

ÁGUAS PÚBLICAS DO ALENTEJO

EXECUÇÃO DE AÇUDE NEGATIVO NA ALBUFEIRA DO ROXO

PROJETO DE EXECUÇÃO
VOLUME 1 – MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

DEZEMBRO 2018

EXECUÇÃO DE AÇUDE NEGATIVO NA ALBUFEIRA DO ROXO

ÍNDICE GERAL

VOLUME 1 – MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

VOLUME 2 – PEÇAS DESENHADAS

VOLUME 3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

VOLUME 4 – MEDIÇÕES E MAPA DE QUANTIDADES

VOLUME 5 – ESTIMATIVA ORÇAMENTAL

VOLUME 6 – PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE

VOLUME 7 – COMPILAÇÃO TÉCNICA

VOLUME 8 – PLANO DE GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

EXECUÇÃO DE AÇUDE NEGATIVO NA ALBUFEIRA DO ROXO

EQUIPA TÉCNICA

Direção	Vítor Paulo
Engenharia	Rui Almeida Vítor Paulo
Geologia e Geotecnia	Henrique Rézio
Desenho	Cecília Passos
Coordenação de Segurança em Projeto	Paula Rodrigues
Gestão de Resíduos de Construção e Demolição	Paula Rodrigues

ÁGUAS PÚBLICAS DO ALENTEJO

EXECUÇÃO DE AÇUDE NEGATIVO NA ALBUFEIRA DO ROXO

PROJETO DE EXECUÇÃO
VOLUME 1 – MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

DEZEMBRO 2018

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	ESTUDO HIDROLÓGICO	3
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	3
2.2	CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	3
2.3	SOLO, COBERTO VEGETAL E NÚMERO DE ESCOAMENTO	4
2.4	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	6
2.5	CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA	7
2.6	CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA	8
2.6.1	Método do SCS – Hidrograma unitário	8
2.6.2	Método Racional	9
2.6.3	Caudais de ponta de cheia adotados	10
2.7	EROSÃO HÍDRICA E ESTIMATIVA DOS SEDIMENTOS PRODUZIDOS	10
3	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DO LOCAL	15
4	DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO	17
5	MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA	19
5.1	DESCRIÇÃO DO MODELO.....	19
5.2	RUGOSIDADE DOS LEITOS	20
5.3	ALARGAMENTOS E ESTREITAMENTOS DOS LEITOS.....	20
5.4	CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	21
5.5	RESULTADOS OBTIDOS	21
	BIBLIOGRAFIA	23

QUADROS NO TEXTO

QUADRO 2.1 - CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA	4
QUADRO 2.2 - VALORES CALCULADOS E ADOTADO PARA O TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	7
QUADRO 2.3 - CURVAS IDF-BEJA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO	7
QUADRO 2.4 - INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO PARA CADA PERÍODO DE RETORNO	8
QUADRO 2.5 - CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA. MÉTODO DO SCS	9
QUADRO 2.6 - CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA. MÉTODO RACIONAL.....	10
QUADRO 2.7 - FATOR DE ERODIBILIDADE DO SOLO (K).....	12
QUADRO 2.8 - FATOR DE COBERTO VEGETAL (C)	13

FIGURAS NO TEXTO

FIGURA 2.1 - BACIA HIDROGRÁFICA. REPRESENTAÇÃO SOBRE CARTA MILITAR	3
FIGURA 2.2 - OCUPAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA (FONTE: CORINE LAND COVER, 2012)	4
FIGURA 2.3 - HIDROGRAMAS DE CHEIA PARA OS DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO	9
FIGURA 3.1 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO NO LOCAL DA BACIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA RIBEIRA DO OUTEIRO (EXTRATO DA FOLHA 8 DA CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, EDITADA À ESCALA 1:200.000 E NA FIGURA REPRESENTADA SEM ESCALA).	15

ANEXOS

ANEXO I – PROSPEÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

ANEXO II – SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

1 INTRODUÇÃO

Na sequência do procedimento por ajuste direto n.º ADG/2/2018, a Águas Públicas do Alentejo S.A. adjudicou à CAMPO D'ÁGUA a elaboração do “Projeto de Execução de Açude Negativo na Albufeira do Roxo”, no concelho de Aljustrel, distrito de Beja.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da água, as Águas Públicas do Alentejo pretendem criar uma estrutura de retenção de sedimentos, retendo a poluição pontual ou difusa a montante da albufeira da barragem do Roxo. No presente caso, a estrutura de retenção de sedimentos consiste num açude de cabeceira (ou “açude negativo”) que consiste na escavação de um volume significativo de terras que permite a deposição de sedimentos, sem criar um obstáculo à continuidade fluvial, num dos braços da albufeira do Roxo (neste caso, na ribeira do Outeiro).

No **Capítulo 2** apresenta-se o estudo hidrológico de dimensionamento da bacia de retenção de sedimentos, com a caracterização da bacia hidrográfica, cálculo dos caudais de ponta de cheia, bem como uma estimativa da produção de sedimentos na bacia causada pela erosão hídrica.

Apresenta-se no **Capítulo 3** uma caracterização geológica e geotécnica do local de execução da bacia de retenção de sedimentos. No **Anexo I** são apresentados os resultados da prospeção geológica-geotécnica efetuada.

No **Capítulo 4** é definida a solução adotada para a bacia de retenção de sedimentos, com a sua definição de formas e proteções em enrocamento.

A modelação e simulação hidráulica é apresentada no **Capítulo 5**, onde se descreve o modelo hidráulico utilizado. No **Anexo II** são apresentados os resultados obtidos.

No **Desenho 1** apresenta-se a planta de localização da bacia de retenção de sedimentos, sob a carta militar, à escala 1:25 000.

2 ESTUDO HIDROLÓGICO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo hidrológico teve por objetivo a determinação dos caudais de ponta de cheia correspondentes a diversos períodos de retorno, a considerar no dimensionamento hidráulico da bacia de retenção de sedimentos – “açude negativo”.

Numa primeira fase foram determinadas as características físicas da bacia, sendo posteriormente calculados os caudais de ponta de cheia, tendo a precipitação sido determinada com base nas curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF).

2.2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA

Para permitir a quantificação de parâmetros fisiográficos importantes para a determinação dos caudais de ponta de cheia, nomeadamente do tempo de concentração, procedeu-se à caracterização da bacia hidrográfica na secção de controlo de caudais considerada

A bacia hidrográfica estudada tem a sua secção de referência localizada na ponte da Estrada Municipal 529 sobre o Rio Outeiro, junto à localidade de Santa Vitória. A sua definição e das linhas de água foi efetuada sobre topografia e ortofotomapas.

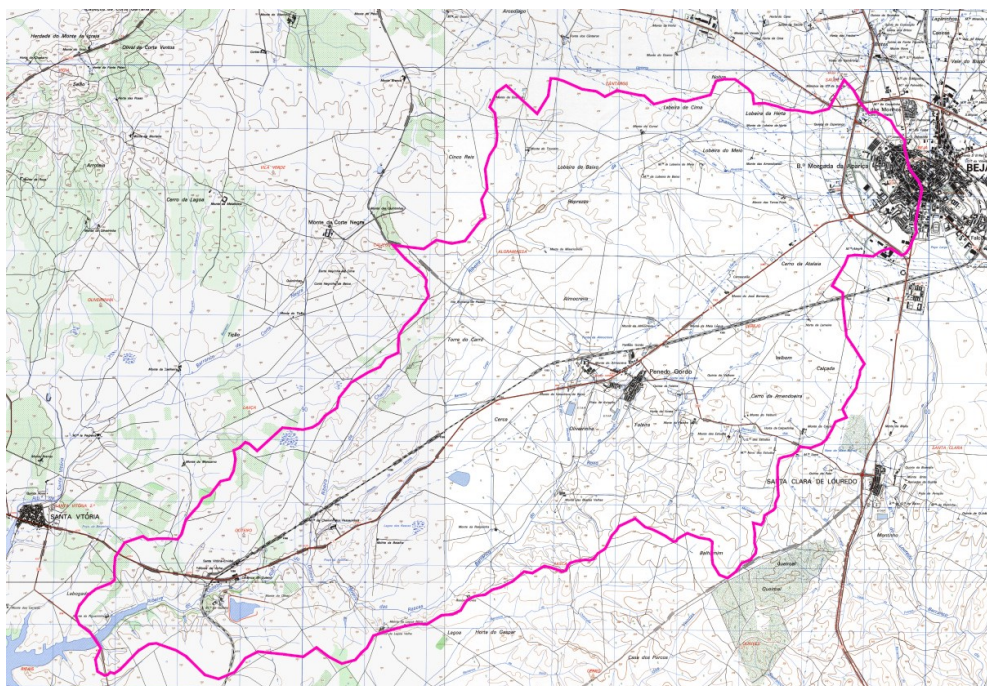


Figura 2.1 - Bacia Hidrográfica. Representação sobre Carta Militar

As principais características fisiográficas da bacia hidrográfica podem ser observadas no Quadro 2.1

Quadro 2.1 - Características fisiográficas da bacia hidrográfica

Características fisiográficas	
Área (km ²)	65,89
Comprimento da linha de água principal (km)	18,40
Altitude mínima da bacia (m)	133,00
Altitude máxima da bacia (m)	289,00
Declive médio da linha de água principal (m/m)	0,85
Declive médio da bacia hidrográfica (%)	3,93

2.3 SOLO, COBERTO VEGETAL E NÚMERO DE ESCOAMENTO

A análise do tipo de solos de uma bacia hidrográfica e do seu tipo de utilização tem influência direta nos fenómenos hidrológicos que correm na bacia, nomeadamente no que diz respeito à infiltração e escoamento superficial.

A ocupação da bacia hidrográfica foi definida com base na informação do “Corine Land Cover” (2012) validada pelos ortofotomapas datados de 2012. Na figura seguinte apresenta-se a ocupação da bacia hidrográfica em estudo.

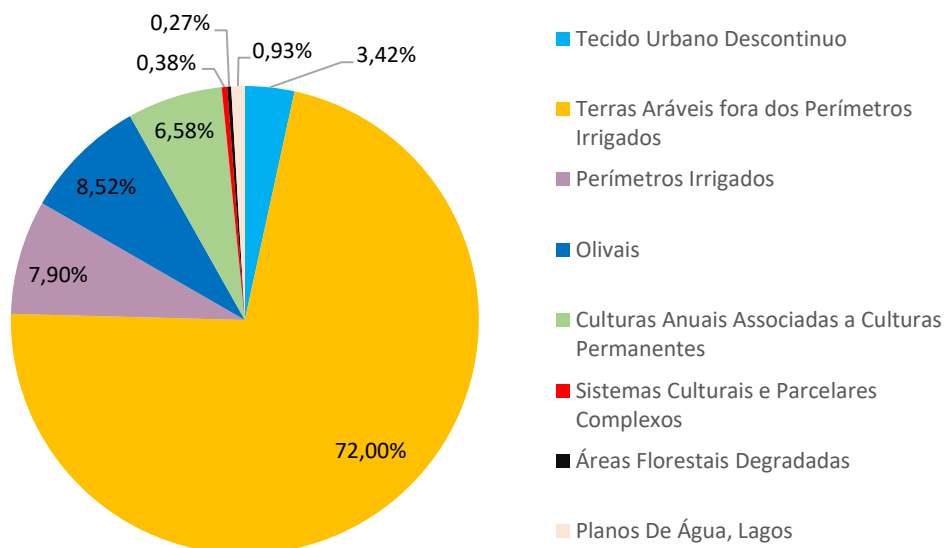


Figura 2.2 - Ocupação na bacia hidrográfica (Fonte: Corine Land Cover, 2012)

Verifica-se que cerca de 72% da bacia é ocupada por terrenos aráveis fora dos perímetros irrigados. Na restante área predomina a ocupação agrícola (perímetros irrigados, olivais e culturas anuais associadas a culturas permanentes).

O parâmetro hidrológico que permite atender à utilização e ocupação do solo numa bacia hidrográfica, tendo em conta a incidência das intensidades de infiltração, é o número de escoamento (CN – Curve Number). Este parâmetro é utilizado para o cálculo do tempo de concentração e das perdas de precipitação, mediante a aplicação de procedimentos desenvolvidos pelo Soil Conservation Service (SCS). Como consequência desta utilização, é possível caracterizar cheias resultantes de precipitações intensas.

Procedeu-se à avaliação do número de escoamento correspondente à situação atual, tendo como base o tipo de solos predominante na bacia hidrográfica estudada e a sua ocupação atual. Esta avaliação foi efetuada para condições médias e excecionais de humidade (AMC II e AMC III).

Tendo em consideração o uso do solo e o comportamento hidrológico dos solos predominantes (do **Tipo D**) consideraram-se, de acordo com Lencastre *et al.* (1984), os números de escoamento indicados no quadro seguinte.

Uso do solo	(%) ocupada	CN (AMC II)
Tecido Urbano Descontínuo	3,4	89
Terras Aráveis fora dos Perímetros Irrigados	72,0	81
Perímetros Irrigados	7,9	81
Olivais	8,5	83
Culturas Anuais Associadas a Culturas Permanentes	6,6	81
Sistemas Culturais e Parcelares Complexos	0,4	83
Áreas Florestais Degradadas	0,3	83
Planos De Água, Lagos	0,9	100
Total Bacia	100,0	81,63

Para cálculo dos caudais de ponta de cheia consideraram-se condições antecedentes de humidade relativas à situação AMC III (condições antecedentes mais húmidas) que, de acordo com Correia, 1983, são as que mais frequentemente se registam em Portugal Continental antes da ocorrência de cheias excecionais. O número de escoamento para esta situação obtém-se a partir do número de escoamento apresentado na tabela anterior, por aplicação da expressão (Chow *et al.*, 1988):

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0,13CN(II)}$$

Em que CN (II) e CN(III) representam os números de escoamento para condições AMC(II) e AMC(III) respetivamente. Tendo em consideração os valores de CN para condições AMC(II), para as condições antecedentes de humidade AMC(III) obtém-se o valor de 91,1 para o CN.

2.4 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Para calcular o tempo de concentração da bacia, utilizaram-se as fórmulas racional, de Témez e do Soil Conservation Service, seguidamente definidas:

Racional (USACE, 1975): $T_c = 0,28 \left(\frac{L}{s^{0,25}} \right)^{0,76}$

onde:

- T_c - tempo de concentração (h);
- L - comprimento da linha de água principal (km);
- s - declive médio do curso de água principal (m/m).

Témez (1978): $T_c = 0,3 \left(\frac{L}{s^{0,25}} \right)^{0,76}$

onde:

- T_c - tempo de concentração (h);
- L - comprimento da linha de água principal (km);
- J - declive médio da linha de água principal (m/m).

Soil Conservation Service (SCS, 1972 e 1973): $T_c = 1,667 T_I$

$$T_I = \frac{L^{0,8} (0,03937 S + 1)^{0,7}}{734,43 s^{0,5}}$$

$$S = \frac{25400}{N} - 254$$

onde:

- T_c - tempo de concentração (h);
- T_I - tempo de atraso, também designado por tempo de resposta (h);
- S - capacidade máxima de retenção de água no solo (mm)
- L - comprimento da linha de água principal (m);
- N - número de escoamento associado a condições antecedentes de humidade médias (AMCII);
- s - declive médio da bacia hidrográfica (%).

No quadro seguinte são apresentados os valores do tempo de concentração obtidos por aplicação das fórmulas anteriores, bem como o valor adotado.

Quadro 2.2 - Valores calculados e adotado para o tempo de concentração

Método	Tempo de concentração (h)
Racional (USACE)	6,70
Temiz	7,17
S.C.S	6,75
Adotado	6,90

2.5 CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA

Os caudais de ponta de cheia dependem da intensidade de precipitação (i) e das perdas iniciais de precipitação.

A intensidade de precipitação relaciona-se diretamente com a duração da chuvada t , com base na expressão:

$$i=at^b$$

Em que os coeficientes a e b adquirem valores específicos consoante o período de retorno considerado e a região onde se pretende estimar a precipitação.

Adotaram-se as curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) definidas por Brandão *et al.* (1998).

À zona em estudo correspondem as curvas IDF definidas para Beja que, para os períodos de retorno de 2 a 20 anos, apresentam os valores dos coeficientes udométricos apresentados no quadro seguinte.

Quadro 2.3 - Curvas IDF-Beja para diferentes períodos de retorno

Período de retorno (anos)	5 min < t_c < 30 min		30 min < t_c < 6h		6h < t_c < 48h	
	a	b	a	b	a	b
2	163,46	-0,511	303,85	-0,692	368,82	-0,725
5	199,75	-0,478	468,63	-0,727	511,80	-0,742
10	224,26	-0,464	581,81	-0,743	608,92	-0,750
20	247,97	-0,454	692,32	-0,754	703,36	-0,756

Assim, e considerando uma chuvada com duração igual à do tempo de concentração, foram calculadas as intensidades de precipitação para cada período de retorno. Os valores obtidos podem ser observados no quadro seguinte.

Quadro 2.4 - Intensidade de precipitação para cada período de retorno

Período de retorno (anos)	I (mm/h)
2	4,7
5	5,9
10	6,6
20	7,4

2.6 CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA

2.6.1 MÉTODO DO SCS – HIDROGRAMA UNITÁRIO

Utilizou-se o método do hidrograma unitário sintético do Soil Conservation Service, através do modelo HEC-HMS - *Hydrologic Modeling System*, da autoria do *Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers* que, pelo facto de não se fundamentar diretamente na análise estatística dos caudais, é considerado um método semi-empírico.

Este modelo permite determinar os hidrogramas das cheias para os diversos períodos de retorno considerados (2,5, 10 e 20 anos) afluentes à bacia de retenção de sedimentos, combinando, para o efeito, a análise estatística das precipitações intensas e a aplicação de um modelo precipitação-escoamento.

Este modelo permite obter hidrogramas de cheia, por convolução de hietogramas de precipitação com um hidrograma unitário do SCS. Para determinação do hietograma foi utilizado o método dos blocos alternados, com o bloco correspondente à maior precipitação na posição central, tendo-se utilizado as precipitações definidas anteriormente.

Considerou-se que as perdas iniciais são obtidas a partir da seguinte fórmula (SCS, 1972, 1973):

$$h_0 = \frac{5080}{N} - 50,8$$

onde:

- h_0 – perdas iniciais da precipitação (mm);
- N – número de escoamento associado a condições AMCIII.

Em resultado da aplicação do modelo HEC-HMS obtiveram-se os hidrogramas de cheia para a bacia hidrográfica em estudo, correspondentes aos períodos de retorno de 2 a 5 000 anos. Os

hidrogramas de cheia obtidos apresentam-se na Figura 2.3. No Quadro 2.5 apresentam-se os caudais de ponta de cheia obtidos.

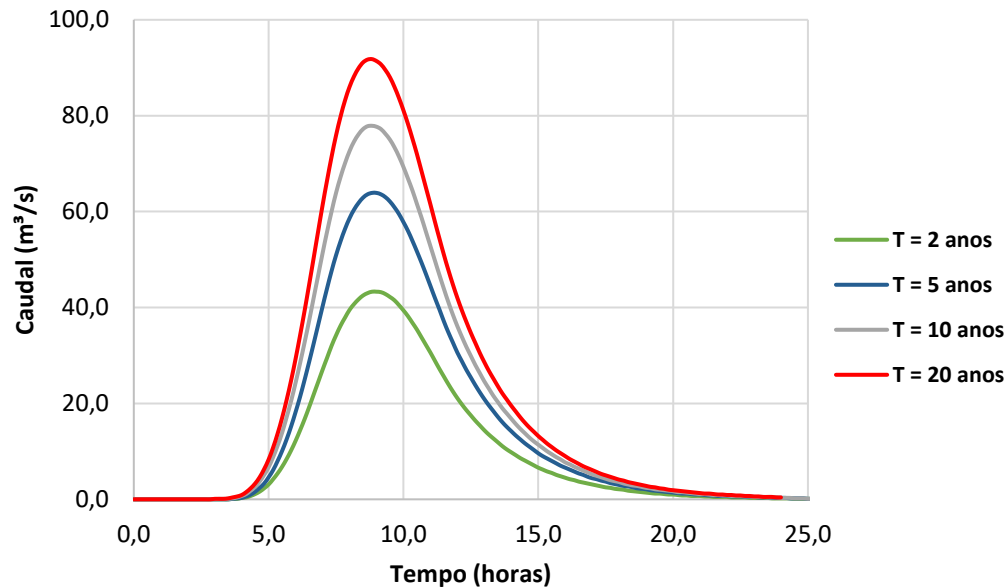


Figura 2.3 - Hidrogramas de cheia para os diferentes períodos de retorno

Quadro 2.5 - Caudais de ponta de cheia. Método do SCS

Período de retorno (anos)	Caudal (m³/s)
2	43,3
5	63,9
10	77,9
20	91,8

2.6.2 MÉTODO RACIONAL

O método racional é um dos mais utilizados para a determinação de caudais de ponta pluviais e pode ser expresso da seguinte forma:

$$Q_p = \frac{C I A}{3,6}$$

em que Q_p (m³/s) é o caudal de ponta de cheia correspondente a um determinado período de retorno T , C (adimensional) é um coeficiente de escoamento, I (mm/h) é a intensidade de precipitação correspondente ao período de retorno T e ao tempo de concentração da bacia T_c e A (km²) é a área da bacia drenada.

Na fórmula racional o coeficiente C engloba vários fatores, não só a relação entre o volume de água escoada e a precipitação (ou seja, o coeficiente de escoamento propriamente dito) mas também efeitos, mais ou menos importantes, de retenção e atraso do escoamento superficial ao longo do terreno, das linhas de água naturais, e do período de retorno. Grande parte destes fatores depende das características físicas e da ocupação da bacia e das condições antecedentes de humidade do solo. Neste estudo utilizaram-se os coeficientes C referidos por Maranhã das Neves (2015).

No quadro seguinte apresentam-se os valores do coeficiente C considerados, a intensidade das precipitações e os valores dos caudais de ponta obtidos.

Quadro 2.6 - Caudais de ponta de cheia. Método Racional

Período de retorno (anos)	I (mm/h)	C	Caudal de ponta (m³/s)
2	4,7	0,33	28,3
5	5,9	0,36	38,6
10	6,6	0,38	46,3
20	7,4	0,42	57,0

Esta fórmula, que relaciona o caudal de ponta de cheia com a intensidade da chuvada que lhe deu origem, admite que a frequência de ocorrência dos dois fenómenos é a mesma. No entanto, outros dos pressupostos em que a fórmula se baseia afastam-se muito da realidade, retirando-lhe o carácter “racional” que o nome indica.

Além disso, o coeficiente C também não é um verdadeiro coeficiente de escoamento que exprima a proporção entre o escoamento ou precipitação útil e a precipitação total que lhe deu origem, dado que a proporção entre a ponta de cheia e a intensidade da chuvada é normalmente muito superior à proporção entre os volumes totais do escoamento e da precipitação.

2.6.3 CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA ADOTADOS

A aplicação dos dois métodos referidos anteriormente permite concluir que a fórmula Racional tende a subestimar os caudais de ponta de cheia. Assim, e visto que o método do SCS é conceptualmente o mais elaborado, traduzindo o processo físico que ocorre na bacia hidrográfica, adotaram-se os valores obtidos pelo SCS indicados no Quadro 2.5.

2.7 EROÇÃO HÍDRICA E ESTIMATIVA DOS SEDIMENTOS PRODUZIDOS

A quantificação de material sólido sedimentado pode ser obtida pelo cálculo das seguintes variáveis:

- Erosão específica na bacia hidrográfica;
- Produção de sedimentos na bacia hidrográfica.

Erosão Específica

Para a determinação da erosão específica recorreu-se à Equação Universal de Perda de Solos (EUPS). Esta equação é um modelo empírico, desenvolvido nos EUA, entre os anos 60 e 70, para prever a erosão do solo agrícola.

Este modelo permite estimar as perdas médias anuais de solo por unidade de área partindo de fatores físicos, espaciais, temporais e de gestão. A aplicação do modelo é feita pela multiplicação desses fatores através da seguinte equação (Wischmeir e Smith, 1978):

$$A=R K L S C P$$

Em que:

- A – perda de solo média ou erosão específica, em unidades compatíveis com as selecionadas para K, e para o período de tempo considerado para o cálculo da erosividade R, habitualmente em ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$).
- R – fator de erosividade da precipitação, sendo representado pelo índice de erosividade EI30, habitualmente em unidades ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);
- K - Fator de erodibilidade do solo, medindo a resistência dos solos ao destacamento e transporte. Este fator é quantificado em unidades de perda de solo por unidade do fator de erosividade R, ou seja ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}.ano^{-1}$);
- LS - Fator fisiográfico. Fator adimensional que conjuga o comprimento da encosta (L) e o declive (S). O fator L corresponde à relação entre os comprimentos da encosta e do talhão de referência. O fator S corresponde à relação entre os declives da encosta e do talhão de referência;
- C - Fator de coberto vegetal. Fator adimensional que traduz o efeito da ocupação do solo na taxa de perda de solo;
- P - Fator de práticas agrícolas. Fator adimensional que traduz a relação entre a perda de solo de um talhão com uma determinada prática agrícola e de um talhão segundo a linha de maior declive. Estima a perda de solo decorrente de práticas agrícolas ou medidas de controlo de erosão. Varia entre 0 e 1.

Para as bacias em estudo a aplicação da **EUPS** conduziu aos resultados de seguida referidos.

Fator R

O fator R foi estimado a partir da precipitação anual, recorrendo à regressão proposta por Coutinho *et al.*, 1993:

$$R=0,28 \times P-44,3$$

Sendo P a precipitação anual em mm. Para obtenção de R em unidades SI é necessário multiplicar a equação por 9,6. Como a precipitação média anual ponderada na bacia em estudo é 532 mm, logo:

$$R = 1026 \text{ MJ.mm} / (\text{ha.h.ano}).$$

Fator K

Para a avaliação da erodibilidade do solo em grandes áreas ou em áreas complexas, como as bacias hidrográficas, normalmente recorre-se a informação generalizada como a cartografia de solos com unidades pedológicas caracterizadas. Assim, a partir das cartas de solos, o fator K foi obtido com base na sistematização dos valores deste parâmetro efetuada por Pimenta (1988) e que se apresentam no quadro seguinte, para os solos mais representativos na bacia hidrográfica.

Quadro 2.7 - Fator de erodibilidade do solo (K)

Tipo de solo (Classificação FAO)	K (SI)
Luvisolos mediterrâneos pardos de materiais não calcários, normais	0,029
Luvisolos mediterrâneos ou amarelos de materiais não calcários, normais	0,032
Planossolos	0,025
Luvisolos Hidromórficos sem horizonte eluvial para-solos argiluvitados pouco insaturados	0,036
Cambissolos calcários pardos, normais	0,030
Cambissolos calcários vermelhos, normais	0,032
Vertissolos barros Pretos	0,032
Fluvisolos aluviossolos modernos não calcários	0,026

Tendo em conta os valores apresentados, obteve-se para K o valor de 0,030 t.ha.h/(ha.MJ.mm).

Fator LS

O fator LS foi calculado recorrendo à equação do fator L proposta por Wischmeier e Smith (1978) conjugadas com as equações do fator S propostas por McCool *et al.* (1987), de acordo com as seguintes equações:

- $LS = (\lambda / 22,13)^m \times (10,8 \text{ sen } \theta + 0,03)$ se $s < 9 \%$
- $LS = (\lambda / 22,13)^m \times (16,8 \text{ sen } \theta - 0,50)$ se $s > 9 \%$

Em que: λ é o comprimento da encosta, θ é o ângulo da encosta com declive s (radianos), m é um coeficiente que depende de s, e que tem os seguintes valores:

- $m=0,5;$ $s \geq 5 \%$;
- $m=0,4;$ $3 \% \leq s < 5 \%$;
- $m=0,3;$ $1 \% \leq s < 3 \%$;
- $m=0,2;$ $s < 1 \%$.

Normalmente, o escoamento superficial concentra-se em menos de 120 metros. Este é o comprimento de encosta limite na maioria das situações.

Deste modo, considerou-se um comprimento de encosta de 120 m e o declive médio da bacia hidrográfica de 3,93 %, o que conduziu a um valor de LS de 0,89.

Fatores C e P

Para a determinação do fator C utilizaram-se os elementos publicados em Pimenta (1988), para as classes de ocupação de solo indicadas na carta Corine Land Cover e que se apresentam no quadro seguinte.

Quadro 2.8 - Fator de coberto vegetal (C)

Uso do solo	% ocupada	C
Tecido Urbano Descontínuo	3,4	0,01
Terras Aráveis fora dos Perímetros Irrigados	72,0	0,40
Perímetros Irrigados	7,9	0,20
Olivais	8,5	0,10
Culturas Anuais Associadas a Culturas Permanentes	6,6	0,40
Sistemas Culturais e Parcelares Complexos	0,4	0,20
Áreas Florestais Degradadas	0,3	0,10
Planos De Água, Lagos	0,9	0,00
Total da Bacia		0,34

Para o fator P, uma vez que muitas das áreas cultivadas são em faixas, considerou-se um valor de 0,25

Valor calculado da erosão específica

Tendo em consideração os diferentes fatores anteriormente calculados, a aplicação da EUPS conduz ao seguinte valor para a erosão específica, que é considerado um valor muito baixo.

$$A = 2,34t / (\text{ha.ano}).$$

Produção de sedimentos

Tendo em conta que a equação anterior não prevê a deposição de sedimentos, recorreu-se ao coeficiente de produção de sedimentos para determinar a produção de sedimentos a partir da erosão específica:

Na ausência de uma equação de âmbito local para a caracterização do coeficiente de produção de sedimentos, é recomendada a aplicação das equações empíricas de Roehl, que consideram a

intervenção da área, do declive e da relação de bifurcação da bacia. As equações de Roehl (1962) são traduzidas pelas seguintes expressões:

$$[1] \quad \log C_{PS} = 1,714 - 0,339 \log (A_b)$$

$$[2] \quad \log C_{PS} = 1,494 - 0,648 \log (L_b)$$

$$[3] \quad \log C_{PS} = 4,365 - 0,230 \log A_b - 0,510 \cdot \log (L_b/H_b) - 2,786 \cdot \log R_b$$

em que,

- C_{PS} - coeficiente de produção de sedimentos (%);
- A_b - área da bacia (km^2);
- L_b - comprimento da bacia (m);
- H_b - altura da bacia (m);
- R_b - relação de bifurcação média da bacia (-).

De acordo com o autor, a equação [3] seria mais precisa. Na prática, nem sempre é aplicável uma vez que pode conduzir a valores de C_{PS} superiores a 100%, como no presente caso.

Foi utilizado um valor médio obtido a partir das duas primeiras equações, obtendo-se um C_{PS} de 8%, e uma produção de sedimentos (PS) de 0,18 t/(ha.ano)

3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DO LOCAL

Os terrenos no local de implantação da bacia de retenção de sedimentos estão enquadrados em sedimentos aluvionares e co-aluvionares modernos associados à dinâmica sedimentar da própria albufeira da Barragem do Roxo e ribeira do Outeiro. Assim são identificados materiais argilo-arenosos e areias-argilosas com algum cascalho xistento subrolado. As margens da ribeira do Outeiro, no local em estudo, são circundadas por afloramentos enquadrados na formação do Pulo do Lobo, pertencentes à unidade geológica da zona sul portuguesa, da Era paleozoica, do período Devónico. São aflorantes nas margens da ribeira do Outeiro, no local em estudo, filitos e quartzitos com quartzo de exsudação da formação do Pulo do Lobo, representados em mapa geológico por D_{p1}.

Do ponto de vista da morfologia, o local de implantação o da obra insere-se numa vasta área aplanada e limitada por uma pequena escarpa/talude na margem sul da ribeira, no troço de interesse.

O local de implementação da obra foi representado na Carta Geológica de Portugal dos Serviços Geológicos de Portugal, (Folha 8) à escala 1:200.000. Na figura seguinte apresenta-se um extrato dessa mesma cartografia (sem escala). No **Anexo I** apresentam-se os resultados da prospeção geológica-geotécnica efetuada.

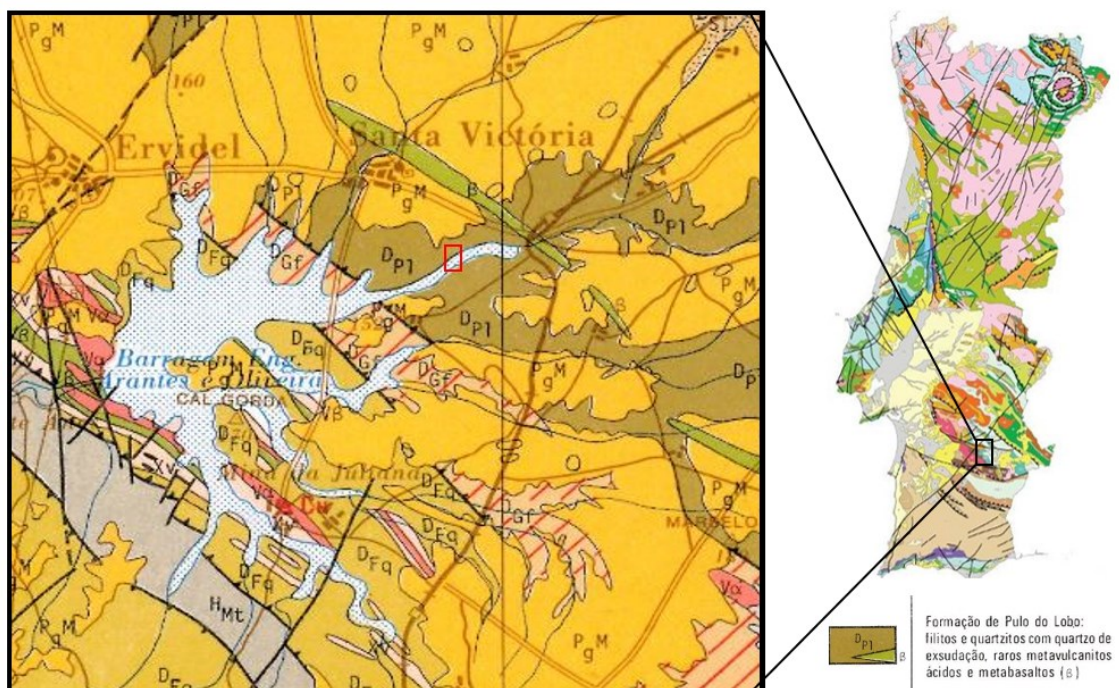


Figura 3.1 - Enquadramento geológico no local da bacia de retenção de sedimentos na ribeira do Outeiro (extrato da Folha 8 da Carta Geológica de Portugal, editada à escala 1:200.000 e na figura representada sem escala).

4 DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO

A albufeira do Roxo caracteriza-se por possuir uma batimetria plana e uma significativa atividade agrícola na sua área envolvente. O seu Nível de Pleno Armazenamento (NPA) encontra-se à cota 136 m, sendo que durante o período de verão a cota média de exploração é de 127,5 m. Neste período as ameaças à qualidade da água são diferentes da situação de pleno armazenamento, pelo que surge assim a possibilidade de criar formas passivas de melhoria da qualidade da água.

Uma das formas de melhorar a qualidade da água consiste na criação de bacias de retenção de sedimentos, permitindo a retenção de sedimentos e de poluição pontual ou difusa na faixa interníveis, a montante da albufeira à cota 127,5 m. Esta solução será especialmente efetiva nos meses de primavera e verão.

A bacia de retenção de sedimentos consistirá num reservatório escavado no leito da linha de água, causando assim uma depressão no seu curso natural. Tem como objetivo a deposição de sedimentos, nos quais se podem incluir eventuais cargas poluentes provenientes do transporte sólido, com origem em estações de tratamento de águas residuais ou agro-indústrias, evitando assim que cheguem à albufeira da barragem do Roxo.

A soleira desta bacia de retenção de sedimentos situar-se-á à cota 131,5 m e terá um volume total de cerca de 19 000 m³.

A linha de água entrará na depressão no terreno através de uma rampa de inclinação suave, com talude 1:10 (V:H). Este talude permitirá o acesso de máquinas e meios de transporte à soleira da bacia de retenção de sedimentos, de forma a permitir a retirada dos sedimentos acumulados no seu interior. No talude de jusante e nos taludes laterais a inclinação será de 1:4 (V:H), com um patamar com 3 metros de largura à cota 133,0 m.

Imediatamente a montante da bacia de retenção de sedimentos a linha de água será regularizada numa extensão de cerca 44 metros, com taludes 1:1.5 (V:H) e protegida com enrocamento.

O talude de jusante da bacia de retenção de sedimentos possuirá uma depressão, de forma a encaminhar os caudais afluentes mais baixos até à linha de água existente.

De forma a escoar os caudais afluentes, e antes de se executar a escavação da bacia de retenção de sedimentos, será executada uma vala lateral que funcionará como desvio provisório das águas. Após a execução da bacia de retenção de sedimentos, esta vala será aterrada.

Os materiais sobrantes da escavação serão carregados, transportados e espalhados para os locais definidos pelas Águas Públicas do Alentejo.

5 MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

5.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

Para a avaliação das condições do escoamento de caudais de cheia efetuou-se a simulação em regime permanente dos caudais de ponta por utilização do modelo HEC-RAS.

O *HEC-RAS, River Analysis System* é um modelo de simulação unidimensional, desenvolvido para a realização de simulação hidráulica de escoamentos, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*.

O modelo é baseado nas equações de Saint-Venant, tendo-se considerado constante a massa volúmica da água:

Equações da continuidade:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial x_c} + \frac{\partial A_c}{\partial t} = q_f$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial x_f} + \frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} = q_c + q_f$$

Equações da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial (V_c Q_c)}{\partial x_c} + g A_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + j_c \right) = M_f$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial t} + \frac{\partial (V_f Q_f)}{\partial x_f} + g A_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + j_f \right) = M_c$$

onde os subscritos “c” e “f” se referem respetivamente ao leito normal e ao leito de cheia, e em que:

- Q - caudal (m³/s);
- A - área molhada do fluxo de escoamento (m²);
- q - caudal afluente e efluente lateral (m²/s);
- S - Volume de água armazenado (m³);
- V - velocidade média de escoamento (m/s);
- g - aceleração da gravidade (m²/s);
- h - altura de água (m)
- j – perda de carga unitária (m/m);
- $\frac{\partial z}{\partial x}$ - declive longitudinal do fundo;

- M – fluxo da quantidade de movimento (N/m/s).

As hipóteses de base utilizadas são as seguintes:

- O escoamento é praticamente unidirecional;
- A secção do curso de água é composta por duas áreas principais, a do leito normal (onde se inclui a secção da vala) e a do leito de inundação;
- As acelerações verticais são nulas, sendo a distribuição de pressões hidrostática em cada secção transversal;
- A perda de carga do escoamento por unidade de percurso é relativamente pequena, e é bem aproximada pela equação da perda de carga por unidade de percurso correspondente ao regime uniforme, em cada secção transversal.

5.2 RUGOSIDADE DOS LEITOS

No que respeita à rugosidade (número de Manning) do troço de linha de água analisado utilizaram-se os seguintes valores:

- Leito principal – $K_s = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ($n=0,04$);
- Leito de cheia - $K_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ($n=0,05$).

5.3 ALARGAMENTOS E ESTREITAMENTOS DOS LEITOS

Os alargamentos e estreitamentos das secções originam perdas de energia num troço definido por duas secções.

O HEC-RAS assume que ocorre um estreitamento quando a altura cinética na secção de jusante é maior do que a de montante e, quando ocorre o inverso (a de montante maior que a de jusante) ocorre um alargamento.

Quando uma destas situações acontece, a perda de energia é estimada pelo coeficiente de contração ou expansão, especificado, multiplicado pelo valor absoluto da diferença das alturas cinéticas das duas secções.

Ou seja, a perda de energia devido aos alargamentos e estreitamentos é estimada pela seguinte equação:

$$\Delta H = C \left| \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right|$$

Onde:

- ΔH – perda de energia (m);
- C – coeficiente de contração ou expansão (-);
- V_1 – velocidade média do escoamento na secção de montante (m/s);
- V_2 – velocidade média do escoamento na secção de jusante (m/s);
- g – aceleração da gravidade (m/s^2).

Os valores adotados para os coeficientes de estreitamento e alargamento foram, respetivamente, 0,1 e 0,3. Estes valores são recomendados pelo *U.S. Corps of Engineers, HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*, Nov.2002.

5.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

A condição de fronteira de jusante considerada foi a altura de água do regime uniforme tangente, calculada com o declive final da linha de água.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS

Tendo em conta os períodos de retorno analisados (2, 5, 10 e 20 anos) verifica-se que logo para o período de retorno de 2 anos a bacia de retenção de sedimentos encontrar-se-á totalmente submersa, situação que também é expectável caso a albufeira da barragem do Roxo se encontre à cota do seu NPA (136 m).

As velocidades do escoamento na bacia de retenção de sedimentos são baixas, variando entre os 0,26 m/s (correspondente a um período de retorno de $T = 2$ anos) e os 0,91 m/s ($T = 20$ anos). Já na linha de água natural as velocidades variam entre os 1,55 m/s ($T = 2$ anos) e os 3,36 m/s ($T = 20$ anos).

A maior tensão de arrastamento na bacia de retenção de sedimentos verifica-se no talude de jusante, tendo sido obtido um valor de 11,9 N/m² para um período de retorno de 20 anos.

Tendo em conta os valores obtidos para as velocidades do escoamento e para a tensão de arrastamento, e de forma a evitar erosões localizadas tanto nos troços em vala como no talude de jusante da bacia de retenção de sedimentos, optou-se por colocar uma proteção em enrocamento, com $D_{50} = 0,20$ m, composta por uma camada com espessura de $2 D_{50}$ (0,40 m).

No **Anexo II** são apresentados os resultados detalhados da simulação hidráulica.

BIBLIOGRAFIA

- Brandão, C., Rodrigues, R., Pinto da Costa, J. (2001). *Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal continental*. INAG, Direção dos Serviços de Recursos Hídricos, Lisboa.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., (1988), *Applied hydrology*. McGraw Hill Book Company
- Coutinho, M.A.; Álvares, M.T. e Pimenta, M.T., (1993), *Erosão hídrica e sedimentação em albufeiras da bacia hidrográfica do rio Guadiana*. 1º Relatório Interno. Lisboa.
- Lencastre, A., Franco, F.M. (1984), *Lições de Hidrologia*, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica.
- Maranha das Neves, E., Caldeira, L. e Pinheiro, A. (2015). *Projeto, Construção e Observação de Pequenas Barragens de Aterro*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- McCool, D.K.; Brown, L.C.; Foster, G.R.; Mutchler, C.K.; Meyer, L.D., (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396.
- Pimenta, M.T, (1998), *Diretrizes para a aplicação da equação universal de perda dos solos em SIG; factor de cultura C e factor de erodibilidade do solo K*. Instituto da Água (INAG). Direcção de Serviços de Recursos Hídricos (DSRH), Lisboa.
- Roehl, J.E., (1962), Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors, *Int. Ass. Sci. Hydrol. Publ.* 59, 202-213.
- U.S. Army Corps of Engineers (2013). *Hydrologic Modeling System - Hec-HMS. User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, Washington.
- U.S. Army Corps of Engineers (2016). *Hec-RAS – River Analysis System. User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, Washington.
- Wischmeier, W. H. e Smith, D.D, (1978), *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA, Soil Conservation Service, Agricultural Handbook, N537.

ANEXO I – PROSPEÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

PROJETO DE EXECUÇÃO DA BACIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA RIBEIRA DO OUTEIRO		Coordenadas (ETRS89) M = 10531 m P = -190875 m		Capacidade da máquina ☒ Difícil escavação ☐ Não escavável ☐		POÇO P01			
Localização: Ribeira do Outeiro		Z =		Profundidade = 3,6m		Data: 29/11/2018			
Prof. (m)	DESCRIÇÃO	Escavação			Amostra	Ensaio de laboratório			Classificação Unificada Classificação AASHTO
		Fácil	Difícil	M. difícil		finos (%)	LL (%)	IP (%)	
	Solos aluvionares argilosos de cor cinzenta acastanhado, molhada, moldável e plástica. Presença de raízes Foto 1 e 2.								
-0.5	Nível de Água - Caudoloso								
-1.0									
	Argila arenosa fina de cor cinzenta com passagens cinzento escuro, moldável e plástica, molhada.								
-1.5									
-2.0									
	Argila arenosa de cor amarela acinzentada com passagens cinzento escuro, moldável e plástica, molhada com cascalho/blocos dispersos xistentos e quartzíticos								
-2.5									
	Aos 3,0m verifica-se uma maior abundância de cascalho/blocos rochosos. A escavação efectuou-se com água no fundo do poço.								
-3.0									
-3.5									
	Fim de escavação devido ao colapso das paredes do poço e limite do alcance do braço da máquina. Observa-se grande fluxo de água e poço inundado.								
-4.0									
-4.5									



Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4

PROJETO DE EXECUÇÃO DA BACIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA RIBEIRA DO OUTEIRO			Coordenadas (ETRS89)			Capacidade da máquina ☒				POÇO P02	
			M = 10592 m			Difícil escavação ☐					
			P = -190822 m			Não escavável ☐					
Localização: Ribeira do Outeiro			Z =			Profundidade = 3,4m				Data: 29/11/2018	
Prof. (m)	DESCRIÇÃO	Escavação			Amostra	Ensaio de laboratório				Classificação Unificada	
		Fácil	Difícil	M. difícil		finos (%)	LL (%)	IP (%)	Compactação Ensaio Proctor normal	Classificação AASHTO	
	Solos aluvionares argilosos de cor castanha acinzentado, molhada com passagens arenosas. Presença de raízes Foto 1.										
-0.5											
	NA Nível de Água - Caudoloso										
-1.0	Argila arenosa fina a média de cor cinzenta com passagens cinzento escuro, lodosa, moldável e plástica, molhada. Foto 2.										
-1.5											
-2.0	Areia fina de cor amarela alaranjado com finos, moldável e plástica, molhada. Foto 3.										
-2.5											
-3.0	Argila arenosa fina a média de cor amarela acinzentada com passagens acastanhadas, com cascalho/blocos xistentos sub-angulosos a sub-rolados de Dmáx= 10cm. Foto 4,										
-3.5	Fim de escavação devido ao colapso das paredes do poço. Observa-se grande fluxo de água e poço inundado.										
-4.0											
-4.5											



Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4

PROJETO DE EXECUÇÃO DA BACIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NA RIBEIRA DO OUTEIRO		Coordenadas (ETRS89) M = 10570 m P = -190842 m		Capacidade da máquina ☒ Difícil escavação ☐ Não escavável ☐		POÇO P03				
Localização: Ribeira do Outeiro		Z =		Profundidade = 3,6m		Data: 29/11/2018				
Prof. (m)	DESCRIÇÃO	Escavação			Amostra	Ensaio de laboratório				Classificação Unificada Classificação AASHTO
		Fácil	Difícil	M. difícil		finos (%)	LL (%)	IP (%)	Compactação Ensaio Proctor normal	
	Solos aluvionares argilosos de cor castanha acinzentado, molhada com passagens arenosas. Presença de raízes Foto 1.									
-0.5	NA Nível de Água - Caudoloso									
-1.0										
	Argila arenosa fina de cor cinzenta acastanhado com passagens cinzento escuro, moldável e plástica, molhada. Foto 2.									
-1.5										
-2.0										
-2.5	Argila arenosa fina de cor cinzenta com passagens acinzentadas, algo moldável e plástica, molhada. Foto 3.									
-3.0										
	Areia fina argilosa de cor amarela acinzentado, moldável, molhada com cascalho/blocos dispersos xistentos e quartzíticos de Dmáx=10cm. Foto 4.									
-3.5										
-4.0	Fim de escavação devido ao colapso das paredes do poço e ao limite do alcance do braço da máquina. Observa-se grande fluxo de água e poço inundado.									
-4.5										



Foto 1



Foto 2



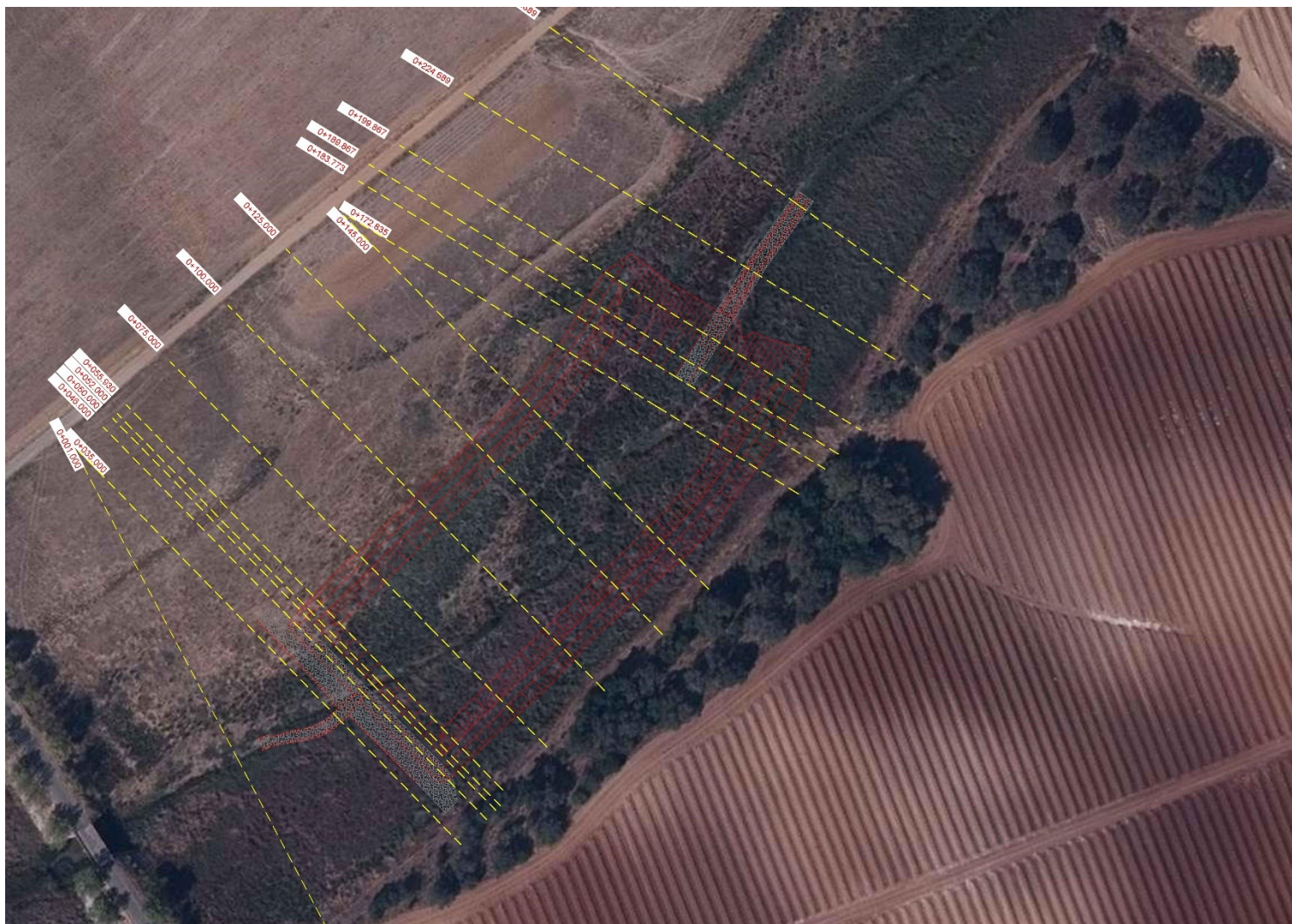
Foto 3



Foto 4

ANEXO II - SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

Localização das secções transversais

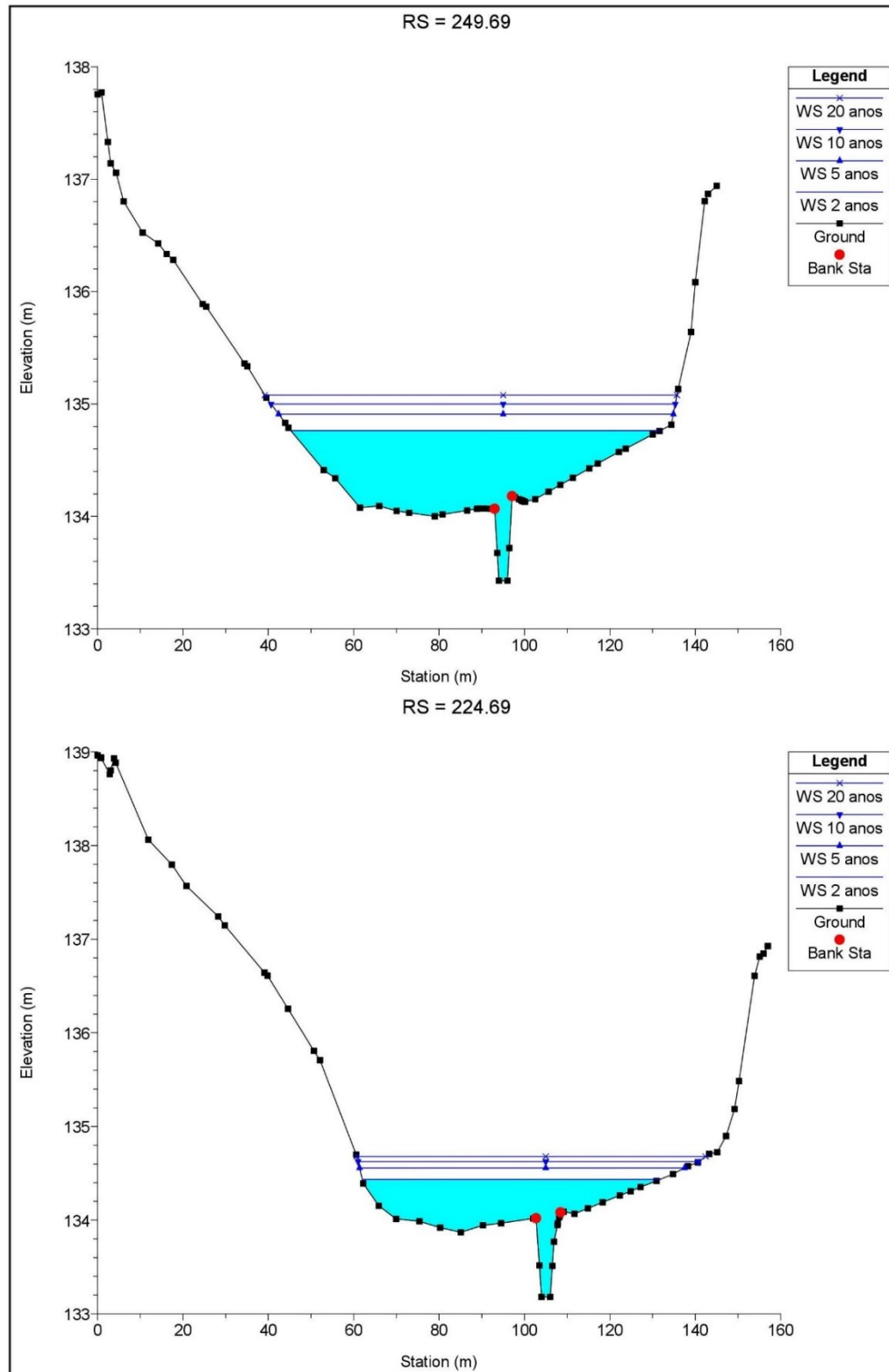


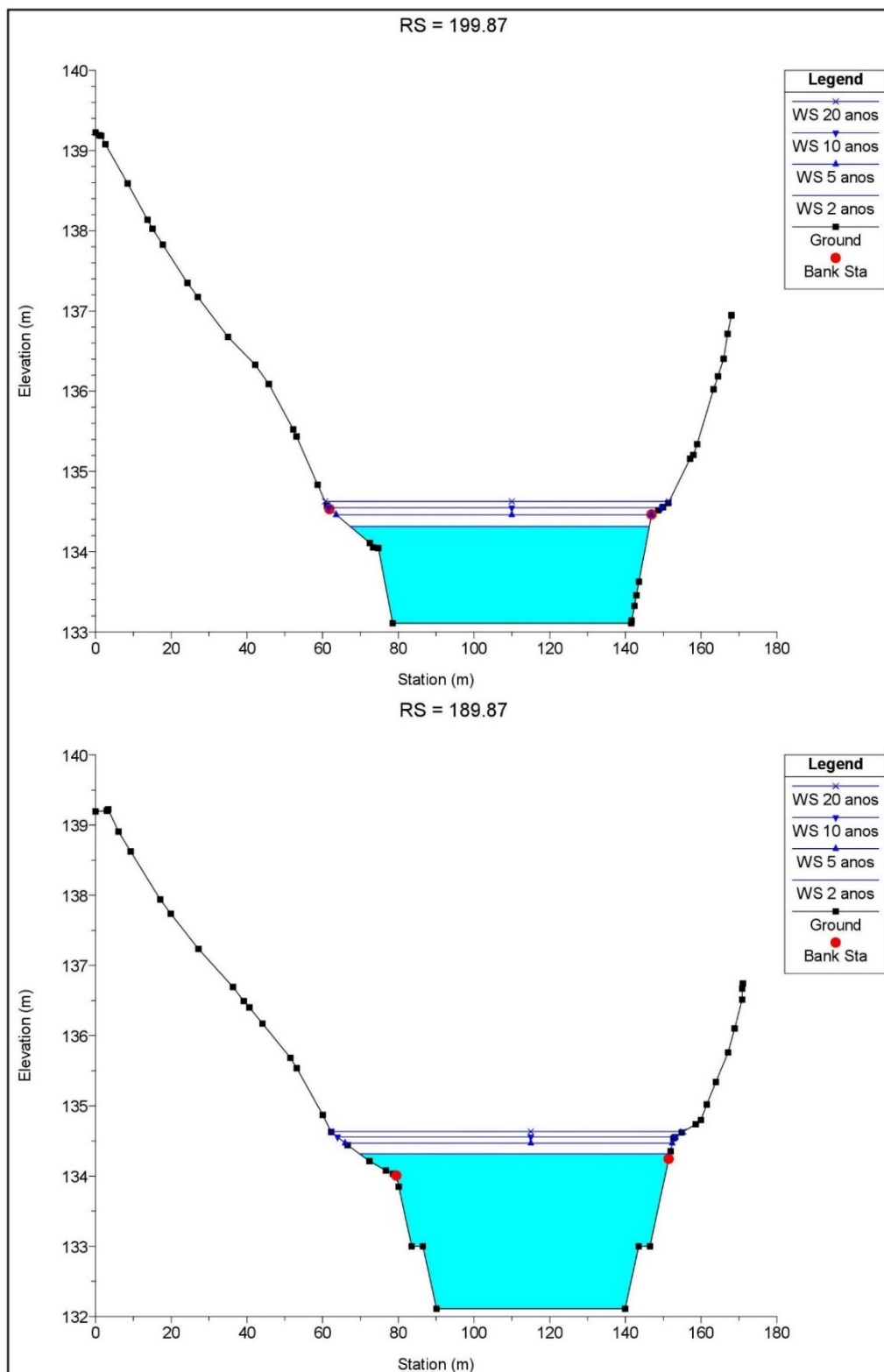
Características do escoamento em cada secção transversal

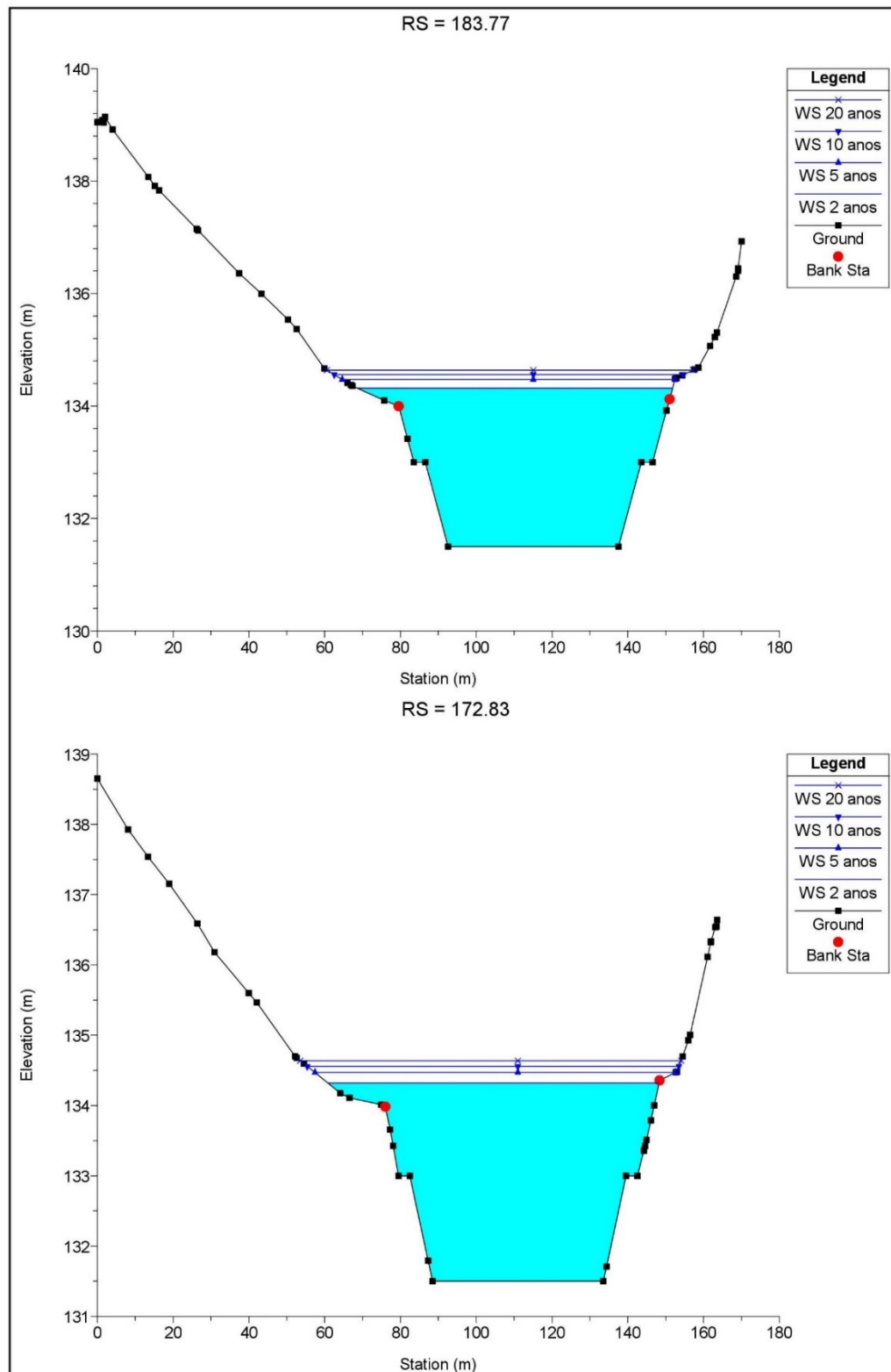
Secção	Período de retorno	Caudal (m³/s)	Altura do escoamento (m)	Velocidade (m/s)	Largura do escoamento (m)	Tensão de arrastamento (N/m²)
249.69	2 anos	43.3	1.33	1.75	86.55	47.43
249.69	5 anos	63.9	1.48	1.95	92.48	56.40
249.69	10 anos	77.9	1.57	2.04	94.68	60.65
249.69	20 anos	91.8	1.65	2.13	96.56	64.70
224.69	2 anos	43.3	1.25	2.75	69.66	125.57
224.69	5 anos	63.9	1.38	3.00	76.19	142.98
224.69	10 anos	77.9	1.44	3.18	79.76	158.28
224.69	20 anos	91.8	1.50	3.36	81.72	173.39
199.87	2 anos	43.3	1.20	0.52	79.02	4.25
199.87	5 anos	63.9	1.35	0.68	83.34	6.87
199.87	10 anos	77.9	1.44	0.76	88.10	8.65
199.87	20 anos	91.8	1.52	0.85	90.83	10.35
189.87	2 anos	43.3	2.21	0.31	82.05	1.25
189.87	5 anos	63.9	2.36	0.43	86.42	2.28
189.87	10 anos	77.9	2.45	0.50	89.26	3.06
189.87	20 anos	91.8	2.53	0.57	93.08	3.88
183.77	2 anos	43.3	2.82	0.26	83.23	0.80
183.77	5 anos	63.9	2.97	0.36	87.77	1.50
183.77	10 anos	77.9	3.06	0.42	92.20	2.05
183.77	20 anos	91.8	3.14	0.48	96.62	2.64
172.83	2 anos	43.3	2.82	0.26	87.39	0.80
172.83	5 anos	63.9	2.97	0.36	95.15	1.50
172.83	10 anos	77.9	3.06	0.42	98.10	2.04
172.83	20 anos	91.8	3.14	0.48	100.53	2.62
145	2 anos	43.3	2.82	0.26	91.48	0.80
145	5 anos	63.9	2.97	0.36	99.98	1.49
145	10 anos	77.9	3.05	0.42	102.11	2.03
145	20 anos	91.8	3.13	0.48	103.91	2.60
125	2 anos	43.3	2.82	0.26	99.56	0.80
125	5 anos	63.9	2.97	0.36	104.32	1.49
125	10 anos	77.9	3.05	0.42	106.50	2.02
125	20 anos	91.8	3.13	0.48	108.20	2.59
100	2 anos	43.3	2.82	0.26	96.73	0.80
100	5 anos	63.9	2.96	0.36	101.71	1.48
100	10 anos	77.9	3.05	0.42	104.28	2.02
100	20 anos	91.8	3.13	0.48	107.05	2.60
75	2 anos	43.3	2.81	0.26	99.36	0.80
75	5 anos	63.9	2.96	0.36	106.31	1.49
75	10 anos	77.9	3.05	0.42	108.46	2.03
75	20 anos	91.8	3.13	0.48	110.28	2.61

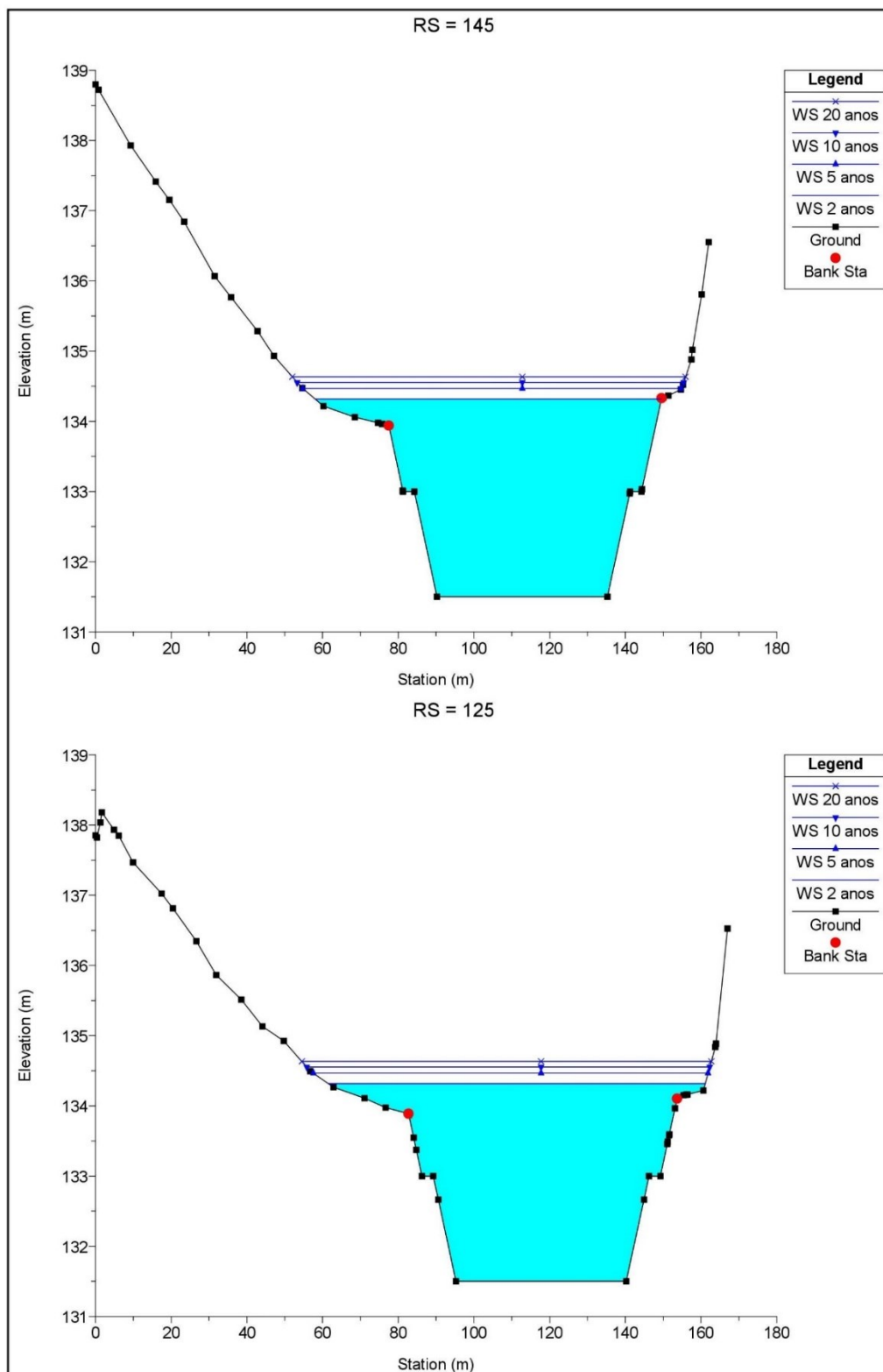
Secção	Período de retorno	Caudal (m³/s)	Altura do escoamento (m)	Velocidade (m/s)	Largura do escoamento (m)	Tensão de arrastamento (N/m²)
55.93	2 anos	43.3	2.81	0.26	100.86	0.80
55.93	5 anos	63.9	2.96	0.36	107.83	1.48
55.93	10 anos	77.9	3.05	0.42	110.32	2.02
55.93	20 anos	91.8	3.13	0.48	112.22	2.59
52	2 anos	43.3	1.83	0.36	102.31	1.76
52	5 anos	63.9	1.98	0.49	108.35	3.08
52	10 anos	77.9	2.06	0.57	110.46	4.06
52	20 anos	91.8	2.14	0.64	112.38	5.06
50	2 anos	43.3	1.33	0.47	102.86	3.24
50	5 anos	63.9	1.47	0.62	108.09	5.33
50	10 anos	77.9	1.55	0.70	110.15	6.80
50	20 anos	91.8	1.62	0.78	112.03	8.27
46	2 anos	43.3	1.07	0.58	103.31	5.18
46	5 anos	63.9	1.21	0.74	107.92	8.05
46	10 anos	77.9	1.29	0.83	109.90	9.99
46	20 anos	91.8	1.36	0.91	111.70	11.90
35	2 anos	43.3	1.52	1.55	101.95	36.16
35	5 anos	63.9	1.65	1.76	106.86	45.34
35	10 anos	77.9	1.73	1.88	108.79	50.51
35	20 anos	91.8	1.80	1.98	110.41	55.10
1	2 anos	43.3	1.51	2.46	95.99	92.63
1	5 anos	63.9	1.62	2.65	101.71	104.01
1	10 anos	77.9	1.69	2.76	104.20	111.11
1	20 anos	91.8	1.75	2.86	106.96	117.39

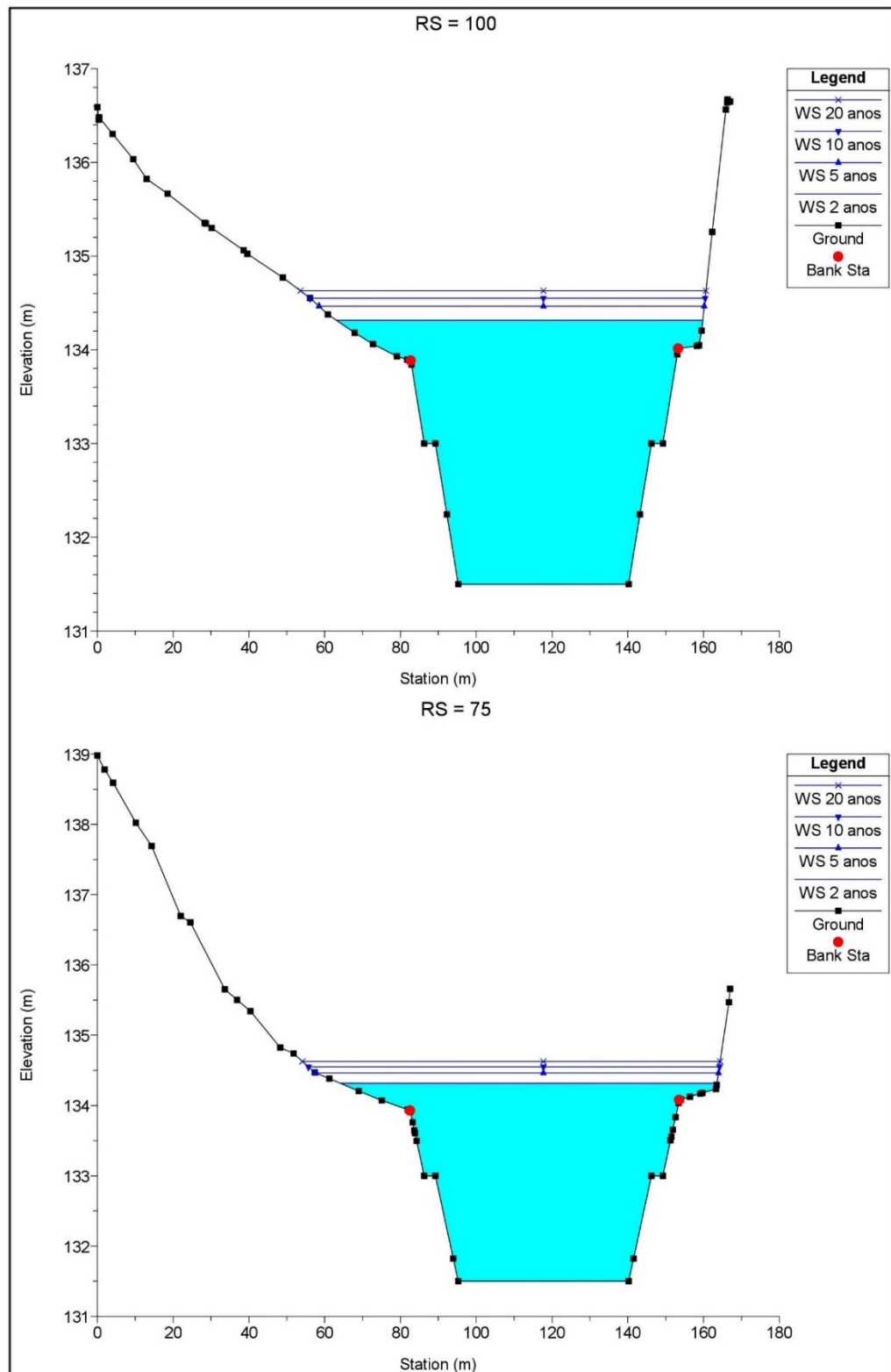
Altura do escoamento nas secções transversais

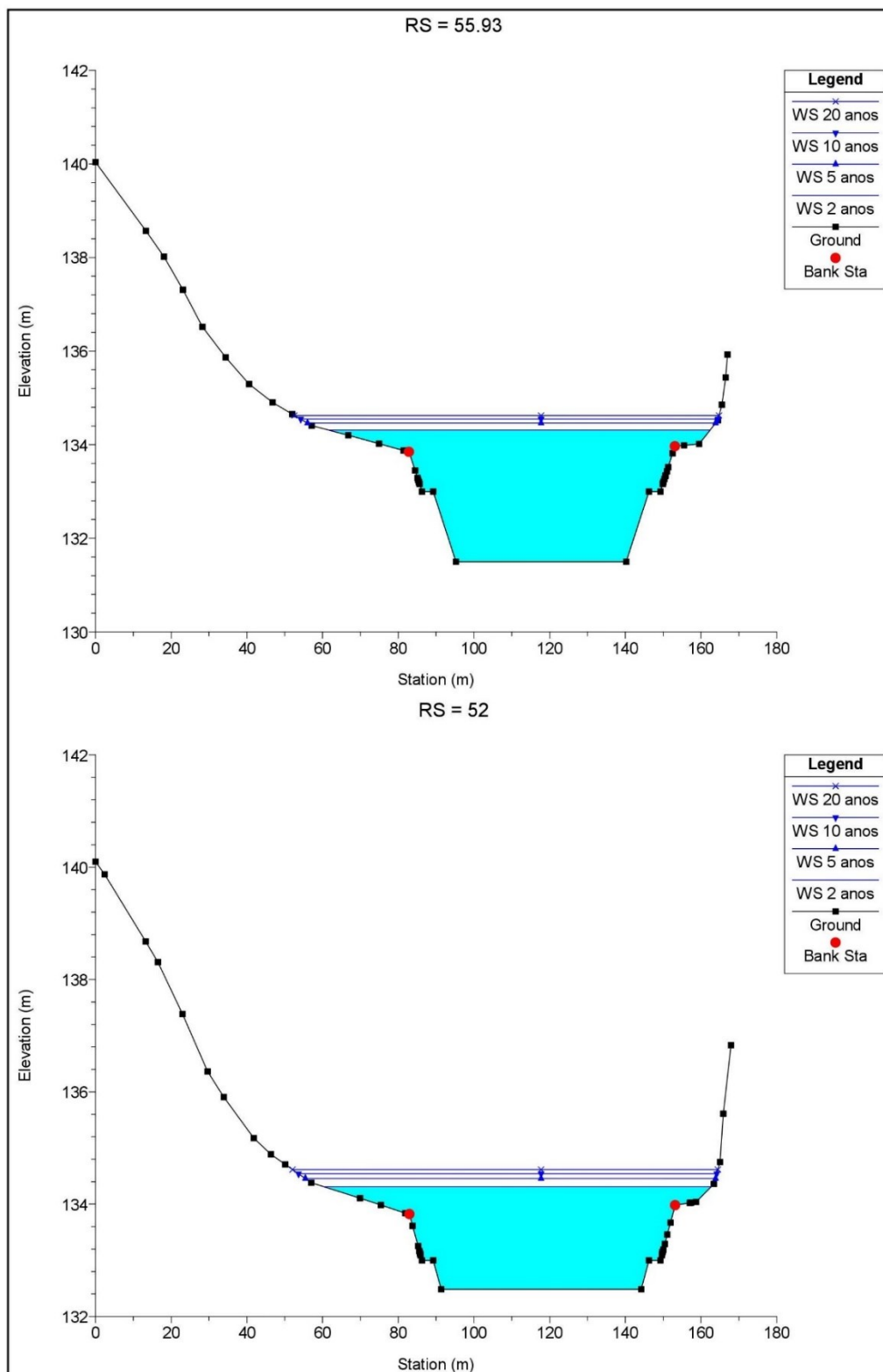


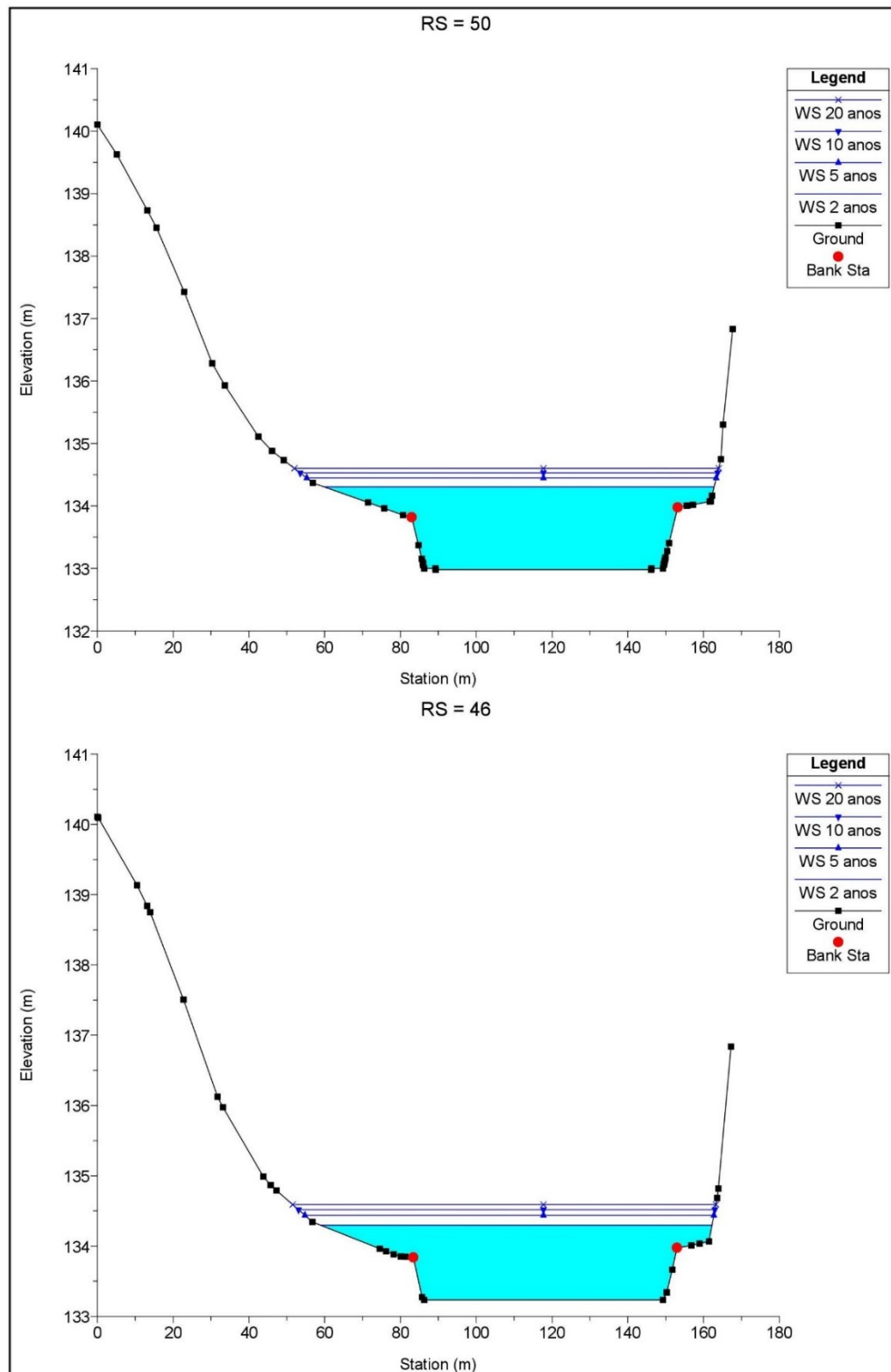


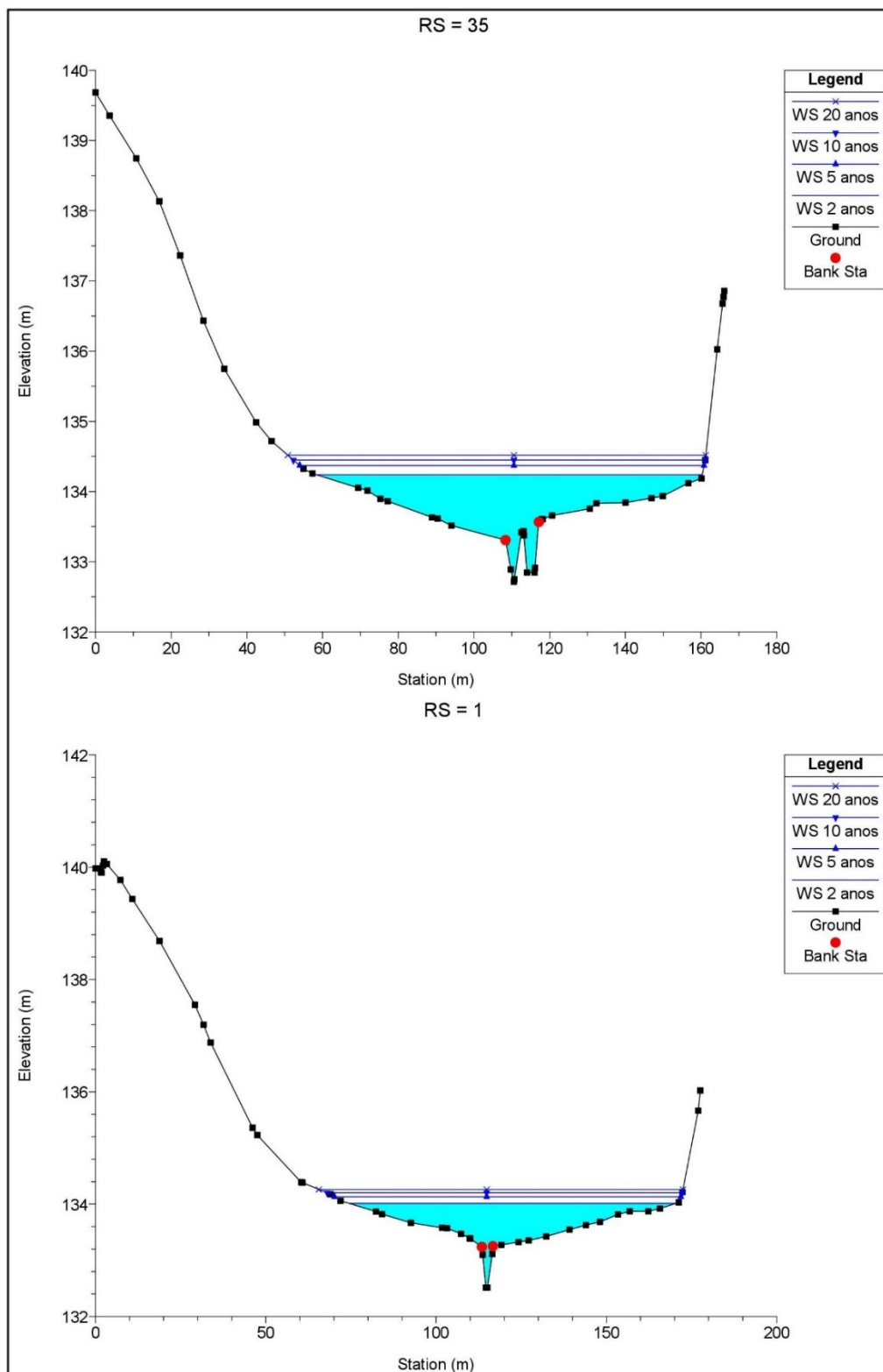












Áreas inundadas para diferentes períodos de retorno



