

RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO
DIQUE 6A
ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM INTERNA
MEMÓRIA DE CÁLCULO

00	APROVADO 21/02/2014	ECE	MIS	FEV/13
Nº	Descrição	Prep.	Aprov.	Data
REVISÕES				

Estado do Documento:

APROVADO PARA CONSTRUÇÃO


Intertechne

ENGEVIX


UHE BELO MONTE

Elaborador	MIS	INTERTECHNE: Rogério Piovesan Gerente/Coordenador	ENGEVIX: Luiz Bianchi Gerente/Coordenador	PCE: Liberio Alves da Silva Gerente/Coordenador	NESA:
Verificador	SAS	Kamal F.S. Kamel Responsável Técnico CREA PR – 20298/D	José Antunes Sobrinho Responsável Técnico CREA PR – 21.207-4	José Eduardo Moreira Responsável Técnico CREA RJ – 21112/D	Diretor de Construção
Supervisor	SAS	Paulo V. Reis Gerente Geral Consórcio Projetista			Data: OUT/13

Nº Cliente ou Código Unificado

RI3-D06A-ITT-CDQ-MC-0001

Rev.

00

RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO
DIQUE 6A
ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM INTERNA
MEMÓRIA DE CÁLCULO

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
3.	SUMÁRIO E LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO	3
4.	DESCRIÇÃO GEOMÉTRICA E DAS CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS DE FUNDAÇÃO DAS OBRAS DE TERRA.....	4
5.	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM.....	5
6.	ANÁLISE DE FLUXO	5
6.1.	GERAL	5
6.2.	SEÇÕES DE ANÁLISE	6
6.3.	MODELO HIDROGEOLÓGICO	11
6.3.1	Parâmetros Hidráulicos	11
6.3.2	Condições de Contorno	13
6.3.3	Metodologia de Análise	13
6.3.4	Resultados	14
7.	DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM INTERNA.....	15
7.1.	GERAL	15
7.2.	FILTRO VERTICAL.....	15
7.3.	TAPETE DRENANTE	16
7.3.1	Tapete Drenante – Dimensionamento Transversal	16
7.3.2	Tapete Drenante – Dimensionamento Longitudinal	17
7.3.3	Tapete Drenante – Dimensionamento dos drenos de saída	19
7.4.	TRINCHEIRA DE DRENAGEM	21
8.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM.....	21

RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO
DIQUE 6A
ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM INTERNA
MEMÓRIA DE CÁLCULO

1. INTRODUÇÃO

O presente documento tem como objetivo apresentar os cálculos de percolação e dimensionamento do sistema interno de drenagem referentes ao projeto executivo do Dique 6A, das obras do Reservatório Intermediário da UHE Belo Monte.

2. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- RI3-D099-ITT-CGG-DE-0002 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUES 6A E 6B – LOCALIZAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES E SEÇÕES GEOLÓGICO-GEOTECNICAS– PLANTA
- RI3-D06A-ITT-CGS-DE-0001 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUE 6A SEÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS – SEÇÃO LONGITUDINAL 1
- RI3-D06A-ITT-CGS-DE-0002 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUE 6A SEÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS – SEÇÕES 2, 3 e 4.
- RI3-D06A-ITT-CES-DE-0001 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUE 6A ESCAVAÇÃO COMUM – PLANTA
- RI3-D06A-ITT-CTG-DE-0001 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUE 6A ATERRO – PLANTA
- RI3-D06A-ITT-CTG-DE-0021 – RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO – DIQUE 6A DRENAGEM INTERNA – PLANTA

3. SUMÁRIO E LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

A UHE Belo Monte será construída no rio Xingu, nos Municípios de Altamira e Vitória do Xingu, no Estado do Pará.

O arranjo geral da UHE Belo Monte se caracteriza por apresentar sítios de obras distintos e distantes entre si, desde o barramento principal das calhas naturais do rio Xingu, no sítio denominado Pimental, até o sítio Belo Monte, onde será construída a Casa de Força Principal do empreendimento.

A distância entre estes dois sítios, em linha reta, é de aproximadamente 40km. Entre os sítios será construído um sistema de adução à Casa de Força Principal, constituído

UHE BELO MONTE

pelo Canal de Derivação e pelo Reservatório Intermediário, sendo este último formado por diques e canais de transposição.

O dique 6A está localizado no Reservatório Intermediário, precedendo os diques 6B e 6C, tendo sua estaca E.0+0,00 nas coordenadas N 9.652.564,524 e E 413.653,968.

4. DESCRIÇÃO GEOMÉTRICA E DAS CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS DE FUNDAÇÃO DAS OBRAS DE TERRA

O dique 6A apresenta uma extensão de aproximadamente 870,00 metros e altura máxima no eixo de 40,00 metros. A crista do dique encontra-se na El.100,00m com largura de 5,00m. O dique terá seção homogênea em solo compactado.

O talude de montante apresenta inclinação de 1V:1,8H com berma de 3,00m na El.92,50m (pé da proteção do rip-rap). O talude está protegido contra ondas por uma camada de rip-rap, acima da El. 92,50m, com D_{50min} de 41cm e largura de 2,50m. Entre o rip-rap e o aterro de solo compactado está prevista uma camada de transição única compactada com 1,00m de largura.

O talude de montante possui ainda uma berma de equilíbrio com 10 metros de largura na El.65,00m entre as estacas E.21+0,00 e E.27+0,00 e uma com 5 metros de largura na El.91,00m na região das ombreiras.

O talude de jusante apresenta inclinação de 1V:1,8H da crista até a base do dique, com duas bermas de equilíbrio intermediárias com largura de 4,00m nas elevações El.90,00m e El.80,00m.

A região de implantação do Dique 6A é caracterizada pela presença de solos superficiais que são constituídos por colúvios com espessuras variando entre 0,30 e 2,0 m. No fundo do vale, sob o capeamento desses solos superficiais, ocorrem os solos residuais jovens e maduros de migmatito, com espessuras aproximadas de 30 a 40 metros, até o limite inferior definido pelo topo do maciço rochoso migmatítico.

Inspeções de campo identificaram um “bolsão” de SRRT com espessura de aproximadamente 2,00m no talude de montante da trincheira exploratória na estaca E.18+10,00. Nesta estaca também ocorre a maior extensão do “bolsão” de SRRT (40m de afastamento para montante e 15m para jusante do eixo). Nas estacas E.17+00,00 e E.20+10,00, ainda na trincheira exploratória, foram identificados os contatos que delimitam a área do SRRT.

Na ombreira esquerda, entre as estacas E.33+0,00 e E.38+0,00 encontra-se uma camada de solo residual de ritmito com espessura de 1 a 10 metros sobre uma camada de solo residual jovem de migmatito. A partir da estaca 38 o solo residual de ritmito encontra-se diretamente sobre o maciço de ritmito.

Na ombreira direita, entre estacas E.0+0,00 e E.8+0,00, também observa-se uma camada de solo residual de ritmito com espessuras entre 5 a 10 metros, parte sobre ritmito e parte sobre solo residual jovem de migmatito.

O sistema de drenagem interna do dique será constituído de um filtro vertical de areia com espessura de 70cm e topo na El.97,50m, correspondente ao N.A. Máximo, e um

UHE BELO MONTE

tapete drenante sob o espaldar de jusante, com seção tipo “sanduíche” com 3 camadas de transição constituídas pelos materiais 3-C – 4A-C – 3-C com espessuras de 0,20m ; 0,50m e 0,40m, de cima para baixo respectivamente.

Serão executados drenos nos pontos mais baixos (Estacas 10+0,00 e 26+15,00) com o objetivo de possibilitar a saída transversal da água proveniente do fluxo longitudinal. O dreno será composto por 5 camadas (3-C, 4A-C, 4B-C, 4A-C, 3-C) com espessuras de 40cm, 30cm, 30cm, 30cm e 20cm de baixo para cima, com larguras de 5,00m e 10,00m respectivamente.

Além disso, serão executados quatro septos com a finalidade de interceptar o fluxo longitudinal e direcionar as águas para as saídas de drenagem.

Junto ao pé de jusante do maciço deverá ser executada uma trincheira drenante de 0,80 m de largura para captar parte do fluxo da fundação, orientando-o pelo pé da barragem. Acima deste, na saída do tapete drenante, deverá ser executado um dreno de pé composto de camadas de transição recobertas por enrocamento de proteção.

5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM

O sistema de drenagem do Dique 6A compõe-se de filtro vertical, à jusante do núcleo impermeável e tapete drenante do tipo “sanduíche” de 3 camadas sob os espaldares a jusante.

Na região central do dique está previsto a execução de filtro horizontal suspenso devido à topografia acidentada presente no trecho compreendido entre as estacas 22 e 31.

O filtro vertical de areia, com espessura de 0,70m, tem o objetivo de captar a água que percola pelo maciço do Dique, conduzindo esta vazão até o tapete drenante à jusante.

O tapete drenante tem a função de conduzir a vazão captada pelo filtro vertical, bem como aquela que percola pelo maciço de fundação, sendo que sua descarga se dá parte no sentido transversal e parte no sentido longitudinal ao eixo do Dique.

Além do filtro vertical e do tapete drenante, o sistema de drenagem será complementado por uma trincheira drenante a ser escavada junto ao dreno de pé. Esta trincheira tem a função de captar o fluxo de água que percola subsuperficialmente no terreno, rebaixando localmente o lençol freático e reduzindo as poropressões do terreno de fundação.

6. ANÁLISE DE FLUXO

6.1. GERAL

Este item apresenta as análises de percolação desenvolvidas com a finalidade de dimensionamento do filtro vertical e tapete drenante sob o espaldar de jusante do Dique 6A, diante das condições de solicitação às quais o mesmo será submetido durante sua vida útil.

UHE BELO MONTE

A análise de percolação pelo interior do aterro e da fundação do dique é realizada com o auxílio de modelo numérico (método dos elementos finitos), que permite avaliar a posição da linha freática, a distribuição das poropressões, o gradiente hidráulico e as vazões específicas.

Os resultados permitem avaliar o comportamento geral do fluxo da água, dando base para a determinação do sistema de drenagem e seu dimensionamento e para as proteções contra o arraste de materiais das fundações em solo.

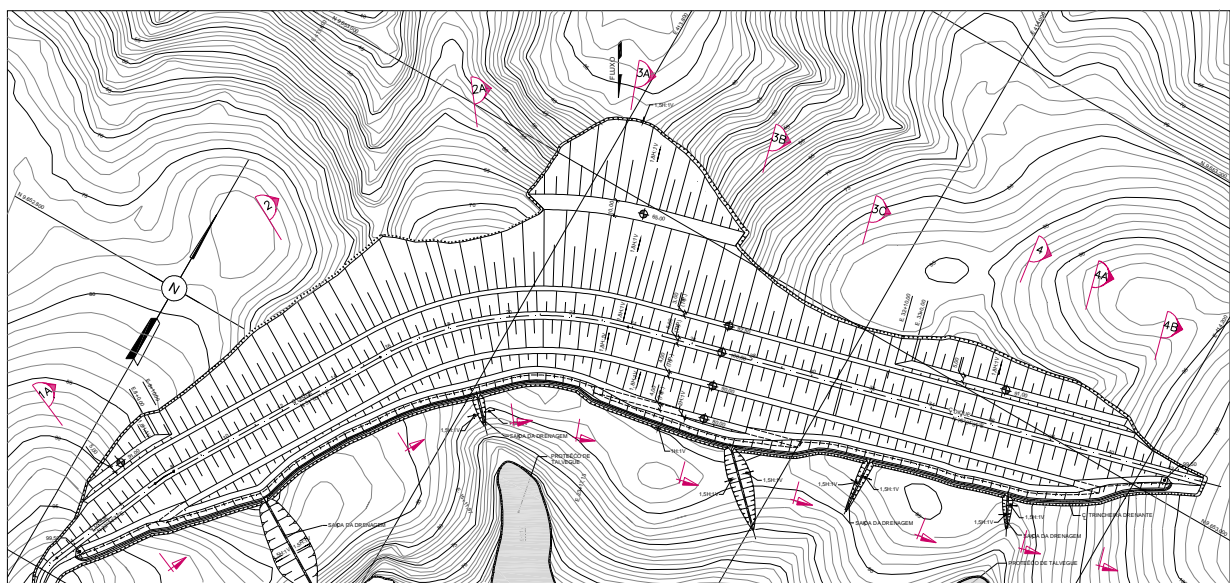
6.2. SEÇÕES DE ANÁLISE

Foram analisadas as seções conforme estaqueamento indicado na tabela 6.1 a seguir, tomando-se como base os desenhos de seções geológicas RI3-D06A-ITT-CGS-DE-0001 e RI3-D06A-ITT-CGS-DE-0002.

Tabela 6.1 – Localização das seções analisadas

Seção	Estaca
1A	6+0,00
2	15+0,00
2A	19+14,20
3A	22+16,10
3B	26+15,27
3C	30+9,85
4	36+13,50
4B	40+11,50

Figura 6.1 – Localização das seções de análise - Planta



UHE BELO MONTE

Figura 6.2 – Seção 1A

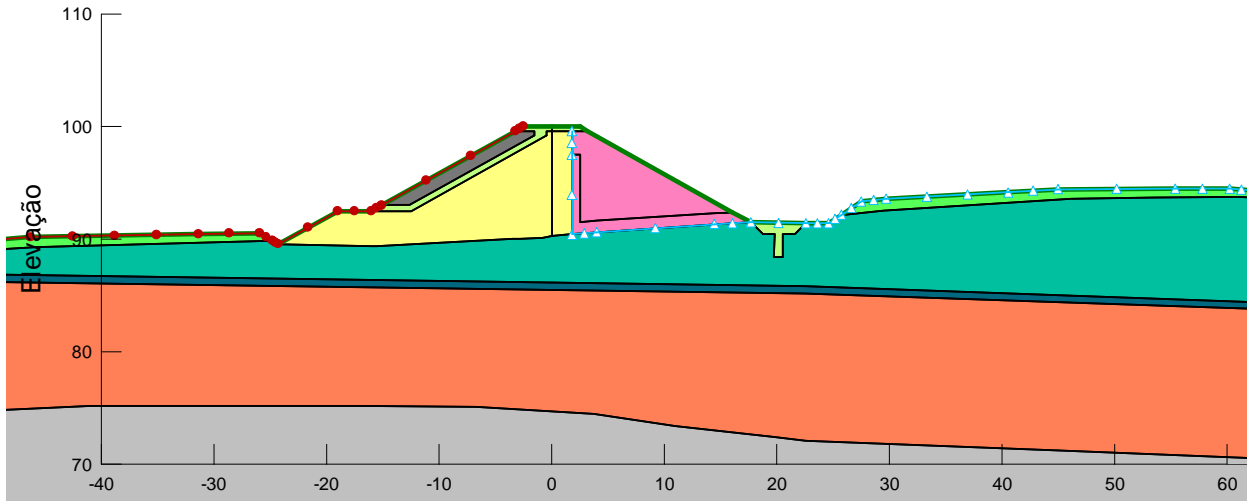
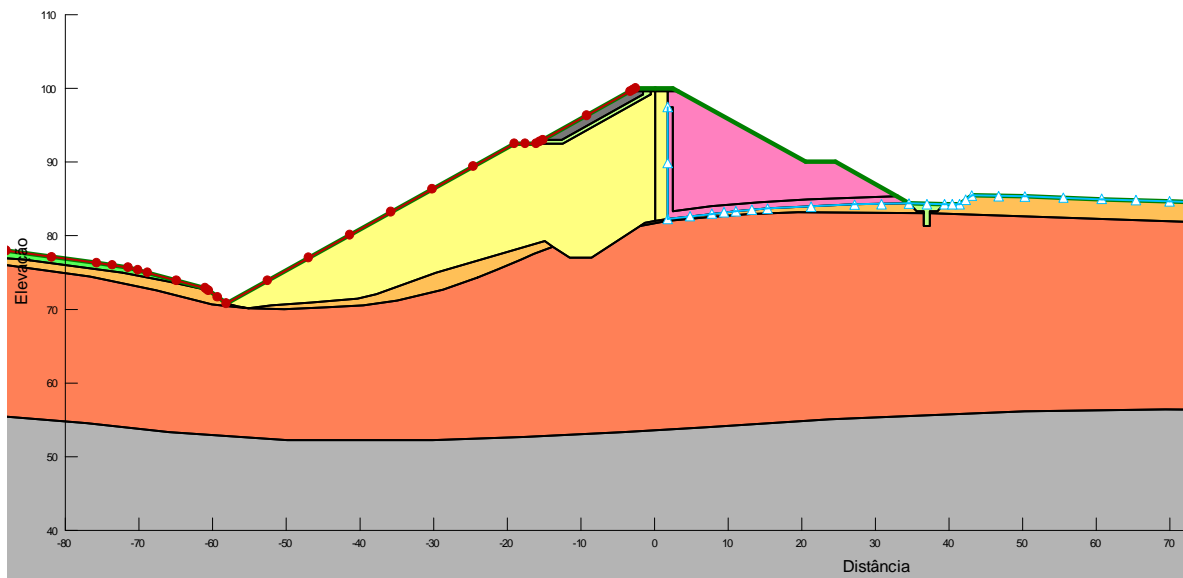


Figura 6.3 – Seção 2



	Migmatito Rocha
	Solo residual maduro de Migmatito
	Solo residual jovem de Migmatito
	Ritmito
	Solo residual de Ritmito
	Colúvio
	Enrocamento
	Solo compactado (1-C)
	Impermeável para dimensionamento da drenagem interna

UHE BELO MONTE

Figura 6.4 – Seção 2A

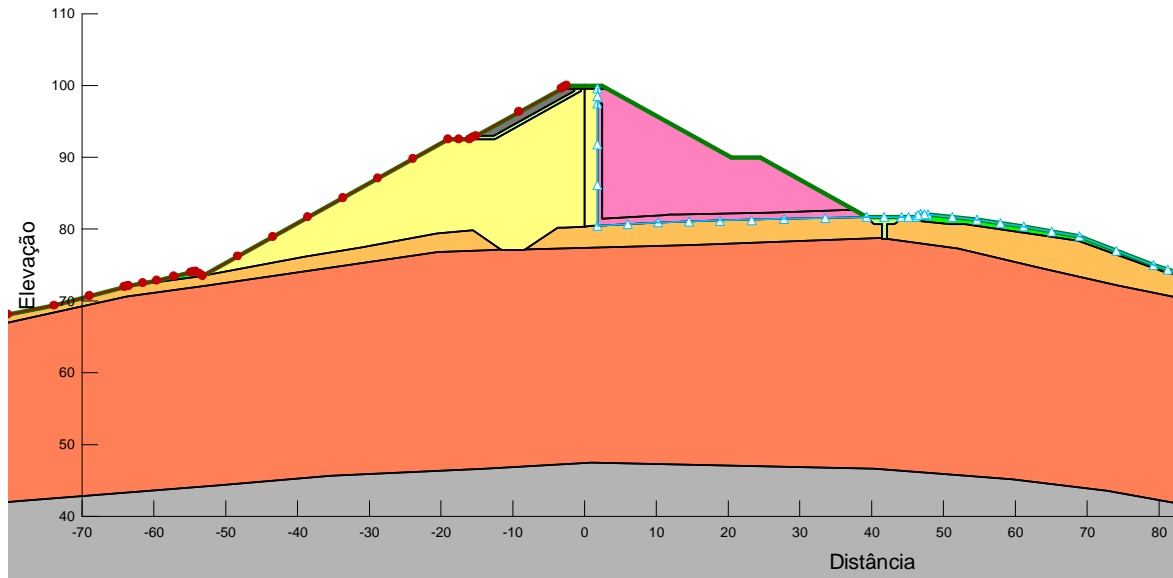
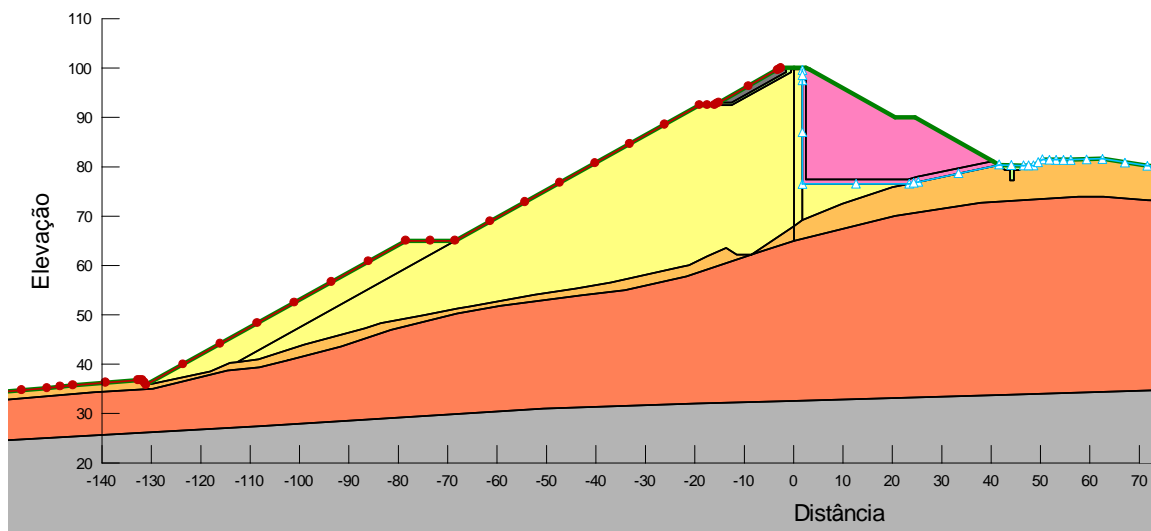


Figura 6.5 – Seção 3A



	Migmatito Rocha
	Solo residual maduro de Migmatito
	Solo residual jovem de Migmatito
	Ritmito
	Solo residual de Ritmito
	Colúvio
	Enrocamento
	Solo compactado (1-C)
	Impermeável para dimensionamento da drenagem interna

UHE BELO MONTE

Figura 6.6 – Seção 3B

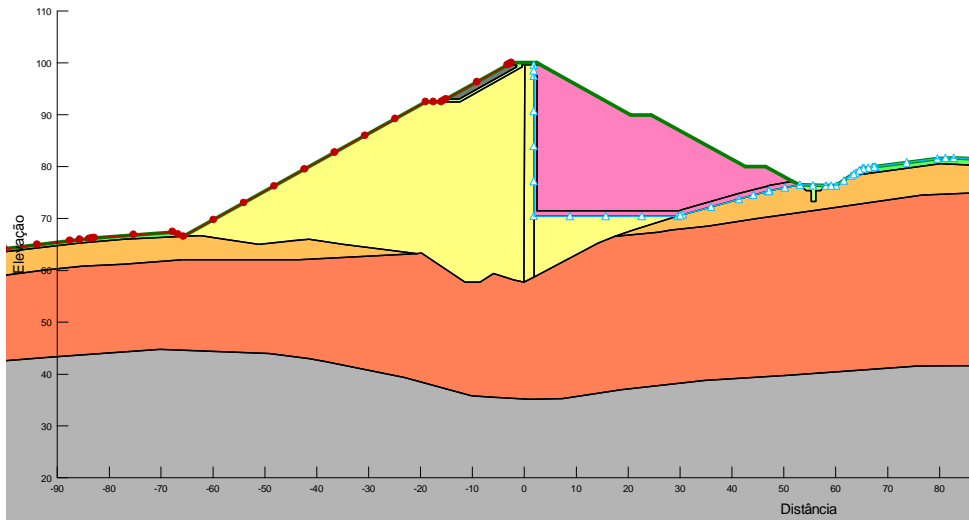
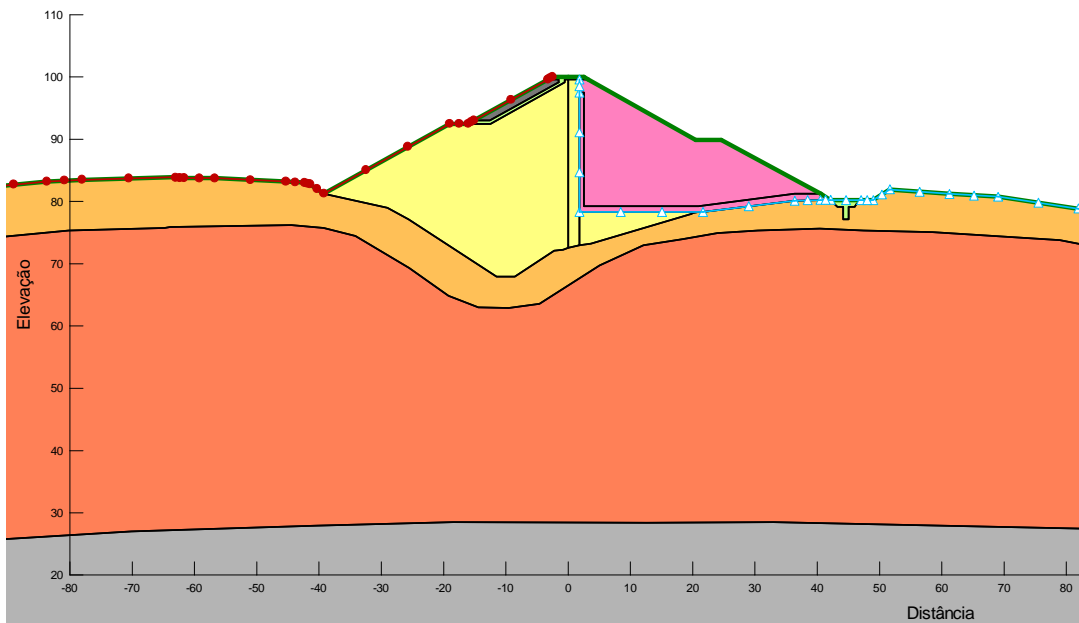


Figura 6.7 – Seção 3C



	Migmatito Rocha
	Solo residual maduro de Migmatito
	Solo residual jovem de Migmatito
	Ritmito
	Solo residual de Ritmito
	Colúvio
	Enrocamento
	Solo compactado (1-C)
	Impermeável para dimensionamento da drenagem interna

UHE BELO MONTE

Figura 6.8 – Seção 4

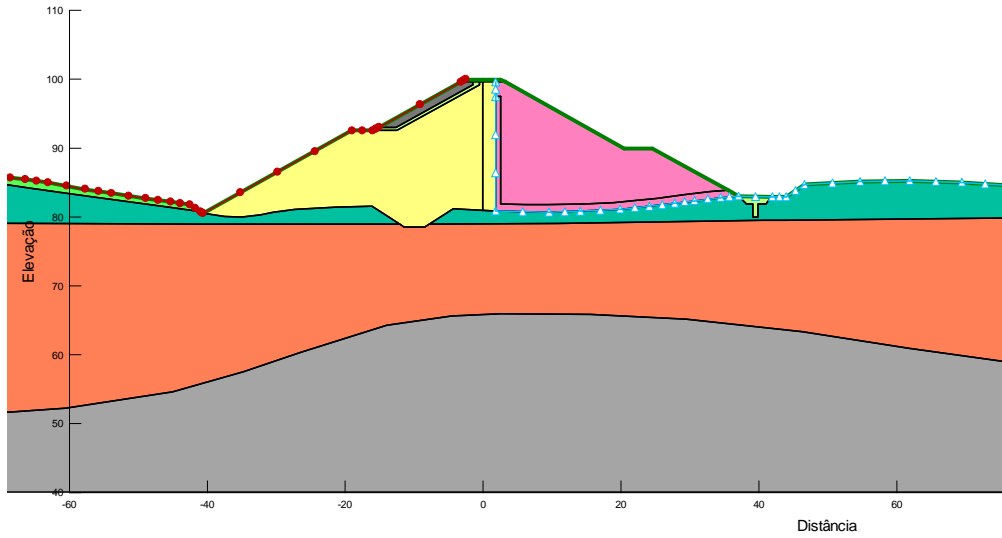
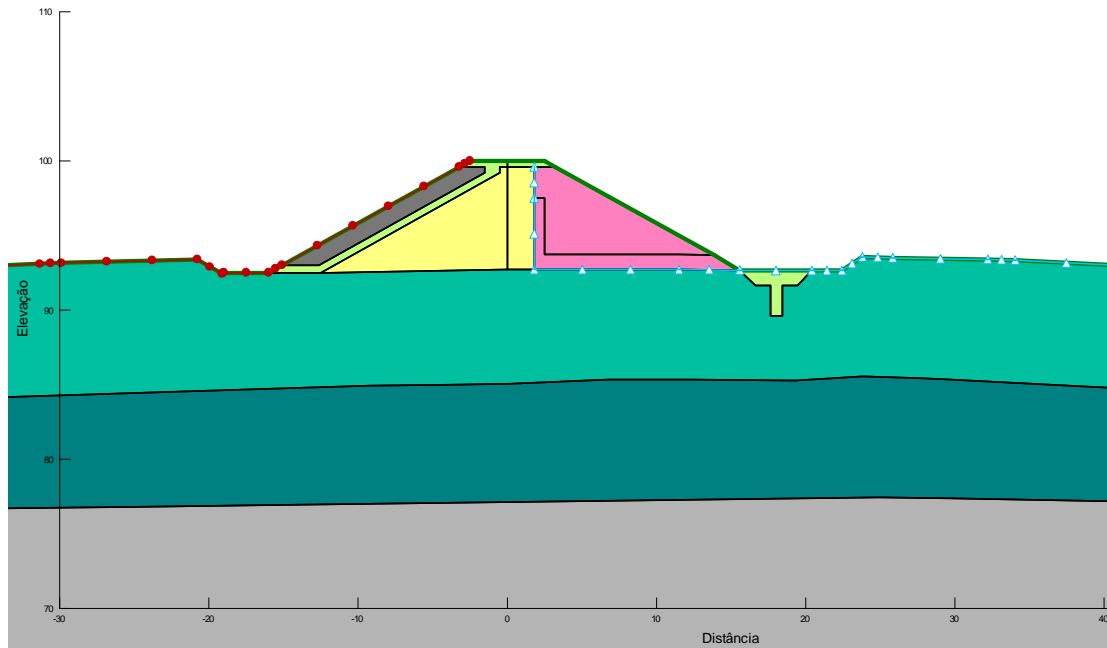


Figura 6.9 – Seção 4B



	Migmatito Rocha
	Solo residual maduro de Migmatito
	Solo residual jovem de Migmatito
	Ritmito
	Solo residual de Ritmito
	Colúvio
	Enrocamento
	Solo compactado (1-C)
	Impermeável para dimensionamento da drenagem interna

UHE BELO MONTE

6.3. MODELO HIDROGEOLÓGICO

6.3.1 Parâmetros Hidráulicos

Os parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais naturais e de construção adotados nas análises basearam-se nas campanhas de sondagens e ensaios realizados em etapas anteriores ao projeto básico, em ensaios de infiltração realizados nas campanhas de sondagens, em ensaios de permeabilidade “in situ” realizados em fundo de poços e trincheiras de investigação, bem como na literatura técnica e experiências de obras anteriores.

A condutividade hidráulica do solo de fundação, considerado isotrópico, foi definida a partir dos resultados e correlações de ensaios de caracterização e permeabilidade.

As tabelas a seguir apresentam os valores de condutividade hidráulica utilizados nas análises. Considerou-se anisotropia de condutividade hidráulica com razão $k_h/k_v=1$, exceto para o solo argiloso compactado (1C) e para o maciço rochoso do Ritmito.

Para o solo argiloso compactado, considerou-se $k_h/k_v=4$, devido ao efeito causado pela compactação do material.

O maciço rochoso de Ritmito foi considerado isotrópico, onde se considerou $k_h/k_v =4$ devido ao efeito causado pela estratificação horizontal dessas rochas.

Tabela 6.2 Condutividade Hidráulica dos materiais de fundação

Material	$k_h^{(*)}$ (cm/s)	k_h/k_v
Migmatito	1×10^{-5}	1
Solo Residual Jovem de Migmatito	3×10^{-4}	1
Solo Residual Maduro de Migmatito	1×10^{-4}	1
Solo Residual de Ritmito	1×10^{-4}	1
Ritmito	4×10^{-4}	4
Colúvio	1×10^{-4}	1

(*) Permeabilidade saturada.

Tabela 6.3 Condutividade Hidráulica dos materiais de aterro

Material	$k_h^{(*)}$ (cm/s)	k_h/k_v
Solo Compactado (1-C)	4×10^{-6}	4
Areia (3-C)	1×10^{-2}	1
Enrocamento	10	1
Transição Fina (4A)	5×10^{-1}	1
Transição Média (4B)	10	1

(*) Permeabilidade saturada.

UHE BELO MONTE

O filtro vertical no interior do dique será constituído exclusivamente por areia (3-C) e terá espessura de 0,7m. Com estas características o filtro apresenta a permeabilidade disponível igual à de seu único material constituinte, qual seja, $1,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

Para os cálculos do filtro horizontal “sanduíche” considera-se uma média ponderada das permeabilidades dos materiais constituintes.

Nesse caso o filtro horizontal tipo sanduiche será constituído por três camadas, totalizando 1,10m de espessura, sendo duas camadas de areia (3-C) com espessura de 40 cm e 20 cm (de baixo para cima) respectivamente e uma intermediária de 50 cm de transição (4A-C). Com este filtro, tem-se a permeabilidade disponível de:

$$K_{\text{disponível}} = \frac{((40 + 20) \times 1,0 \cdot 10^{-2} + 50 \times 5,0 \cdot 10^{-1})}{100} = 2,33 \cdot 10^{-1} \text{ cm/s}$$

Os drenos com 5 camadas nos pontos mais baixos serão constituídos por duas camadas de areia (3-C) com espessura de 40cm e 20cm (de baixo para cima) respectivamente, duas camadas de transição fina (4A-C) com espessuras de 30cm cada e uma camada intermediária de 30cm de transição média (4B-C), totalizando 1,50m. Portanto, tem-se a permeabilidade disponível para o dreno de:

$$K_{\text{disponível}} = \frac{((40 + 20) \times 1,0 \cdot 10^{-2} + (30 + 30) \times 5,0 \cdot 10^{-1} + 30 \times 10)}{150} = 2,20 \text{ cm/s}$$

As permeabilidades equivalentes adotadas para o filtro vertical, tapete drenante e para o dreno estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 6.4 – Condutividade hidráulica dos dispositivos de drenagem

Dispositivos	Direção do fluxo	Espessura total (em cm)	k_{disp} (em cm/s)
Filtro vertical	Vertical	70	$1,0 \times 10^{-2}$
Filtro sanduíche	Horizontal	110	$2,33 \times 10^{-1}$
Dreno	Horizontal	150	2,20

UHE BELO MONTE

6.3.2 Condições de Contorno

As análises do presente estudo foram feitas para o nível estático máximo normal do reservatório, na cota 97,0 m, que corresponde à carga total aplicada a montante da seção.

Devido às cotas onde estará fundado o dique e à conformação do relevo local, não ocorrerá o estabelecimento de níveis de água que incidam diretamente sobre o espaldar de jusante do aterro. Desta maneira, considerou-se que a condição de contorno a jusante é de superfície livre, que permite que a simulação das condições geométricas e hidrogeológicas pelo modelo conduzam ao estabelecimento da linha freática e do caminamento do fluxo de percolação.

Considerou-se ainda que todo o fluxo percolado pelo maciço e parte do fluxo pela fundação seja captado e esgotado pela drenagem interna. Dessa forma, o modelo apresenta condição permanente bidimensional.

Acrescenta-se que as condições de contorno dos sistemas de drenagem foram consideradas nas interfaces do solo de vedação com os materiais drenantes (filtros, transições e enrocamento).

6.3.3 Metodologia de Análise

Com base nas seções de análise, parâmetros geotécnicos e condições de contorno; foi utilizado o programa SEEP/W do pacote GeoStudio 2012 da GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD., para análise da percolação.

O programa SEEP /W aplica o Método dos Elementos Finitos na análise de fluxo permanente ou transiente em meios porosos saturados e/ou não saturados. A definição da posição da linha freática é feita através do processamento não-linear da variação da condição de contorno dos nós dos elementos, aos quais é atribuída a condição de superfície de percolação ou fluxo nulo.

As análises de percolação foram conduzidas, considerando as seções características apresentadas nas Figuras 6.2 a 6.9, do item 6.2.

A partir das seções selecionadas, o programa gera a malha não-estruturada de elementos finitos triangulares.

A análise realizada considera a condição de fluxo permanente bidimensional, aplicando os parâmetros e condições de contorno previamente estabelecidos. Considera-se a condutividade hidráulica constante, independente do estado de saturação do material.

Nas seções analisadas foram ainda definidas linhas para mensuração do fluxo junto aos elementos do sistema de drenagem: Filtro Vertical, Tapete Drenante e Trincheira de Drenagem.

Com base no fluxo incidente no sistema de drenagem interna determinado pelo SEEP/W, pode-se definir a vazão de cálculo. Observa-se que a vazão de cálculo considerada é majorada dez vezes em relação ao valor determinado pelo SEEP/W. Observa-se ainda que o valor considerado para dimensionamento do filtro horizontal é

UHE BELO MONTE

dado pelo somatório dos valores incidentes nos filtros vertical e horizontal, dada a condição de percolação do sistema de drenagem.

No caso de fluxo vertical (filtro vertical) adota-se gradiente unitário. Para o dimensionamento transversal do tapete drenante, no entanto, considera-se gradiente máximo de 10%.

6.3.4 Resultados

Os resultados das simulações numéricas da percolação pelas seções são apresentados no Anexo 1. Nestas Figuras são apresentadas a distribuição das isolinhas das cargas hidráulicas totais e os valores de vazão específica incidentes em cada elemento do sistema de drenagem.

A Tabela 6.5 apresenta os valores de vazão unitária para o filtro vertical e para o tapete drenante (que capta a percolação da advinda da fundação e do filtro vertical) para as seções analisadas que serão utilizadas para o dimensionamento do sistema de drenagem interna da barragem. Além destas, são indicadas as vazões captadas pela trincheira drenante posicionada junto ao pé de jusante do dique.

Adota-se um fator de segurança igual a dez, consideração usual em função da variação da condutividade hidráulica dos materiais drenantes e de fundação adotados em projetos do gênero.

Tabela 6.5 – Valores de vazão específica incidentes no sistema interno de drenagem

Seção	Vazão Incidente (m ³ /s/m)			Vazão Majorada (m ³ /s/m) (1)			Vazão Total (m ³ /s/m) (3)
	Filtro Vertical	Tapete drenante (2)	Trincheira	Filtro Vertical	Tapete drenante (2)	Trincheira	
1A	5,54E-07	3,82E-06	6,99E-09	5,54E-06	3,82E-05	6,99E-08	4,37E-05
2	4,92E-07	8,88E-06	1,63E-08	4,92E-06	8,88E-05	1,63E-07	9,37E-05
2A	7,73E-07	3,34E-06	1,68E-07	7,73E-06	3,34E-05	1,68E-06	4,11E-05
3A	3,15E-07	6,20E-08	1,19E-07	3,15E-06	6,20E-07	1,19E-06	3,77E-06
3B	5,80E-07	8,30E-06	1,92E-08	5,80E-06	8,30E-05	1,92E-07	8,88E-05
3C	3,94E-07	6,73E-06	9,61E-08	3,94E-06	6,73E-05	9,61E-07	7,12E-05
4	8,52E-07	1,12E-05	2,70E-08	8,52E-06	1,12E-04	2,70E-07	1,21E-04
4B	4,21E-07	1,93E-06	7,63E-08	4,21E-06	1,93E-05	7,63E-07	2,35E-05

NOTA: (1) Dez vezes superior ao incidente.

(2) Soma das vazões no trecho de tapete suspenso e sobre a fundação de cada seção.

(3) A vazão total no tapete drenante é a somatória dos valores majorados dos filtros vertical e horizontal.

UHE BELO MONTE

7. DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM INTERNA

7.1. GERAL

Neste item apresentam-se a metodologia e os cálculos adotados para o dimensionamento do filtro vertical e do tapete drenante do dique 6A e a verificação da trincheira drenante para o atendimento aos critérios em cada seção estudada. O dimensionamento dos dispositivos é feito aplicando-se a lei de Darcy.

7.2. FILTRO VERTICAL

O dimensionamento do filtro vertical pode ser realizado, considerando-se a vazão no sentido montante/jusante (fluxo transversal), obtida pela análise numérica.

Para o dimensionamento foram consideradas as seguintes premissas de cálculo:

- Majoração de 10 vezes o valor da vazão calculada absorvida pelo filtro.
- Gradiente unitário, correspondente à condição de fluxo vertical.
- Filtro com espessura de 0,7m.
- Permeabilidade disponível do filtro $1,0 \times 10^{-2}$ cm/s

O dimensionamento é feito através da verificação da permeabilidade necessária para capacitar o sistema a drenar a vazão de cálculo e a permeabilidade disponível do material utilizado, considerando a Lei de Darcy:

$$Q_{calc} = k_{necessário} \cdot i \cdot A \rightarrow k_{necessário} = \frac{Q_{calc}}{i \cdot A}$$

Onde:

Q_{calc} vazão de cálculo, correspondente a vazão absorvida pelo filtro.

i gradiente hidráulico, considerado unitário para o filtro vertical.

$k_{necessário}$ condutividade hidráulica necessária para o material componente do filtro vertical.

A área do filtro por metro linear, equivalente a sua espessura.

O atendimento à condição de cálculo se dá quando a permeabilidade do material proposto (areia com $k=1 \times 10^{-2}$ cm/s) é superior à permeabilidade necessária.

A Tabela 7.1 apresenta os valores de vazão de cálculo e demais elementos para a estimativa da permeabilidade necessária.

UHE BELO MONTE

Tabela 7.1 – Filtro Vertical – Verificação do atendimento do sistema proposto

Seção	Vazão (m³/s/m)	Gradiente	Espessura (m)	K requerida (m/s)	K disponível (m/s)
1A	5,54E-06	1	0,70	7,91E-06	1,00E-04
2	4,92E-06	1	0,70	7,03E-06	1,00E-04
2A	7,73E-06	1	0,70	1,10E-05	1,00E-04
3A	3,15E-06	1	0,70	4,50E-06	1,00E-04
3B	5,80E-06	1	0,70	8,29E-06	1,00E-04
3C	3,94E-06	1	0,70	5,63E-06	1,00E-04
4	8,52E-06	1	0,70	1,22E-05	1,00E-04
4B	4,21E-06	1	0,70	6,01E-06	1,00E-04

Como se verifica na Tabela 7.1 o filtro vertical proposto, composto por areia e com espessura contínua de 0,7m/1,0m, apresenta capacidade de drenagem adequada para as vazões previstas.

7.3. TAPETE DRENANTE

O dimensionamento do tapete drenante engloba duas verificações: considerando a vazão observada proveniente do fluxo transversal, no sentido montante para jusante e considerando fluxo longitudinal pela ombreira e no sentido de pontos baixos.

7.3.1 Tapete Drenante – Dimensionamento Transversal

O dimensionamento transversal do tapete drenante pode ser realizado considerando-se a vazão no sentido montante/jusante, obtida pela análise numérica.

Para o dimensionamento foram consideradas as seguintes premissas de cálculo:

- Majoração de 10 vezes o valor da vazão calculada absorvida pelo filtro (estimada na modelação numérica).
- Tapete drenante funcionando em carga, com gradiente hidráulico máximo igual a 10%.
- Considerado como elemento drenante o tapete horizontal sanduíche, cujas características são indicadas no item 6.3.1.

O dimensionamento é feito através da verificação da permeabilidade necessária para capacitar o sistema a drenar a vazão de cálculo e a permeabilidade disponível do material utilizado, considerando a Lei de Darcy:

$$Q_{calc} = k_{necessário} \cdot i \cdot A \rightarrow k_{necessário} = \frac{Q_{calc}}{i \cdot A}$$

UHE BELO MONTE

Onde:

Q_{calc} vazão de cálculo, correspondente a vazão total absorvida pelo tapete horizontal.

i gradiente hidráulico, considerado 10%.

$k_{necessário}$ condutividade hidráulica necessária para o material componente do tapete.

A área do tapete horizontal por metro linear, equivalente a sua espessura.

O atendimento à condição de cálculo se dá quando a permeabilidade equivalente do dispositivo de drenagem (ver Tabela 6.4) é superior à permeabilidade necessária.

A Tabela 7.2 apresenta os valores de vazão de cálculo e demais elementos para a estimativa da permeabilidade necessária e os elementos drenantes indicados para atender a vazão prevista no tapete.

Tabela 7.2 – Tapete drenante – fluxo transversal – verificação do atendimento dos sistemas propostos

Seção	Vazão (m ³ /s/m) (1)	Gradiente	Espessura (m)	K requerida (m/s)	K disponível (m/s)
1A	4,37E-05	0,1	1,10	3,98E-04	2,33E-03
2	9,37E-05	0,1	1,10	8,52E-04	2,33E-03
2A	4,11E-05	0,1	1,10	3,74E-04	2,33E-03
3A	3,77E-06	0,1	1,10	3,43E-05	2,33E-03
3B	8,88E-05	0,1	1,10	8,07E-04	2,33E-03
3C	7,12E-05	0,1	1,10	6,48E-04	2,33E-03
4	1,21E-04	0,1	1,10	1,10E-03	2,33E-03
4B	2,35E-05	0,1	1,10	2,14E-04	2,33E-03

NOTA: (1) A vazão total no tapete drenante é a somatória dos valores majorados dos filtros vertical e horizontal.

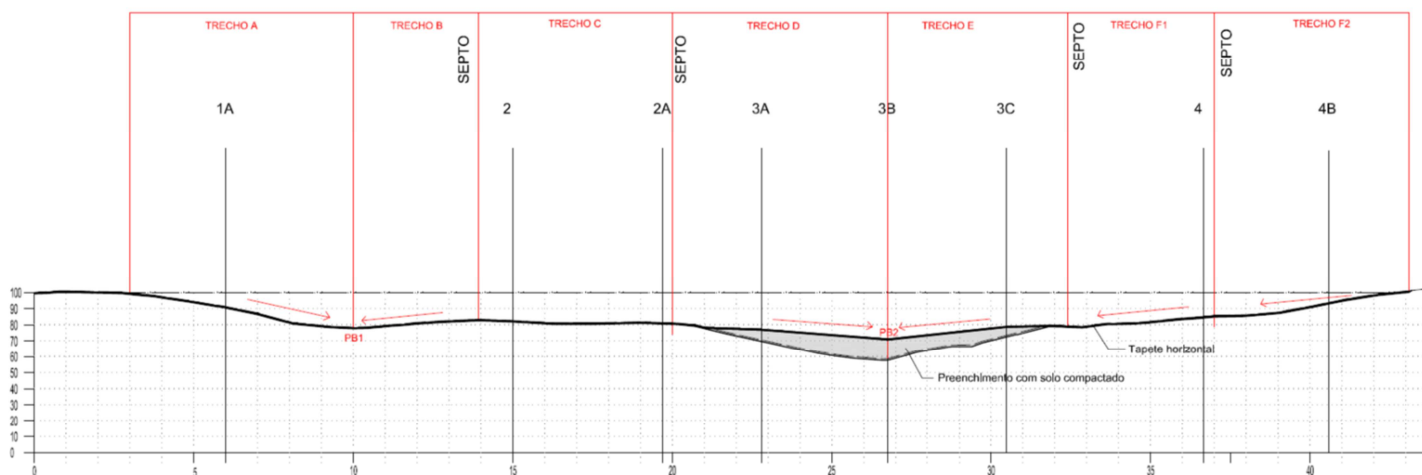
Como se verifica na Tabela 7.2 o tapete horizontal “sanduíche” proposto, com 3 camadas e espessura contínua de 1,10m/1,0m, apresenta capacidade de drenagem adequada para as vazões previstas.

7.3.2 Tapete Drenante – Dimensionamento Longitudinal

O dimensionamento do tapete drenante, levando-se em conta o fluxo longitudinal, considera a vazão acumulada nos pontos de concentração, conforme reproduzido na Figura 7.1.

UHE BELO MONTE

Figura 7.1 – Dimensionamento longitudinal – seção



Para o dimensionamento foram consideradas as seguintes premissas de cálculo:

- Majoração de 10 vezes o valor da vazão calculada absorvida pelo filtro.
- Tapete drenante com gradiente hidráulico determinado pelo declive do terreno. Para os trechos com gradiente geométrico menor que 10% considera-se que o fluxo se dá totalmente no sentido transversal.
- Considerado como elemento drenante o tapete horizontal sanduíche, cujas características são indicadas no item 6.3.1.

Tabela 7.3 – Verificação do Fluxo Longitudinal

Trecho	Estaca	El. Ponto Alto	El. Ponto Baixo	Gradiente (i)	L (m)	e (m)	Q total (m³/s)	K requerida (m/s)	K disponível (m/s)
Trecho A (vazão da seção 1A)	3+0,00	100	77,50	0,16	23,40	1,10	6,12E-03	1,48E-03	2,33E-03
	10+0,00								
Trecho B (vazão média das seções 1A e 2)	10+0,00	83,90	77,50	0,08	31,80	1,10	5,50E-03	1,96E-03	2,33E-03
	14+0,00								
Trecho C (vazão média das seções 2 e 2A)	14+0,00	83,90	80,00	0,03	35,00	1,10	8,09E-03	ig = 0,03 << ih=0,10 Ok-Vale fluxo transversal	
	20+0,00								
Trecho D (vazão média das seções 2A, 3A e 3B)	20+0,00	80,00	69,00	0,08	56,00	1,10	6,02E-03	1,20E-03	2,33E-03
	26+15,00								
Trecho E (vazão média das seções 3B e 3C)	26+15,00	79,00	69,00	0,07	56,00	1,10	9,04E-03	2,10E-03	2,33E-03
	32+8,00								
Trecho F1 (vazão da seção 4)	32+8,00	86,00	79,00	0,06	38,00	1,10	1,11E-02	ig = 0,06 < ih=0,10 Ok-Vale fluxo transversal	
	37+0,00								
Trecho F2 (vazão da seção 4B)	37+0,00	100	86,00	0,12	23,70	1,10	2,82E-03	9,28E-04	2,33E-03
	43+0,00								

UHE BELO MONTE

7.3.3 Tapete Drenante – Dimensionamento dos drenos de saída

O dimensionamento dos drenos de saída nos pontos mais baixos é feito considerando a vazão acumulada no ponto majorada em 10 vezes, resultando nas vazões de cálculo conforme tabela a seguir.

Tabela 7.4 – Vazão de cálculo nos pontos baixos

Ponto baixo	Estaca	Q total (m³/s)
PB1	10+0,00	1,16E-02
PB2	26+15,00	1,51E-02

Para o dimensionamento foram consideradas as seguintes premissas de cálculo:

- O valor majoração de 10 vezes da vazão calculada absorvida pelo dreno.
- Funcionando em carga, com gradiente hidráulico máximo igual a 10%.
- Permeabilidade disponível do dreno de saída $2,20 \times 10^{-2}$ m/s
- Vazão total no ponto PB1 resulta da contribuição dos trechos A e B e a vazão total no ponto PB2 resulta da contribuição dos trechos D e E.

O dimensionamento é feito através da determinação da área de dreno necessária para capacitar o sistema a drenar a vazão de cálculo, com base na permeabilidade disponível do material utilizado, considerando a Lei de Darcy:

$$Q_{calc} = k_{disponível} \cdot i \cdot A_{necessária} \rightarrow A_{necessário} = \frac{Q_{calc}}{i \cdot K_{disponível}}$$

Onde:

Q_{calc} vazão de cálculo, correspondente a vazão absorvida pelo filtro majorada.

i gradiente hidráulico de 10%.

$k_{disponível}$ condutividade hidráulica disponível do dreno.

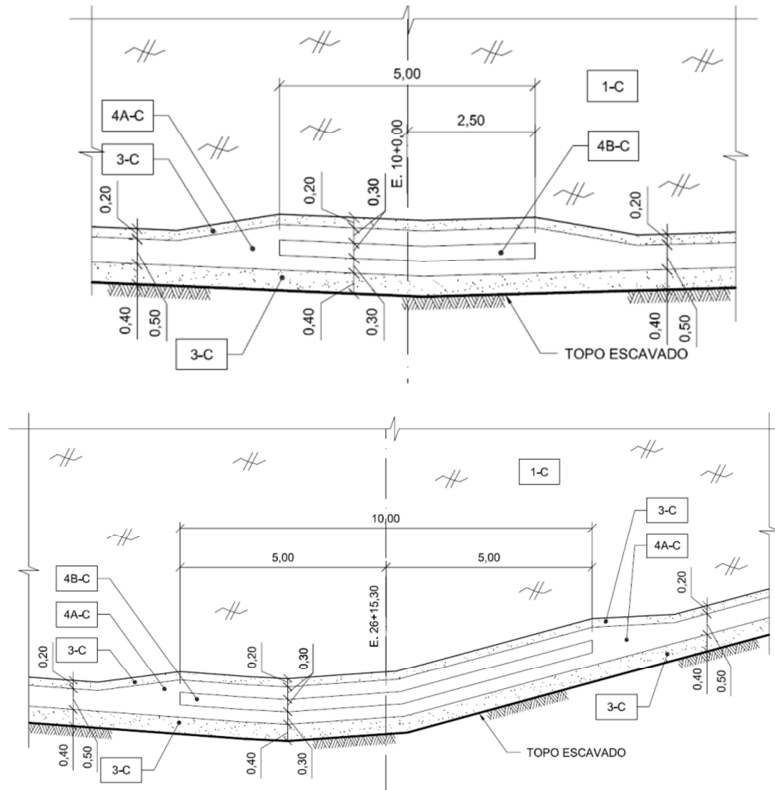
Com isto, estimou-se a área necessária para drenar a vazão total em cada ponto. As larguras dos drenos são determinadas considerando a espessura do dreno de 1,50m. Os valores adotados estão apresentados na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Verificação do Fluxo Longitudinal

Estaca	Q total (m³/s)	Área necessária (m²)	Largura necessária (m)	Largura adotada (m)
10+0,00	1,16E-02	5,27	3,52	5,00
26+15,00	1,51E-02	6,83	4,55	10,00

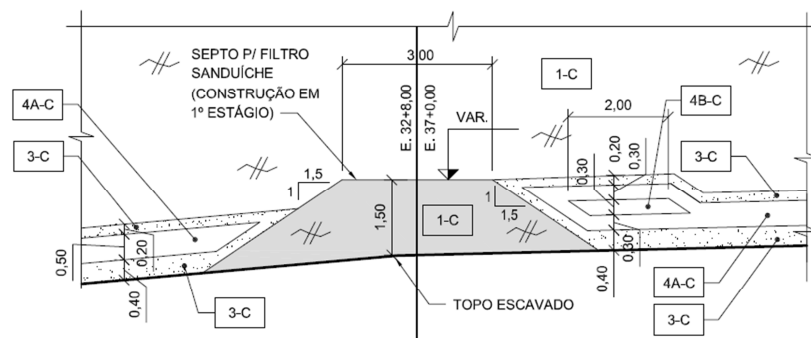
UHE BELO MONTE

Figura 7.2 – Configuração adotada em projeto para os drenos de saída nos pontos mais baixos.



Além dos drenos nos pontos mais baixos, para controle do fluxo longitudinal foi prevista a inclusão de septos nas estacas E.14+0,00, E.20+0,00, E.32+8,00 e E.37+0,00. Na posição dos septos, a trincheira de drenagem deverá ser interceptada de forma que a água seja direcionada para cada uma das saídas de drenagem.

Figura 7.3 – Detalhe dos septos



UHE BELO MONTE

7.4. TRINCHEIRA DE DRENAGEM

A trincheira drenante com largura de 0,70 m e profundidade de 2,00 m será constituída por areia (3C) que apresenta permeabilidade de $1,0 \times 10^{-4}$ m/s. Conforme os valores considerados apresentados na tabela 6.5, pode-se então verificar o atendimento aos critérios para cada seção.

$$k_{\text{necessário}} = \frac{Q_{\text{calc}}}{i.A}$$

Onde:

Q_{calc} vazão de cálculo, correspondente a vazão absorvida pela trincheira.

i gradiente hidráulico, considerado unitário para trincheira.

$k_{\text{necessário}}$ condutividade hidráulica necessária para o material componente da trincheira.

A área da trincheira por metro linear (0,70 x 2,00m).

Tabela 7.6 – Trincheira drenante – Verificação do atendimento ao sistema proposto

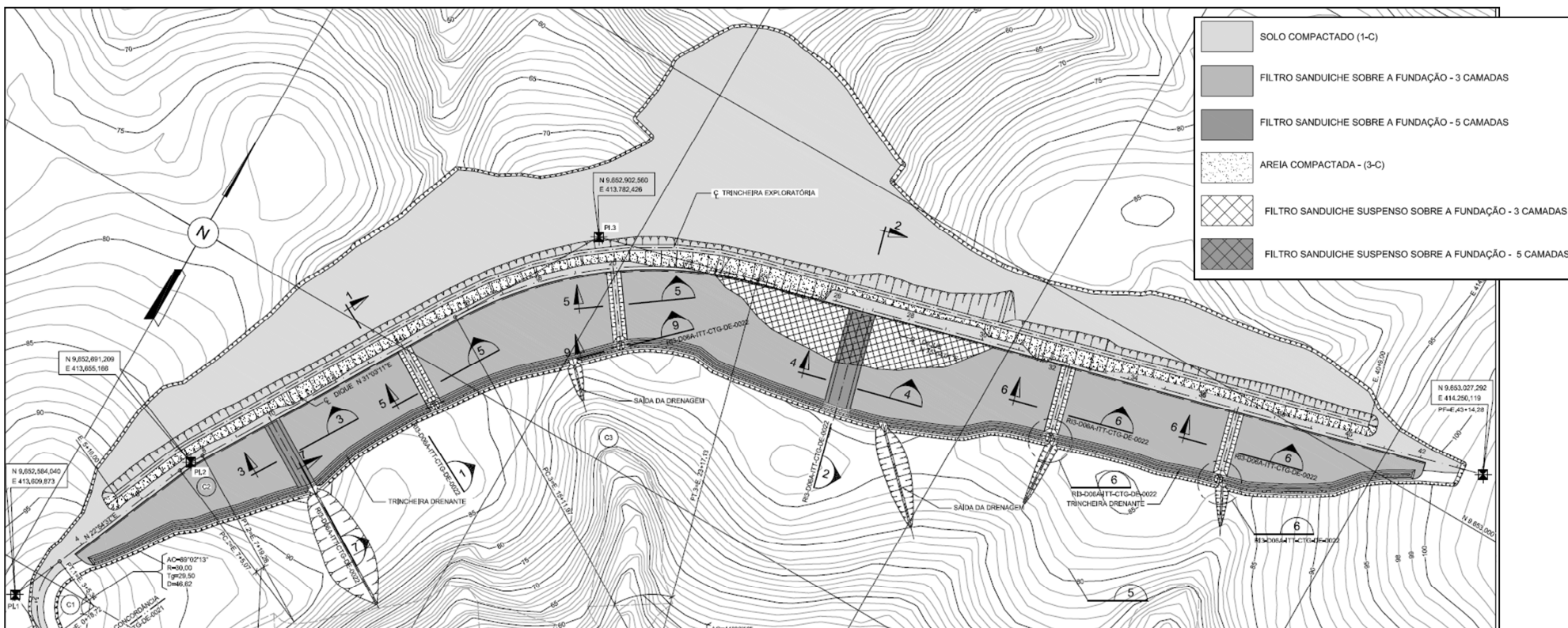
Seção	Vazão Seep (m ³ /s/m)	Vazão Majorada (m ³ /s/m)	K req (m/s)	K disp (m/s)
1A	6,99E-09	6,99E-08	4,99E-08	1,00E-04
2	1,63E-08	1,63E-07	1,16E-07	1,00E-04
2A	1,68E-07	1,68E-06	1,20E-06	1,00E-04
3A	1,19E-07	1,19E-06	8,50E-07	1,00E-04
3B	1,92E-08	1,92E-07	1,37E-07	1,00E-04
3C	9,61E-08	9,61E-07	6,86E-07	1,00E-04
4	2,70E-08	2,70E-07	1,93E-07	1,00E-04
4B	7,63E-08	7,63E-07	5,45E-07	1,00E-04

8. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM

Com base nas análises apresentadas é possível estabelecer um sistema de drenagem que seja capaz de aliviar as pressões internas dos aterros e de suas fundações, assim como evitar o potencial arraste de partículas destes maciços pelo fluxo de água e conduzir a água captada pelo sistema de maneira controlada para drenagens naturais a jusante do aterro.

A Figura 8.1 apresenta uma planta com o arranjo esquemático dos elementos que compõem o sistema de drenagem.

Figura 8.1 – Dique 6A - Disposição dos principais elementos de drenagem



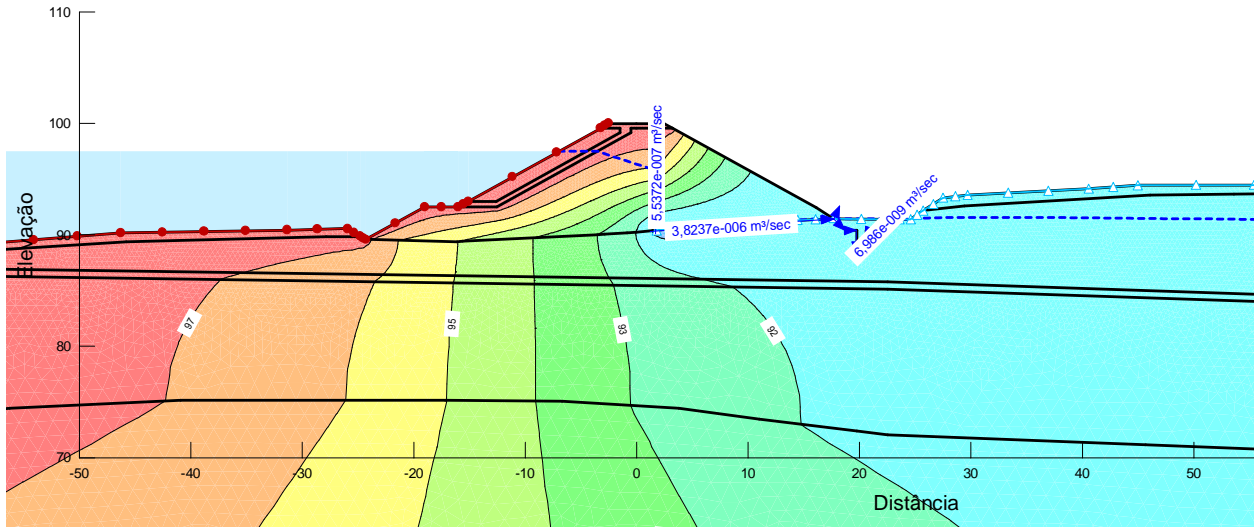
ANEXO 1

DIQUE 6A

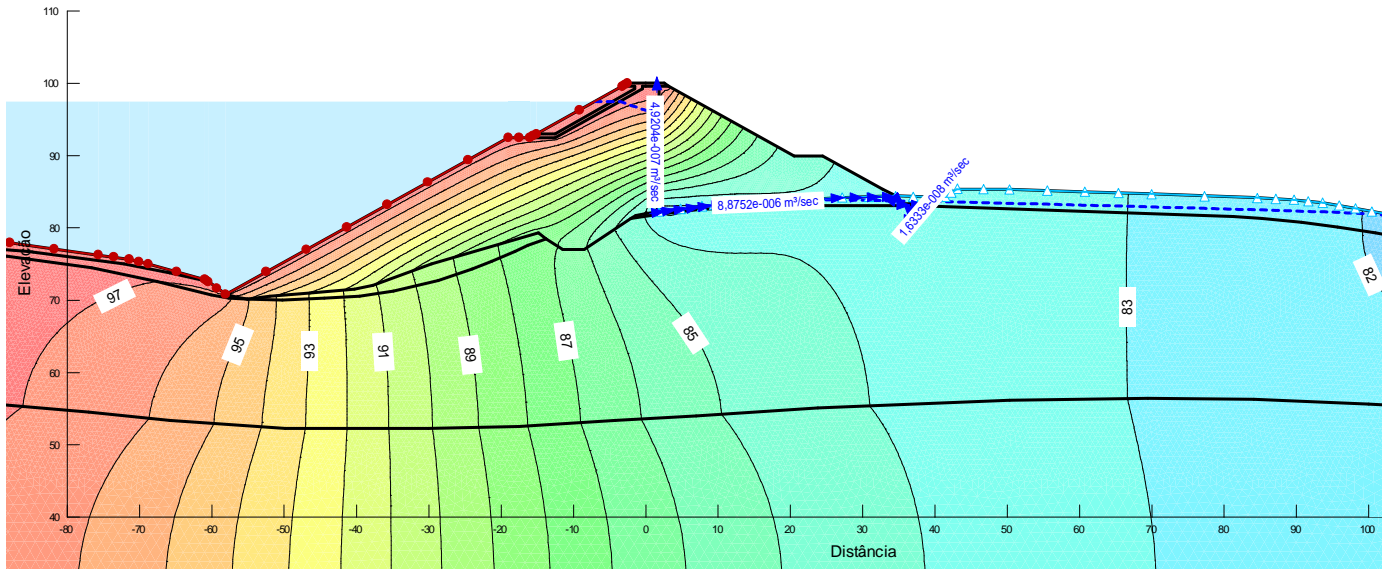
Resultados das análises de percolação

UHE BELO MONTE

Seção 1A

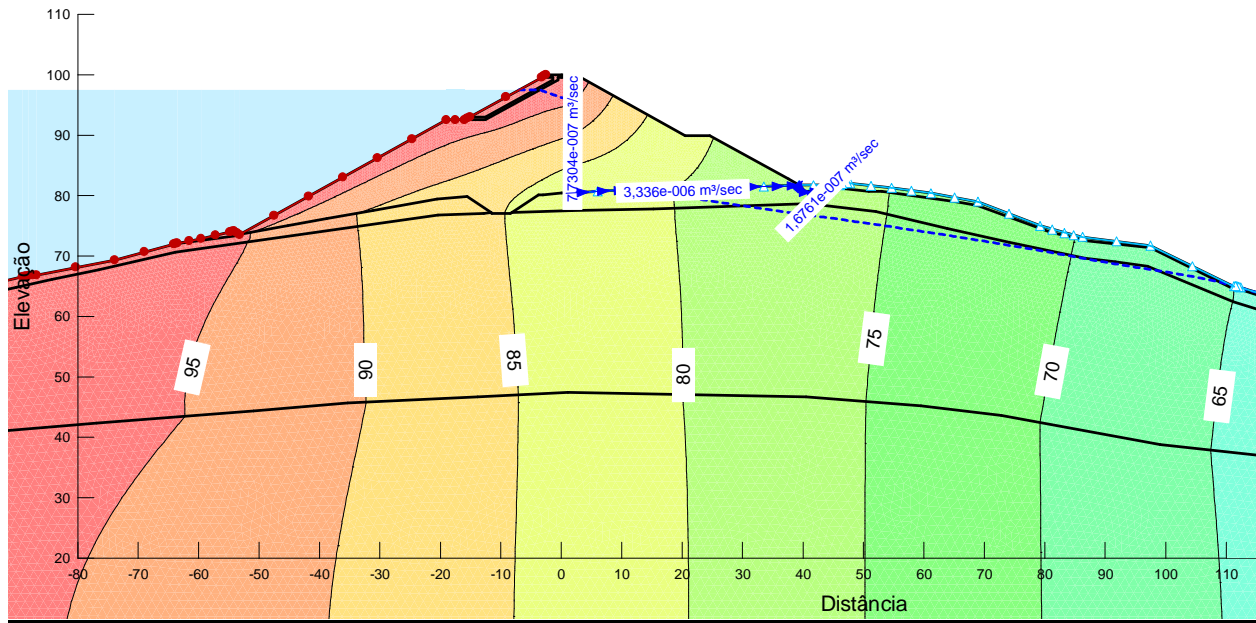


Seção 2

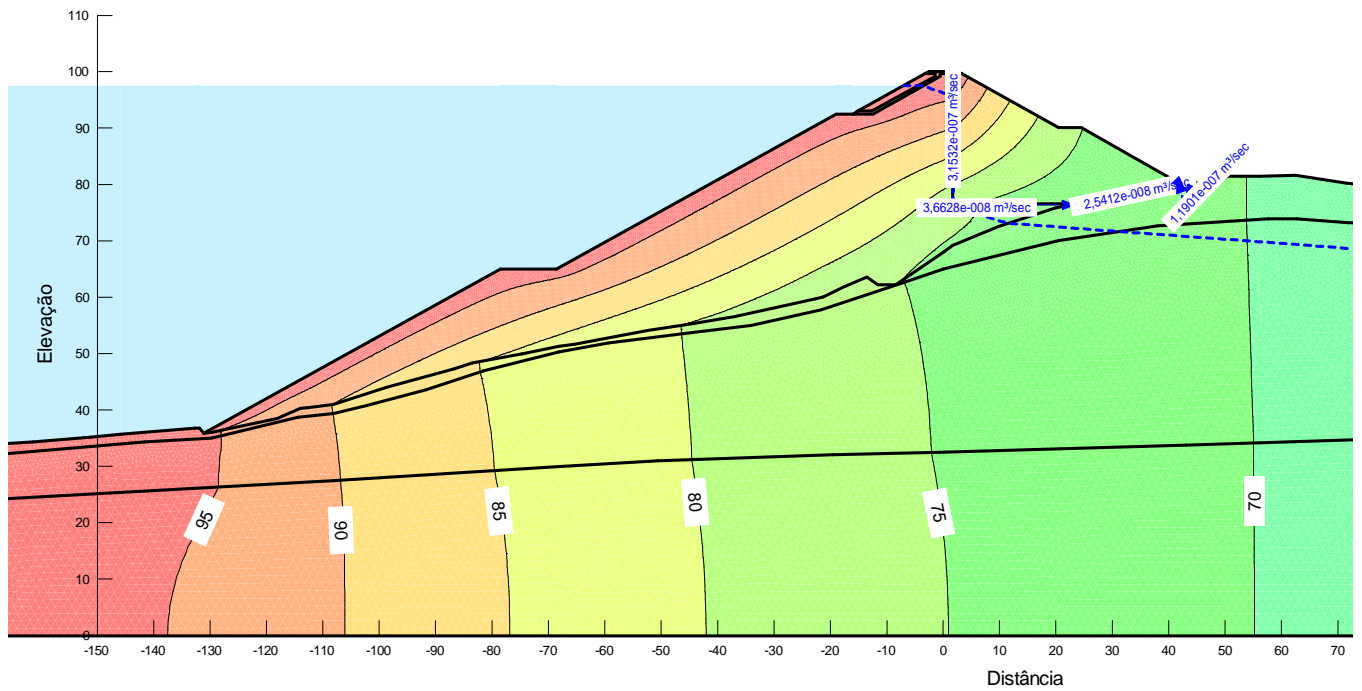


UHE BELO MONTE

Seção 2A

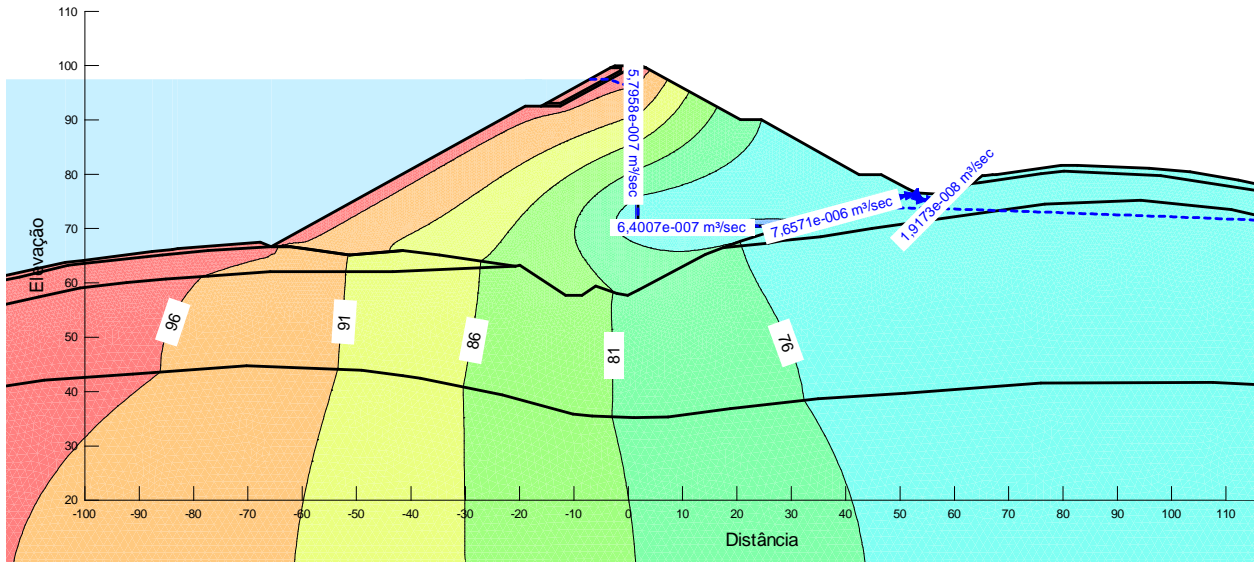


Seção 3A

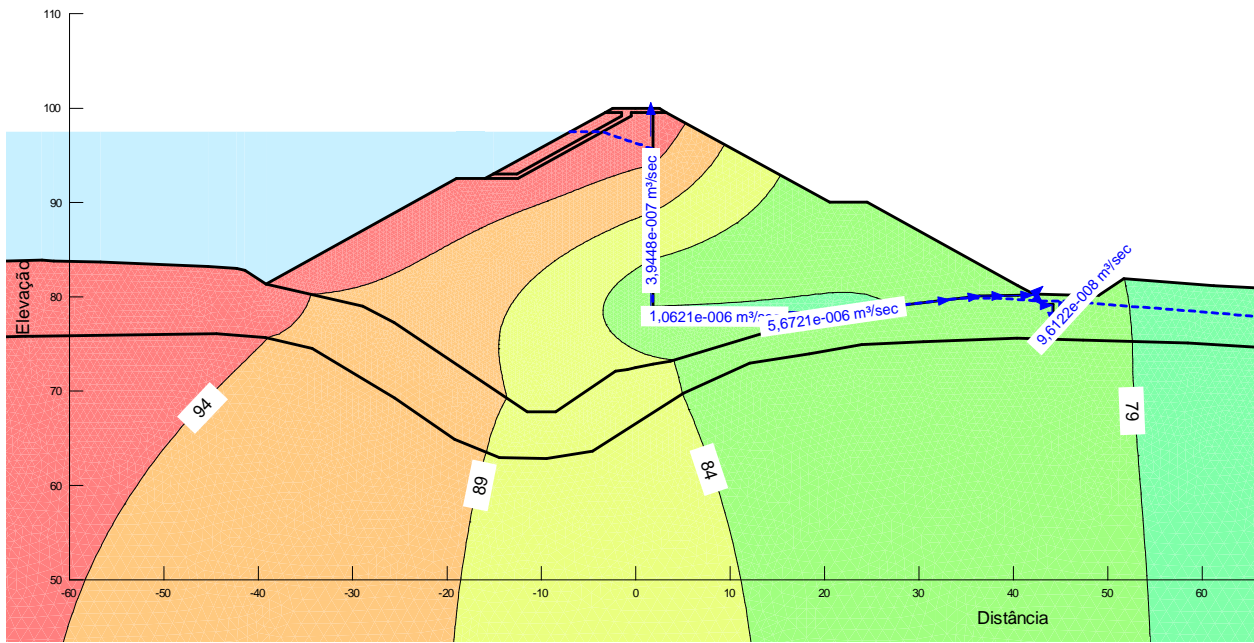


UHE BELO MONTE

Seção 3B

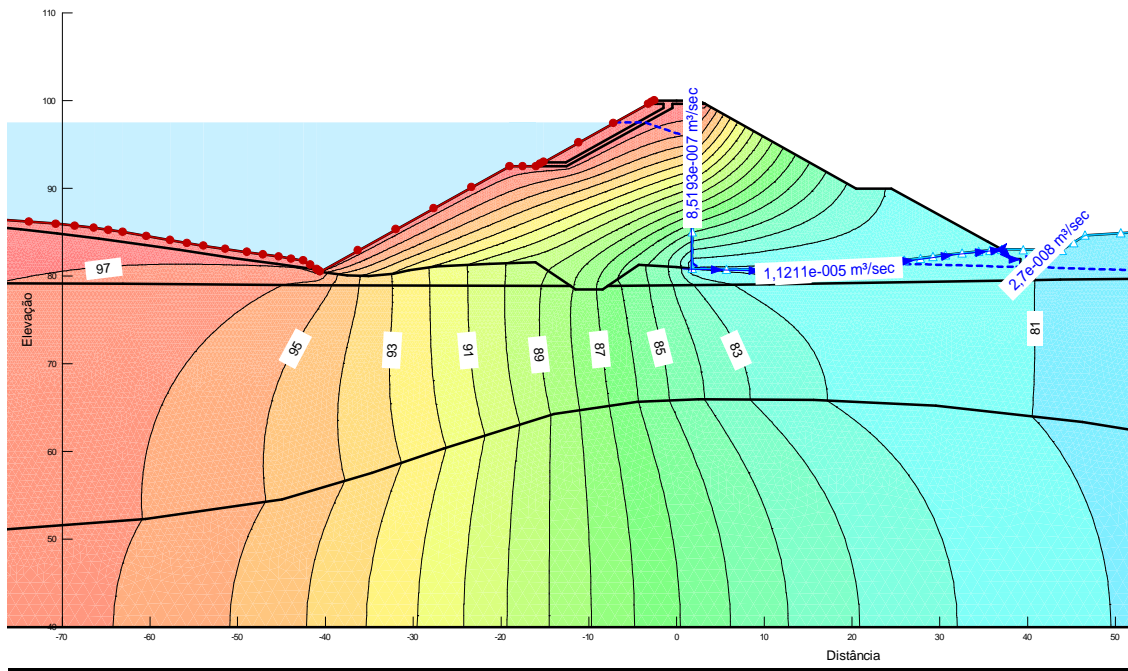


Seção 3C



UHE BELO MONTE

Seção 4



Seção 4B

