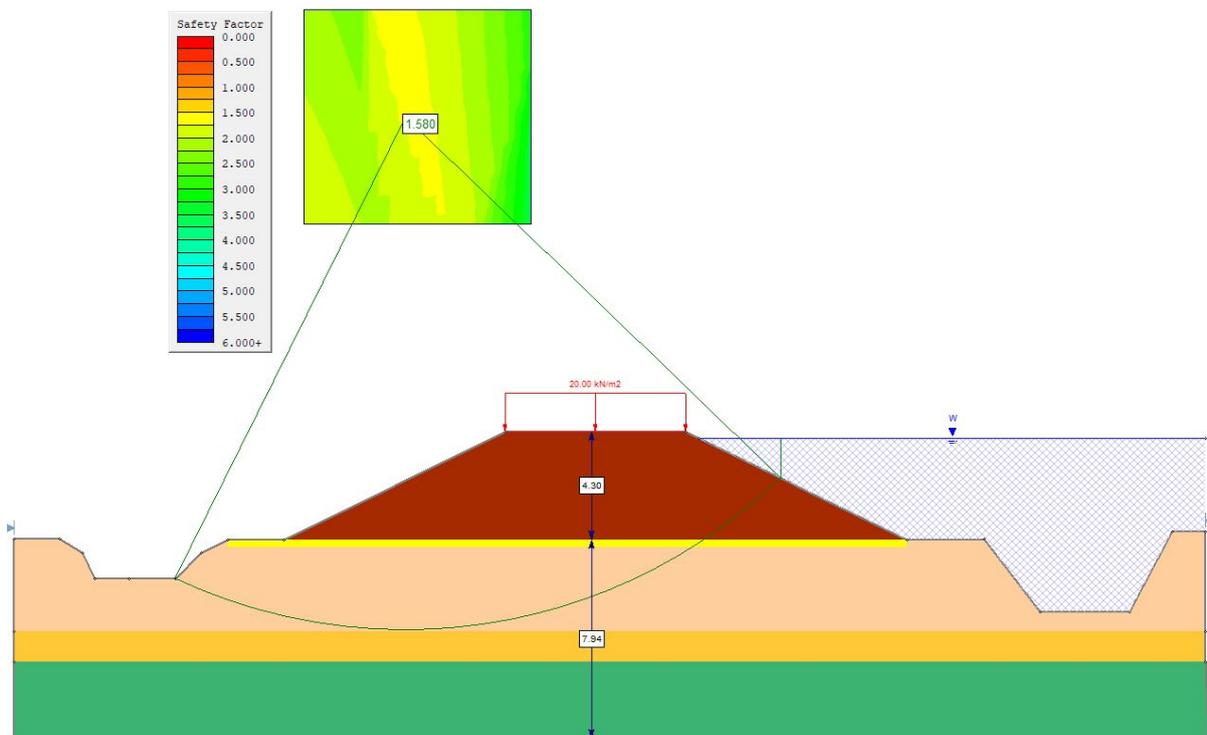
Fonte: Consultora (2019)

Figura 31 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura – cota de cheia) $ru = 0,2$



Fonte: Consultora (2019)

Figura 32 - Seção de Subleito e Aterro Projetado sem geogrelha (Análise de Ruptura – cota de cheia) $ru = 0,4$



Fonte: Consultora (2019)