

ESTUDO/PROJETO DO DESVIO E RENATURALIZAÇÃO DE DUAS PEQUENAS LINHAS DE ÁGUA AFLUENTES AO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO

Diversion and Renaturalization of Two Tributary Streams of the Reservoir of Fridão Hydroelectric Power Plant

MARIA LUÍSA SANTOS ⁽¹⁾, RODRIGO MAIA ⁽²⁾ e MANUEL OLIVEIRA ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec08176@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

⁽³⁾ Engenheiro Civil, EDP,
Rua Ofélia Diogo Costa, 39, 4050-009 Porto, manuelaugusto.oliveira@edp.pt

Resumo

A minimização dos impactes ambientais associados à alteração do estado natural dos rios por parte do Homem tem vindo a assumir uma importância crescente, sendo hoje uma das grandes preocupações do modelo de gestão de recursos hídricos. Com a degradação progressiva dos ecossistemas e zonas ribeirinhas, urge a adoção de medidas de reabilitação fluvial adequadas aos actuais paradigmas ambientais, em cursos de água outrora retificados por meio de materiais e estruturas rígidas e em futuras intervenções em rios e ribeiras.

O trabalho apresentado objetiva a definição de soluções naturalizadas para o desvio de duas linhas de água afluentes à albufeira do Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão, no rio Tâmega, em alternativa ao desvio das mesmas por meio de um canal revestido com betão (solução anteriormente considerada). São analisadas duas soluções, a primeira definida numa ótica mais conservadora, com utilização de técnicas tradicionais favoráveis ao processo de naturalização, e a segunda procurando uma solução mais ecológica, conjugando técnicas de engenharia natural e tradicionais.

Palavras-Chave: Gestão de recursos hídricos, reabilitação fluvial, canal de desvio.

Abstract

Minimizing the environmental impacts of changes made by human activity on natural water courses is nowadays one of the biggest concerns of water resources management. The progressive degradation of the river ecosystems requires the need of requalification measures framed on current environmental paradigms to be adopted in water courses that were once rectified by means of rigid materials or structures, and also in new interventions to come.

The aim of the work is to define natural solutions for the diversion of two tributary streams of the reservoir of Fridão hydroelectric power plant, in the Tâmega river, in alternative to the construction of a concrete open channel (solution previously foreseen). Two possible solutions are analysed, the first defined in a more conservative way, using traditional stream requalification techniques that fit the naturalization process and the second aiming at a more environmental friendly stream diversion.

Keywords: Water resources management, stream requalification, stream diversion, open channel.

1. Enquadramento Geral

As zonas ribeirinhas, pela extraordinária riqueza dos seus solos, férteis para fins agrícolas, pela disponibilidade de água potável para alimento e rega e temperaturas amenas, tornaram-se, desde cedo, o local escolhido pelo Homem para edificar as suas primeiras localidades, a partir das quais se formaram as primeiras civilizações (Saraiva, 1999). A convergência de oportunidades de exploração de recursos que se concentram ao longo dos rios fez com que estes fossem usados pelo Homem para numerosos fins ao longo de quase 1000 anos, frequentemente negligenciando os impactes ambientais associados às suas intervenções.

O desvio de cursos de água de superfície, uma das mais comuns alterações ao seu estado natural, esteve frequentemente associado à criação de canais artificiais, revestidos com materiais rígidos que não exercem qualquer função ecológica, constituindo elementos estranhos à paisagem.

Com a crescente degradação dos ecossistemas e zonas ribeirinhas, é necessário adotar uma gestão integrada de recursos hídricos, que atenda não só à satisfação de usos e necessidades do Homem, mas também às necessidades hídricas dos ecossistemas.

Neste trabalho pretende-se enquadrar neste conceito o projeto de desvio do troço final de duas linhas de água afluentes ao curso principal do rio Tâmega, afetadas pela construção da escombreira do escalão principal do Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão (AHF).

2. Local de Estudo

O local escolhido para a escombreira do escalão principal do AHF localiza-se num vale na margem direita do rio Tâmega, coincidente com o troço final da Ribeira de Levadoiro e o seu afluente (Figura 1).



Figura 1. Localização da escombreira do escalão principal do AHF e da ribeira de Levadoiro e do afluente à mesma (traço azul grosso).

A Ribeira de Levadoiro – cuja bacia hidrográfica pode ser identificada a traço azul fino na Figura 1, nasce à altitude de 530 metros na Serra de Codeçoso e estende-se com uma orientação genericamente Noroeste-Sudeste até à confluência com o rio Tâmega.

O afluente à Ribeira de Levadoiro, identificado na mesma Figura 1 e doravante designado por afluente, tem também a sua nascente na Serra de Codeçoso a uma altitude de 430 m, e segue uma orientação aproximadamente Norte-Sul até à união com a ribeira de Levadoiro, muito perto da confluência desta com o rio Tâmega.

2.1. Caracterização das bacias hidrográficas

Para cada linha de água foi delimitada a respetiva bacia hidrográfica, sendo que a bacia 1 corresponde à Ribeira de Levadoiro e a bacia 2 ao afluente.

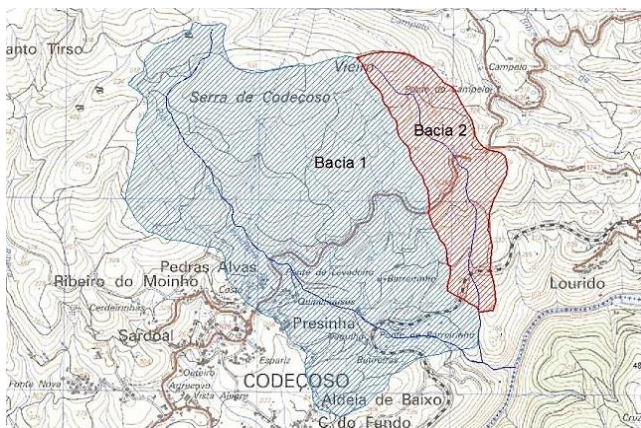


Figura 2. Bacias hidrográficas correspondentes às linhas de água em estudo.

Para cada bacia, foi determinada a área (A) e altura média ($\bar{H}$), no Quadro 1, sendo que a última foi obtida através da seguinte equação,

$$\bar{H} = \frac{\sum H_i \cdot A_i}{A} \quad [1]$$

em que $\bar{H}$ representa a altura média da bacia (m), H_i a altura média entre duas linhas de nível consecutivas (m), A a área da bacia (m²) e A_i a área entre duas curvas de nível consecutivas (m²).

Quadro 1. Características das bacias 1 e 2.

Bacia	A (km ²)	$\bar{H}$ (m)
1	2.2	345
2	0.5	300

2.2. Caudais de ponta de cheia

Os caudais de ponta de cheia foram estimados com recurso à fórmula racional (Eq. [2]), tendo sido considerados para o presente estudo tempos de retorno de 2, 50 e 100 anos.

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad [2]$$

em que Q representa o caudal de ponta de cheia (m³/s), C o coeficiente de escoamento superficial, I a intensidade de precipitação (mm/h) e A a Área da bacia (km²).

A caracterização das chuvadas foi feita com base nas curvas IDF do Posto udográfico de Amarante (061/01), cujos parâmetros se encontram sistematizados no Quadro 2, tendo sido consideradas durações de chuvadas entre os 5 e os 30 minutos.

Quadro 2. Parâmetros da curva IDF (Amarante).

T (anos)	A	b
2	168.07	-0.564
50	371.44	-0.526
100	411.78	-0.523

A intensidade média de precipitação (I) foi calculada com recurso à seguinte equação,

$$I = a \cdot t_p^b \quad [3]$$

em que I representa a intensidade média de precipitação (mm/h), t_p o tempo de precipitação (min) e a, b os parâmetros da curva IDF.

Para tal, foi previamente calculado o tempo de concentração, para o que foram utilizadas as fórmulas de Kirpich (Eq. [4]), Temez (Eq. [5]), e Giandotti (Eq. [6]), sendo os correspondentes valores e a respetiva média apresentados no Quadro 3.

$$t_c = 0.39 \times \left(\frac{L^2}{i} \right)^{0.385} \quad [4]$$

$$t_c = 0.30 \times \left(\frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76} \quad [5]$$

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.80\sqrt{H}} \quad [6]$$

em que t_c representa o tempo de concentração, em horas, L o comprimento da linha de água principal (km), i o declive médio da linha de água principal (%), A a área da bacia hidrográfica (km²) e $\bar{H}$ a altura média da bacia hidrográfica (m).

Quadro 3. Tempos de concentração calculados.

Bacia	Tempo de concentração (min)			
	Kirpich	Temez	Giandotti	Média
1	20	25	41	29
2	11	15	22	16

Foram seguidamente calculados os valores da intensidade média da precipitação com duração igual ao valor médio dos referidos tempos de concentração (Quadro 3) e para os tempos de retorno de 2, 50 e 100 anos, Quadro 4.

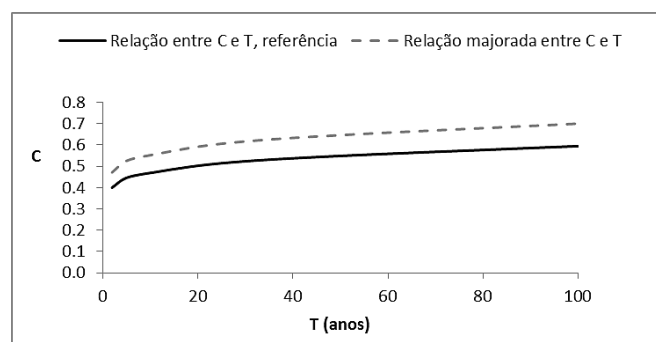
Quadro 4. Intensidades médias de precipitação.

Bacia	I (mm/h)		
	T= 2 anos	T= 50 anos	T= 100 anos
1	25	64	71
2	35	86	96

Para o cálculo do caudal de ponta de cheia, foi ainda necessário estimar o valor do coeficiente de escoamento superficial das bacias hidrográficas. Para tal, foram tidos como referência os valores de C presentes na segunda coluna do Quadro 5, adaptados de Chow *et al.* (1988), e que correspondem a zonas não urbanas do tipo floresta, com declives superiores a 7%. Os valores adotados no cálculo, apresentados na terceira coluna do Quadro 5 corresponderam à majoração daqueles valores pelo lado da segurança, e foram obtidos através da relação dada pelo gráfico da Figura 3 (Chow *et al.*, 1988).

Quadro 5. Valores de C (referência e adotados).

T (anos)	C referência	C adotado
2	0.35	0.50
5	0.39	0.50
10	0.41	0.60
25	0.45	0.60
50	0.48	0.60
100	0.52	0.70

Figura 3. Relação entre C e T referência (de acordo com Chow *et al.*, 1988) e relação utilizada.

Por fim, aplicando a fórmula racional, foi possível estimar os valores dos caudais de ponta de cheia para as duas bacias hidrográficas, para os períodos de retorno de 2, 50 e 100 anos, Quadro 6.

Quadro 6. Caudais de ponta de cheia.

Bacia	Q (m³/s)		
	T= 2 anos	T= 50 anos	T= 100 anos
1	7.4	22.4	29.2
2	2.2	6.4	8.3

3. Problemática

Como foi referido, o local definido para a escombreira ocupará o vale do troço final da Ribeira de Levadoiro e a sua implantação, uma vez que a escombreira ficará parcialmente emersa, irá interferir com a confluência natural das duas linhas de água à futura albufeira de Fridão. Por esta razão, é necessário considerar o desvio das linhas de água afetadas.

A EDP havia já, em 2011, submetido para licenciamento um projeto que previa a construção de um canal de desvio contornando o limite norte da escombreira, sendo este escavado na encosta e revestido com betão (Figuras 4 e 5).

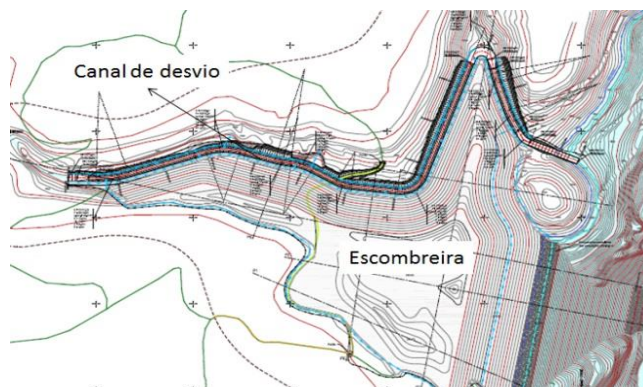


Figura 4. Planta da Solução apresentada pela EDP em 2011.

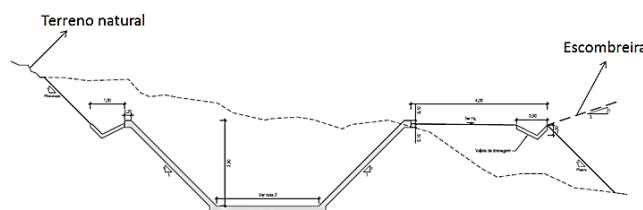


Figura 5. Secção transversal-tipo da Solução apresentada pela EDP em 2011.

A solução foi questionada em termos ambientais pelas autoridades competentes, essencialmente devido ao excessivo uso de betão, sendo por isso necessário desenvolver novas soluções.

4. Objetivos do Estudo

O estudo surge da necessidade de desenvolver soluções de projeto alternativas à solução inicial e que, atendendo a aspetos de naturalização, constituam soluções robustas, capazes de fazerem face aos eventos de cheia com tempos de retorno até 100 anos, e que sejam técnica e economicamente viáveis comparativamente com os canais de desvio tradicionais, normalmente construídos em betão.

5. Solução 1

A primeira solução proposta para o desvio das linhas de água consiste no estudo de dois canais (canal 1 e canal 2) construídos em aterro e completamente integrados na escombreira de montante do AHE, que confluem a jusante, dando origem ao designado canal 3 (Figura 6).

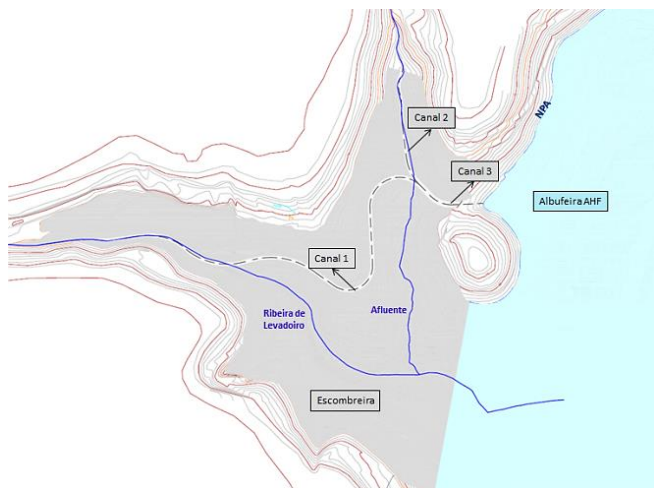


Figura 6. Planta esquemática dos 3 canais de desvio, linhas de água e escombreira.

Estes canais foram projetados conciliando técnicas de engenharia tradicional e plantação de vegetação autóctone nos leitos principais e de cheia e ainda nos taludes de ligação à plataforma da escombreira.

O canal 1 corresponde, assim, à obra de desvio do escoamento da Ribeira de Levadoiro, desenvolvendo-se até ao ponto de confluência com o canal 2, numa extensão de aproximadamente 361 m.

Por sua vez, o canal 2 tem um comprimento de cerca de 100 m e corresponde à obra de desvio do escoamento do afluente, desenvolvendo-se até ao ponto de confluência. Por fim, o canal 3, resultante da junção dos canais 1 e 2, tem um comprimento de cerca de 47 m e transporta o escoamento até início da zona de restituição do mesmo à albufeira do AHF.

Para além das zonas de secção corrente dos canais, foram dimensionadas, a montante, duas obras de ligação das duas linhas de água aos respetivos canais e, a jusante, a obra de restituição do escoamento à albufeira.

5.1. Traçado em planta

O traçado em planta dos canais de desvio foi definido de forma a tentar reproduzir o desenvolvimento de uma linha de água natural, conferindo-lhe alguma meandrização e, ao mesmo tempo, respeitando as seguintes condicionantes:

- A restituição do escoamento das linhas de água à albufeira do AHF foi localizada na pequena portela existente entre os dois morros que limitam, pelo lado Este, o vale que vai ser ocupado pela escombreira;
- Desenvolvimento dos canais numa extensão suficiente para que as suas soleiras tenham inclinação reduzida, compatível com regimes lentos do escoamento;
- Canais integralmente construídos no aterro da escombreira.

O traçado foi então definido de jusante para montante, tomando o local de restituição do escoamento à albufeira como ponto de partida. Neste local, aproximadamente à cota (164.00) foi fixada a soleira do ponto mais a jusante do canal 3.

Adotando uma inclinação de 0.5% para a soleira dos canais, valor suficientemente baixo para garantir um regime de escoamento compatível com a estabilidade do revestimento que se pretende adotar para o leito e margens, foi definido o traçado (do canal 3) até ao ponto de confluência dos três canais e, a partir daí, feitas as definições dos canais 1 e 2.

De forma a cumprir as demais condicionantes, nomeadamente a sua meandrização e integral construção em aterro, fixou-se um traçado composto pela alternância entre arcos de círculo e alinhamentos retos tangentes a estes, e que acompanha de perto o desenvolvimento das curvas de nível das encostas adjacentes.

5.2. Secções transversais correntes dos canais

Por ser a forma regular que melhor reproduz a morfologia de um curso de água natural, a secção corrente dos três canais foi definida como trapezoidal, composta e simétrica.

Nesta solução, e procurando um compromisso entre os critérios de naturalização e de robustez, o leito principal foi dimensionado com capacidade para suportar cheias com períodos de retorno até 50 anos, e revestido com enrocamento nas margens e no leito. O leito maior, capaz de suportar eventos de cheia com períodos de retorno até 100 anos, foi definido tendo em conta razões construtivas e de maximização da capacidade da escombreira, tendo-se adotado genericamente uma largura de 3 m.

O revestimento do leito principal e do leito maior é materializado, nesta solução, por um tapete de enrocamento, cujo dimensionamento é detalhado no ponto 5.3.

Por último, os taludes de ligação dos canais à plataforma da escombreira foram definidos com um declive mais suave (3H:1V) que os taludes do leito principal (abaixo definidos), de forma a permitir o acesso seguro ao canal por parte de pessoas e outras espécies animais.

5.2.1. Pré-dimensionamento do leito principal

Os leitos principais dos canais foram pré-dimensionados com recurso à ferramenta “*Stable channel design*” do programa de cálculo automático HEC-RAS, versão 4.1.0.

Nesta ferramenta foi escolhido o método de dimensionamento que associa a fórmula de Manning (Eq. [7]) e o método das forças trativas resolvido pelo método de Shields,

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) A \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad [7]$$

A utilização do método das forças trativas permite calcular a dimensão mínima do revestimento do canal, de forma que os elementos que o constituem não sejam arrastados pelo escoamento.

O dimensionamento do leito principal envolve, para além dos caudais considerados, as seguintes variáveis:

- Largura da base do canal (l), neste caso igual à base menor da secção trapezoidal que define o leito principal;
- Altura da secção (h);
- Rugosidade de Manning no leito e margens do canal (n);

- Inclinação longitudinal (i);
- Declividade dos taludes que constituem as margens da secção do leito principal (mH: 1V);
- Ângulo de repouso dos elementos constituintes do leito e margens do canal (θ);
- Gravidade específica (G_s) dos elementos constituintes do leito e margens do canal;
- Dimensão média (d_{50}) dos elementos constituintes do leito e margens do canal.

O pré-dimensionamento da secção passará, inicialmente, pela definição de 6 das 8 variáveis acima enunciadas, de forma que as restantes possam ser resolvidas pelo método.

Definiram-se, assim, os seguintes parâmetros:

- Largura da base da secção principal do canal, l , em função do caudal de dimensionamento fixado, procurando manter uma relação geométrica entre a altura e a largura semelhante em cada uma das secções dos 3 troços;
- Rugosidade de Manning, n , com um valor igual a $0.030 \text{ m}^{-1/3}$ para as margens e para o leito da secção dos três canais, valor de referência para um canal sinuoso modelado no terreno, com fundo empedrado e com bancos de vegetação;
- Inclinação longitudinal do leito do canal, i , igual a 0.5% para os 3 troços, sendo um valor suficientemente baixo para garantir a ocorrência de regime de escoamento lento e que, por isso, se adequa ao tipo de revestimento escolhido para o canal;
- Declive de 1.5H:1V para as margens, valor que permite a correta e segura aplicação do enrocamento, minimizando também, em comparação com taludes mais suaves, o volume de escavação criado pela construção do canal;
- Ângulo de repouso dos elementos constituintes do leito e margens do canal (θ), com um valor igual a 40° , normalmente associado a cascalho de dimensão média e medianamente angular (Lane, 1953).
- Gravidade específica (G_s) dos elementos constituintes do leito e margens do canal com valor de 2.65, valor de origem do programa.

O Quadro 7 resume os valores da altura de água e diâmetro médio mínimo do enrocamento calculados para as margens e leito correspondente às dimensões das secções-tipo adoptadas para os três troços de canal considerados.

Quadro 7. Resultados do pré-dimensionamento da secção transversal principal dos canais.

Canal	Q (m^3/s)	l (m)	h água (cálculo)	d_{50} margens (mm)	d_{50} leito (mm)
1	22.4	4.0	1.63	69	41
2	6.4	2.5	0.99	43	25
3	28.8	6.0	1.50	80	47

5.2.2. Aspetos construtivos

Para garantir as características de impermeabilização necessárias dos canais de desvio, dado os mesmos serem escavados no aterro da escombreira, deverá ser construído um filtro constituído por um geotêxtil e 3 camadas de material inerte com dimensões crescentes em profundidade.

Prevê-se ainda a colocação de terra vegetal nos interstícios da camada de enrocamento que irá revestir as margens e os leitos de cheia e, adicionalmente, a colocação de rizomas de espécies herbáceas como juncos ou lírios. A heterogeneidade do material de enrocamento nestas zonas, a colocação de terra vegetal no interstício dos elementos de maiores dimensões e a acumulação de finos (conseguida através da construção do filtro referido anteriormente), irão possibilitar a criação de bolsas de terra que, juntamente com os rizomas de espécies herbáceas introduzidos, permitirão criar condições para a colonização vegetal espontânea das referidas zonas (Figura 7).

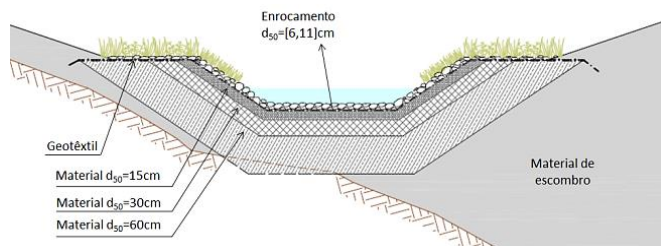


Figura 7. Secção transversal-tipo dos canais (Solução 1).

Salienta-se, ainda, que a integração dos canais de desvio com o aterro da escombreira e desta com as encostas adjacentes serão alvo de um Projeto de Integração e Reabilitação Paisagística (PIRP), cuja integração não se enquadra no âmbito deste trabalho.

5.3. Modelação do escoamento

De modo a efetuar e confirmar o dimensionamento final, foi feita a modelação do escoamento ao longo dos canais de desvio, em regime permanente e com recurso ao programa de cálculo automático HEC-RAS, versão 4.1.0.

O dimensionamento final do enrocamento a usar no revestimento de cada canal foi feito com base nos valores das tensões de arrastamento efetivas calculadas nas diversas secções definidas ao longo dos 3 canais, por aplicação do diagrama de Shields. Por uma questão de segurança, foi aplicado um fator de segurança (F.S.) de 1.5 ao valor máximo das tensões tangenciais efetivas obtidas para o leito principal de cada canal (τ_e), obtendo-se o valor das tensões de segurança (τ_s) utilizadas no dimensionamento do enrocamento a usar no fundo do leito principal. O correspondente valor da tensão de segurança nas margens (τ'_s) foi estimada por aplicação de um fator de correção igual a 0.76 (Chow, 1959) à tensão de segurança no fundo do canal (τ_s). Esse foi o valor usado para o dimensionamento do enrocamento a usar nas margens do leito principal.

Por último, foi dimensionado o enrocamento a usar nos leitos de cheia, tendo em conta as tensões tangenciais aí verificadas, as quais assumem valores bastante inferiores às restantes partes da secção transversal.

No Quadro 8 apresentam-se as características do enrocamento resultantes do dimensionamento final para o leito principal de cada um dos canais (fundo e margens), sendo de referir que o canal 3 foi dividido em dois troços, para ter em conta a grande diferença entre as tensões que se verificam no troço a montante e no troço a jusante do mesmo.

Quadro 8. Tensões de arrastamento e dimensões do enrocamento no leito principal.

Canal	$\tau_s = 1.5 \tau_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm) fundo	$\tau'_s = 0.76 \tau_s$ (N/m ²)	d_{50} (mm) margens
1	96.6	97	73.4	74
2	53	54	40	40
3 (montante)	109	110	83	84
3 (jusante)	298	301	226	228

O Quadro 9 apresenta os resultados relativos aos leitos de cheia (LC).

Quadro 9. Tensões de arrastamento e dimensões do enrocamento nos leitos de cheia.

Canal	τ''_e (N/m ²)	$\tau''_s = 1.5 \times \tau''_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm) LC
1	9.2	13.8	14
2	5	7	8

5.4. Ligação das linhas de água aos canais de desvio

As obras de ligação das linhas de água aos respectivos canais de desvio têm como objetivo a interceção do escoamento das linhas de água e o seu encaminhamento para os canais de desvio em condições adequadas às características dos canais.

As soluções adotadas são materializadas por meio de muros construídos em Gabião-caixa, colocados até uma altura que garanta a correta interceção do escoamento.

As alturas definidas para os muros basearam-se no cálculo das alturas de água esperadas a montante dos canais, valores obtidos através da modelação do escoamento para as cheias com tempo de retorno de 100 anos, com recurso ao programa de cálculo automático *HEC-RAS*.

Assim, na estrutura que interceta a ribeira de Levadoiro (Figura 8), os muros rematam no terreno natural à cota (173.00) e na estrutura que interceta o afluente (Figura 9) os muros rematam à cota (168.00).

A jusante dos muros de interceção foram definidas estruturas de dissipação de energia em degraus. Estas estruturas visam o encaminhamento do escoamento para os canais de desvio, forçando a passagem do regime rápido (estabelecido a montante) para lento (pretendido nos canais).

Estas estruturas serão construídas em Gabiões-caixa e colchões Reno e o seu dimensionamento foi feito de forma a obter o melhor ajuste ao terreno e, ao mesmo tempo, a garantir a formação do escoamento em quedas sucessivas.

5.5. Restituição do escoamento à albufeira do AHF

A restituição do escoamento das linhas de água à albufeira do AHF localiza-se na pequena portela existente entre os dois morros que limitam, pelo lado este, o vale que vai ser ocupado pela escombreira, onde se admite que as características geológicas permitem que o escoamento seja lançado para a albufeira sem ser necessário recorrer à construção de uma estrutura de dissipação de energia.

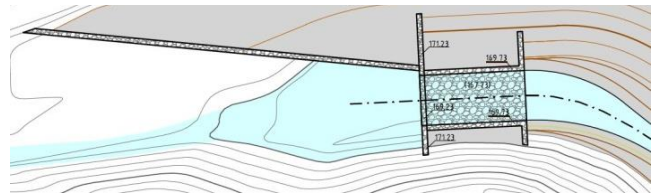


Figura 8. Planta da obra de ligação da Ribeira de Levadoiro ao canal 1.

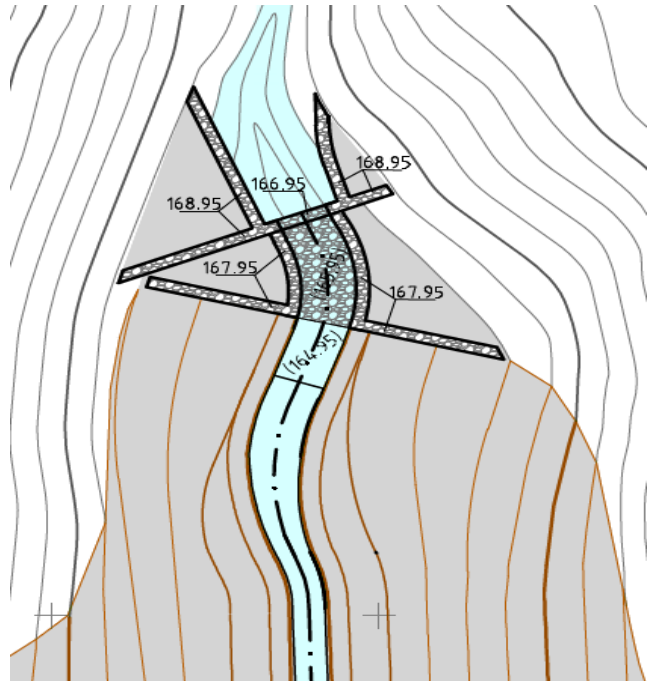


Figura 9. Planta da obra de ligação do Afluente ao canal 2.

O último troço do canal foi então projetado de forma que a secção transversal se vá adaptando à morfologia do terreno nessa zona. Na Figura 10 é possível observar este último troço em planta.

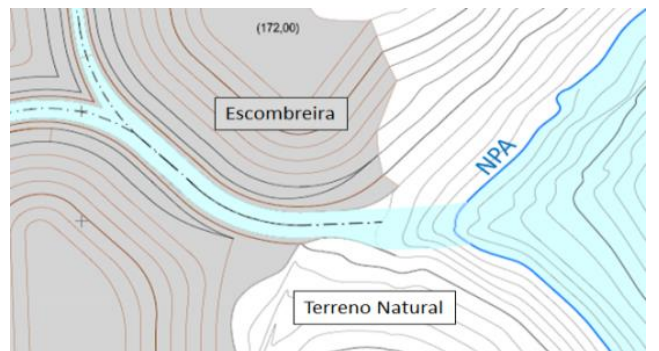


Figura 10. Planta da zona de restituição do escoamento à albufeira.

6. Solução 2

O objetivo da solução 2 é alcançar uma morfologia mais próxima à de um curso de água natural, conseguida através da utilização conjugada de técnicas de engenharia tradicional, técnicas de requalificação fluvial e técnicas de bioengenharia para proteção das margens. Na definição desta solução foi adotado um traçado em planta semelhante ao da primeira, encontrando-se igualmente dividida nos canais 1 e 2 que confluem, a jusante, num só canal (canal 3) e completamente integrada sobre o aterro da escombreira.

6.1. Secções transversais correntes dos canais

À semelhança da solução 1, a forma da secção transversal-tipo adotada nesta solução baseia-se numa secção trapezoidal composta e simétrica.

A solução 2 aproxima-se de um curso de água natural pelo facto de o leito principal ser moldado por caudais mais frequentes (tempo de retorno de 2 anos, em vez de 50 anos), e os leitos de cheia por caudais menos comuns (tempo de retorno de 100 anos). Por razões construtivas e de maximização da capacidade da escombreira, foram definidos leitos de cheia com uma largura de 3.25 m e taludes de ligação à escombreira com uma inclinação de 3H:1V.

O leito principal da secção-tipo dos canais 1, 2 e 3 foi pré-dimensionado por aplicação da equação de Manning (equação 7), considerando os caudais de ponta de cheia calculados para um período de retorno igual a 2 anos.

Para este dimensionamento foram definidos os valores dos seguintes parâmetros:

- Inclinação transversal, i , igual a 0.5%, um valor suficientemente baixo para garantir a ocorrência de regime de escoamento lento, adequado para estes canais;
- Rugosidade de Manning, n , com um valor igual a 0.040 $\text{m}^{-1/3}\text{s}$, escolhido com base nos valores de referência (Lencastre, 1996), considerando um canal sinuoso modelado no terreno, em que o fundo é empedrado com alguma irregularidade, e em que se espera o crescimento de vegetação nos taludes;
- Largura da base da secção transversal, l , em função dos caudais de dimensionamento fixados para cada canal;
- Declive de 2H:1V para as margens, sendo que a situação ideal para aplicação de técnicas de bioengenharia corresponde a margens com declives (m) entre 2H:1V e 3H:1V (Cortes, 2004). Desta forma adotou-se, dentro dos limites da situação ideal, o valor de máxima inclinação de forma a minimizar o volume de escavação associado à construção do canal na escombreira.

No Quadro 10 encontram-se sintetizados os parâmetros admitidos neste dimensionamento, assim como os valores calculados para altura da secção transversal (h) de cada canal.

Quadro 10. Parâmetros de dimensionamento do leito principal dos canais.

Canal	Q (m^3/s)	l (m)	h (m)	n ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)	i (‰)	m
1	7.4	2	1.2			
2	2.2	1	0.8	0.040	0.5	2
3	9.6	3	1.2			

6.2. Modelação do escoamento

À semelhança da solução 1, foi realizada a modelação do escoamento ao longo dos canais de desvio para a Proposta 2, em regime permanente, com recurso ao programa de cálculo automático HEC-RAS, versão 4.1.0.

Os valores das tensões de arrastamento efetivas calculadas nas diversas secções definida ao longo dos 3 canais foram utilizados na definição das características do enrocamento e na escolha dos demais revestimentos de cada canal.

Por uma questão de segurança, foi aplicado o mesmo fator de segurança (F.S.) de 1.5 ao valor máximo das tensões tangenciais efetivas obtidas para o leito principal de cada canal (τ_e), obtendo-se o valor das tensões de segurança (τ_s) utilizadas no dimensionamento e escolha dos revestimentos dos canais.

Atendendo à variação dos valores de tensão tangencial ao longo de uma secção trapezoidal, o valor desta tensão nas margens (τ'_s) foi estimado por aplicação de um fator de correção igual a 0.76 (Chow, 1959) à tensão de segurança no fundo do canal (τ_s).

6.3. Revestimento dos canais

A definição da secção-tipo prevê o revestimento do fundo, margens e leito de cheia através de diferentes técnicas, adequadas às tensões a que cada parte da secção está sujeita. A escolha dos revestimentos teve por base os valores das tensões de arrastamento de segurança para cheias com período de retorno de 100 anos obtidas na modelação do escoamento.

Em primeiro lugar, foi definido o revestimento com enrocamento para o fundo de todos os canais, com base nos valores da tensão de arrastamento de segurança (τ_s) presentes no Quadro 11.

Quadro 11. Tensões de arrastamento efetivas e de segurança e dimensões do enrocamento no fundo do leito principal dos diferentes canais.

Canal	τ_e (N/m^2)	$\tau_s = 1.5 \times \tau_e$ (N/m^2)	d_{50} (mm)
1	80.2	120.3	121
2	34.6	51.8	53
3	102.3	153.5	156

Nas margens dos leitos principais, foi selecionada uma técnica de engenharia natural que não só cumpre os requisitos de resistência às tensões de arrastamento de segurança admitidas nas margens (τ'_s), como permite dotar os taludes de um aspeto completamente natural.

Optou-se, assim, pela utilização de solução com Geocélulas, sendo que a sua estrutura resiste a tensões bastante superiores às tensões de segurança calculadas e é compatível com o preenchimento de terra vegetal, plantação de rizomas e aplicação de hidrossementeira.

Quadro 12. Tensão de arrastamento nas margens dos leitos principais.

Canal	τ_s (N/m^2)	$\tau'_s = 0.76 \times \tau_s$ (N/m^2)
1	120.3	91.5
2	51.8	39.4
3	153.5	116.7

Para os leitos de cheia, previu-se o revestimento com vegetação. Para que tal seja possível, o valor da tensão de arrastamento instalada não deverá ultrapassar os 50 N/m^2 (tensão crítica de arrastamento de canais revestidos com relva raramente imersa segundo Cortes (2004).

Com efeito, verifica-se uma tensão de arrastamento instalada inferior a este valor em quase toda a extensão dos canais onde a sua definição geométrica corresponde à secção-tipo, com exceção de dois troços do canal 1 localizados em zonas onde se aplicam medidas de reabilitação fluvial (ver ponto 6.4.1). Estas zonas correspondem às secções 3.5 (km 0+213) e 4.5 (km 0+278), Figura 11, nas quais foram previstos estrangulamentos das secções do canal 1. No Quadro 13 são apresentadas as tensões de arrastamento obtidas para esses dois troços, assim como as dimensões do enrocamento com que devem ser revestidos.

Quadro 13. Dimensionamento do enrocamento para os leitos de cheia junto às secções 4.5 e 3.5.

Secção	τ'_e (N/m ²)	$\tau'_s = 1.5 \times \tau_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm)
3.5	36.4	54.5	55
4.5	38.4	57.6	58

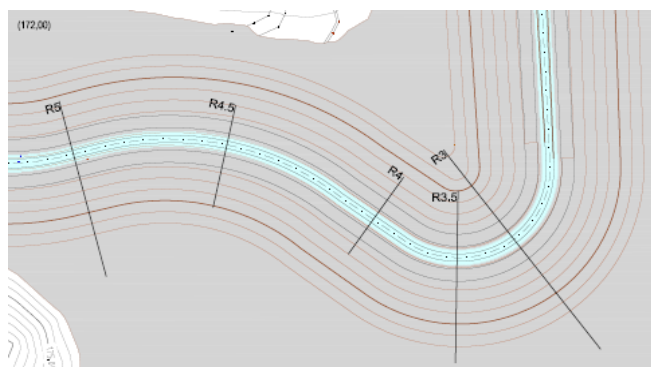


Figura 11. Planta da zona compreendida entre as secções 3.5 e 4.5 do canal 1.

6.4. Aspetos construtivos

Para conferir características de impermeabilização necessárias aos canais de desvio escavados no aterro da escombreira, deverá ser construído um filtro constituído por um geotêxtil e 3 camadas de material inerte com dimensões crescentes em profundidade, à semelhança do que foi definido na solução 1, Figura 12.

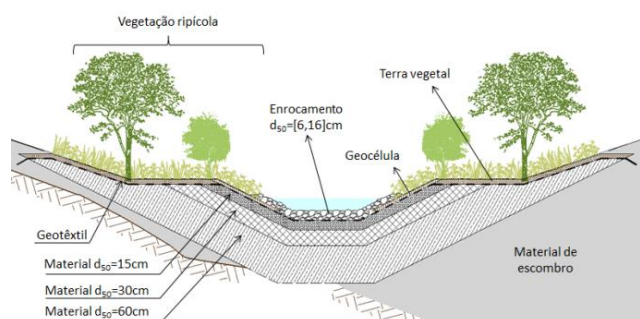


Figura 12. Secção transversal-tipo dos canais (Solução 2).

A aplicação do enrocamento deverá ser estendida um pouco acima da base dos taludes do leito principal.

A Geocélula deverá ser devidamente ancorada, sendo ainda contemplado o seu preenchimento com terra vegetal e rizomas de plantas herbáceas e, posteriormente, a aplicação de hidrossementeira.

O revestimento dos leitos de cheia deve ser feito por colocação de uma camada de terra vegetal com pelo menos 15 cm por cima do geotêxtil, sobre a qual será aplicada hidrossementeira.

6.5. Aplicação de medidas de reabilitação fluvial adicionais

6.5.1. Medidas para aumento da diversidade de habitats no canal

Tendo por base a definição de um canal estável, é possível implementar ações pontuais com o objetivo de acelerar ou complementar a disponibilidade natural de habitat no canal.

Estas medidas irão, assim, criar condições para o estabelecimento de diferentes micro-habitats através de estruturas que promovem a heterogeneidade de parâmetros hidráulicos como velocidade e profundidade. Neste sentido, foram adotadas as seguintes medidas:

- Criação de zonas de rápidos e lentos, através de estrangulamentos e alargamentos da secção, aproveitando as zonas de curvatura do canal. Na Figura 13 e na Figura 14, é possível ver o exemplo de um estrangulamento lateral no canal 1.

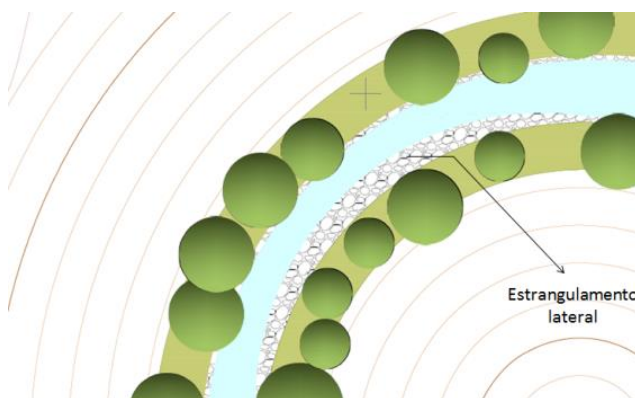


Figura 13. Planta da zona de um estrangulamento lateral no canal 1.

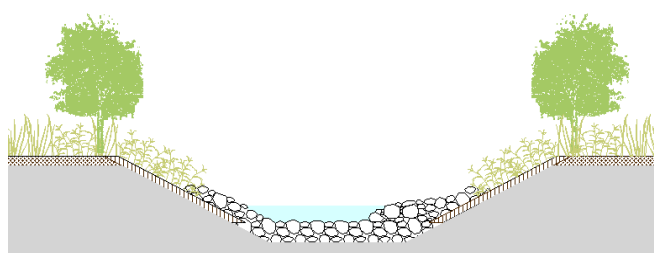


Figura 14. Corte transversal de um estrangulamento lateral no canal 1.

- Colocação de elementos defletores de corrente em séries alternadas, nos troços retilíneos dos canais de desvio 1 e 2. Estes elementos serão materializados por pedras de grandes dimensões colocadas junto às margens, sendo que deverão ter dimensões suficientemente elevadas para se manterem estáveis durante os períodos de cheia mas que não excedam 1/3 da largura da secção (Cortes, 2004) (Figura 15).

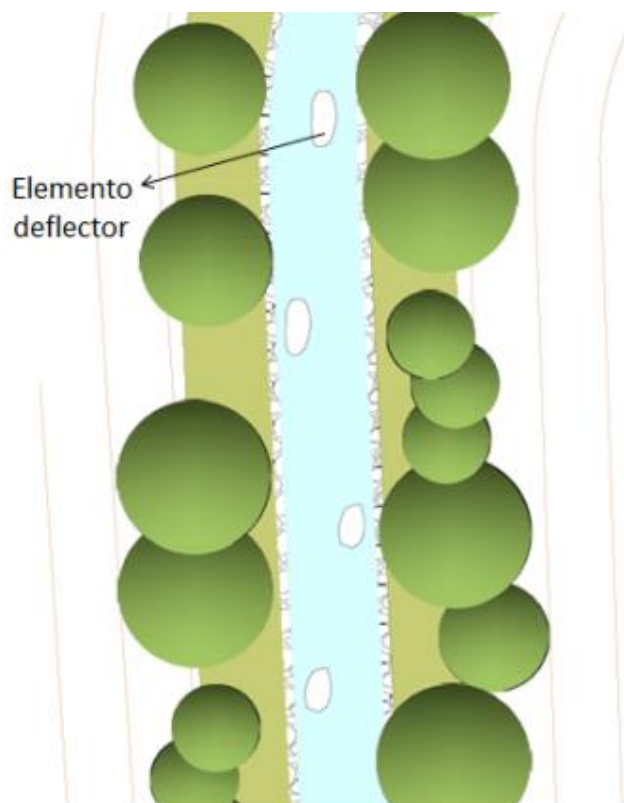


Figura 15. Planta de um troço retilíneo do canal 1 com colocação de elementos defletores alternados.

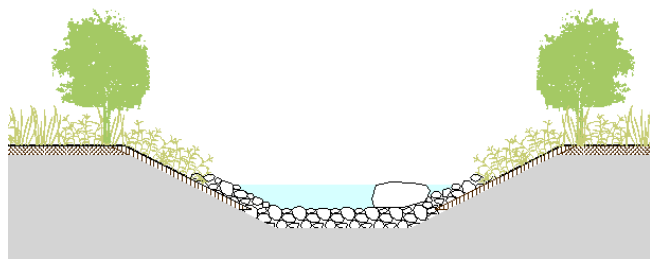


Figura 16. Corte transversal de um elemento deflector.

6.5.2. Implantação de vegetação ripícola

A implantação da vegetação ripícola será feita através da plantação de rizomas e da aplicação de hidrossementeira. Estas técnicas deverão aprovisionar o revestimento pioneiro do solo de prado de sequeiro, composto por espécies herbáceas forrageiras, gramíneas e leguminosas, maioritariamente vivazes, e também a incorporação de algumas espécies arbustivas típicas dos matos da região.

As espécies herbáceas deverão representar em geral, cerca de 95% do peso total da mistura da hidrossementeira, dos quais cerca de 35% serão de leguminosas e cerca de 60% serão de gramíneas. Os restantes 5% serão constituídos por sementes de espécies arbustivas (e também arbóreas se possível).

6.6. Obras de ligação das linhas de água aos canais de desvio

6.6.1. Descrição

As obras de ligação foram definidas de forma a permitir a encaminhamento das linhas de água até aos canais de desvio e a sua integração nos mesmos.

Os canais foram materializados sobre o aterro da escombreira até intercetarem as linhas de água naturais, à cota (166.26) (canal 1 – Figura 17) e (165.00) (canal 2 – Figura 18). O aterro da escombreira foi depois modelado de forma a ajustar-se às encostas naturais, fechando nas mesmas à cota (172.00).

Nas zonas de ligação prevê-se o revestimento dos taludes da escombreira a montante dos canais com enrocamento, sendo que o seu dimensionamento teve em conta os valores das tensões tangenciais calculadas na modelação global do escoamento. Da mesma forma, foi dimensionado o enrocamento que reveste os canais de desvio na zona de ligação.

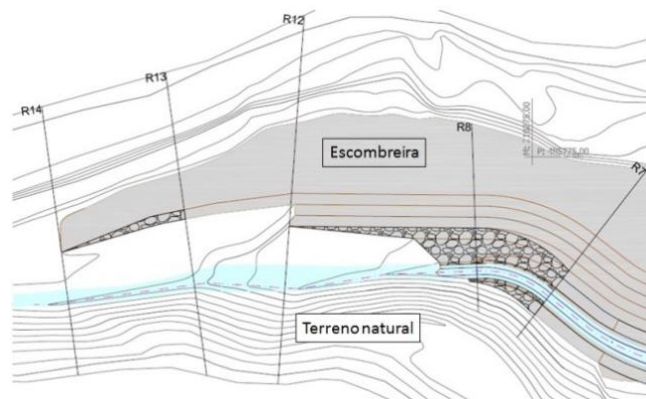


Figura 17. Planta geral da obra de ligação da Ribeira de Levadoiro ao canal 1.

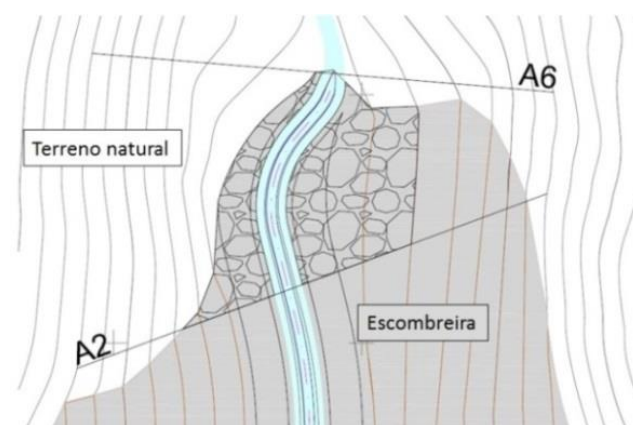


Figura 18. Planta geral da obra de ligação do afluente ao canal 2.

6.6.2. Obra de ligação da Ribeira ao canal 1 - dimensionamento

A zona de ligação da Ribeira de Levadoiro ao canal 1 será protegida por uma camada de enrocamento de grandes dimensões, cujo dimensionamento tem por base os valores das tensões de arrastamento calculadas para esse troço na modelação global do escoamento à frente apresentada.

No Quadro 14 são apresentados os resultados do dimensionamento do enrocamento que revestirá quer os taludes da escombreira ainda a montante da entrada do canal, no troço compreendido entre as secções R14 e R13, quer os taludes da escombreira e o canal de desvio, no troço entre as secções R12 e R7 (Figura 17).

Este revestimento será aplicado até uma altura superior às alturas de água calculadas para as cheias com período de retorno igual a 100 anos.

Quadro 14. Tensões de arrastamento e dimensões do enrocamento na zona de ligação (Canal 1).

Troço	τ_e (N/m ²)	$\tau_s = 1.5 \tau_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm)
R14 - R13	263	394	398
R12 - R7	307	460	465

6.6.3. Obra de ligação do afluente ao canal 2 - dimensionamento

Na zona de ligação do canal 2 ao afluente, foi dimensionado um enrocamento que revestirá os taludes da escombreira e o canal de desvio no troço compreendido entre as secções A6 e A2. À semelhança do troço 1, este revestimento irá aplicar-se até uma altura superior às alturas de água calculadas para as cheias com período de retorno igual a 100 anos, sendo que o seu dimensionamento teve por base os valores das tensões de arrastamento calculadas nestas secções, aquando da modelação global do escoamento, Quadro 15.

Quadro 15. Tensões de arrastamento e dimensões do enrocamento na zona de ligação (Canal 2).

Troço	τ_e (N/m ²)	$\tau_s = 1.5 \tau_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm)
A6 - A2	190	285	288

6.7. Restituição do escoamento à albufeira do AHF

À semelhança do considerado para a Solução 1, a restituição do escoamento das linhas de água à albufeira do AHF foi projetado sem recorrer à construção de uma estrutura de dissipação de energia, Figura 19.

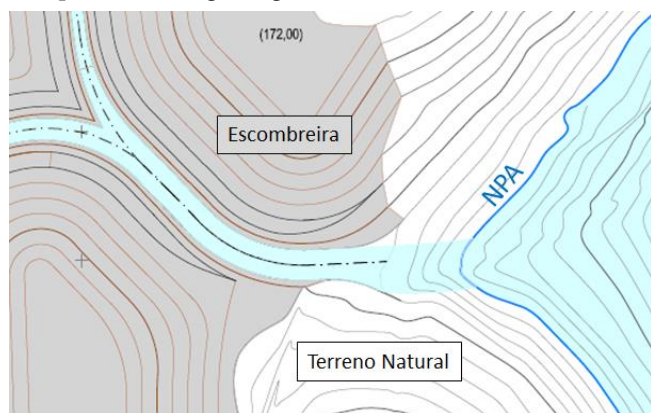


Figura 19. Planta da zona de restituição do escoamento à albufeira.

O troço do canal 3 a montante da restituição do escoamento, será revestido com um enrocamento de grandes dimensões em toda a secção transversal.

Este revestimento foi dimensionado, mais uma vez, com base no valor da tensão de arrastamento instalada, estimada para este troço e os resultados do cálculo são apresentados no Quadro 16.

Quadro 16. Tensões de arrastamento e dimensões do enrocamento no troço 3 (montante).

Canal	τ_e (N/m ²)	$\tau_s = 1.5 \tau_e$ (N/m ²)	d_{50} (mm)
3 (Montante)	300.2	450.4	455

7. Considerações Finais

O objetivo delineado para este trabalho consistiu na definição de soluções naturalizadas para o desvio de duas linhas de água afluentes à albufeira do AHF, que constituíssem soluções alternativas à apresentada para licenciamento pela EDP. Com efeito, dispõe-se agora de duas novas opções, exequíveis e viáveis para este projeto, pelo que se considera que o objetivo foi cumprido com sucesso.

Sendo várias as formas de reabilitação fluvial e, consequentemente, as opções aplicáveis ao desvio e renaturalização destas linhas de água, é importante referir que as soluções apresentadas visaram conjugar o processo de naturalização com as condicionantes associadas ao projeto, garantindo os requisitos de segurança e exequibilidade que lhe estão associados.

A procura de uma solução ecológica e ambientalmente adequada num meio agreste e artificializado constituiu, assim, um desafio de grande interesse, proporcionando o desenvolvimento de várias competências, a nível hidráulico, ambiental, geotécnico e construtivo.

Espera-se que este estudo permita, acima de tudo, abrir caminhos para a conceção de projetos que incorporem preocupações ecológicas, assumindo a minimização do impacto ambiental associado a qualquer construção como uma prioridade e um dever.

O desenvolvimento de soluções naturalizadas e alternativas para o desvio das linhas de água afluentes à albufeira do AHF deverá, no futuro, considerar alguns elementos adicionais com vista ao fortalecimento do processo de naturalização.

Em primeiro lugar, é importante a realização de um estudo hidrológico específico para estas linhas de água, que permita estimar os caudais médios mensais nas mesmas. O conhecimento destes valores possibilitaria a definição de soluções que melhor se ajustem à variação dos caudais e ainda a aplicação de algumas medidas de engenharia natural adicionais.

Igualmente importante seria a caracterização de indicadores de qualidade ecológica associados a estas linhas de água, nomeadamente ao nível de elementos de qualidade biológica, elementos químicos e físico-químicos.

Conhecendo a fauna e flora características, poderão ser implementadas medidas adicionais com vista, por exemplo, à reprodução e sobrevivência de espécies piscícolas locais.

Adicionalmente poderão ser aplicadas técnicas de proteção das margens mais variadas ao longo dos canais, sendo estes divididos num maior número de troços com diferentes revestimentos. Por outro lado, poderá aumentar-se a meandrização dos canais, aproveitando o facto de estes serem construídos em aterro sobre a escombreira, o que confere alguma liberdade ao seu traçado.

Referências

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Blackburn Press.

- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays e L. W. (1988). *Applied Hydrology*. International ed. McGraw Hill Book Company.
- Cortes, R. (2004). *Requalificação de Cursos de Água*.
- Lane, E. W. (1953). *Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by the Bureau of Reclamation*. ASCE. Proceedings / American Society of Civil Engineers, v. 79, separate no. 280.
- Lencastre, A. (1996). *Hidráulica Geral*. ISBN: 972-95859-0-3
- Saraiva, M. (1999). *O Rio como Paisagem: Gestão de Corredores Fluviais no Quadro do Ordenamento do Território*. Fundação Calouste Gulbenkian.