

APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FOZ TUA CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO NO CANAL A JUSANTE

Pedro NEVES PINTO¹; Irene FERNANDES²; José DIAS da SILVA³; Teresa VISEU⁴

RESUMO

O Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua, um dos projetos da responsabilidade da EDP atualmente em construção em Portugal, situa-se no rio Tua, próximo da sua confluência com o rio Douro, e será equipado com dois grupos geradores reversíveis.

Para garantir as adequadas condições de escoamento, principalmente em bombagem a partir da albufeira da barragem da Régua, no rio Douro, verificou-se ser necessário proceder à escavação de um canal no leito do rio Tua entre a zona da restituição da central e a confluência com o rio Douro.

Para definição do referido canal foram conduzidos estudos ao longo das diversas fases do projeto do aproveitamento em causa, tendo-se realizado análises hidrodinâmicas apoiadas em modelos numéricos unidimensionais e bidimensionais, desenvolvidos na EDP, e ensaios em modelo físico reduzido, realizados no LNEC.

Na presente comunicação, após descrição das principais características do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua, são apresentados os pressupostos e critérios considerados nos estudos antes referidos, bem como os principais resultados obtidos nas análises numérica e física realizadas e respetiva análise comparativa.

Palavras-chave: Aproveitamento hidroelétrico, bombagem, canal a jusante, modelação numérica e física de escoamentos.

¹ Engenheiro Civil, EDP Produção, pedro.pinto@edp.pt

² Engenheira Civil, EDP Produção, irene.fernandes@edp.pt

³ Engenheiro Civil, Sub-diretor, EDP Produção, jose.diassilva@edp.pt

⁴ Engenheira Civil, Investigadora Auxiliar, LNEC, tviseu@lnec.pt

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A exploração de um aproveitamento hidroelétrico, no que respeita a escoamentos nos trechos fluviais adjacentes a montante e a jusante, envolve basicamente dois tipos de situações: as associadas a condições hidrológicas normais e as referentes à ocorrência de cheias naturais.

No primeiro caso, há necessidade de analisar as condições de escoamento no rio a jusante do aproveitamento, resultantes da exploração da central, quer em operações de turbinamento, quer em operações de bombagem, tanto em termos do estudo do comportamento transitório associado, como no que se refere à determinação dos níveis correspondentes aos regimes permanentes. Tal análise permite avaliar a capacidade de vazão do canal existente, determinar a evolução no tempo de parâmetros do escoamento, tais como níveis e velocidades médias, em consequência da ocorrência das diversas situações de exploração e possibilitar a avaliação de impactes nas margens, no leito do curso de água, nas estruturas hidráulicas existentes e nas atividades sócio-económicas. Como resultado, é possível determinar a necessidade de realização de obras de regularização e efetuar a sua definição.

No caso de cheias naturais, é fundamental o conhecimento dos níveis na zona de implantação das obras associados ao escoamento dos respetivos caudais, tendo em vista o dimensionamento hidráulico e estrutural dos diferentes elementos constituintes do aproveitamento, bem como a definição das respetivas cotas de proteção, e ao longo da albufeira criada, a determinação dos níveis atingidos de forma a definir as áreas afetadas pela construção das obras de retenção.

As situações mencionadas foram, naturalmente, objeto de análise no âmbito do projeto do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua (AHFT). Face, por um lado, às particulares condições da zona onde se localiza este aproveitamento (no rio Tua, muito próximo da sua confluência com o rio Douro, num troço que se encontra sob influência da albufeira da barragem da Régua), por outro ao facto do mesmo estar dotado com grupos geradores reversíveis, a análise das condições de escoamento associadas à exploração da respetiva central exigiu especial atenção.

1.2 Objetivos dos estudos

A referida análise das condições de escoamento associadas à exploração da central do AHFT envolveu a realização de um vasto conjunto de estudos, englobados em três fases:

- Verificação da adequabilidade da situação pristina sem trabalhos de escavação ou regularização fluvial;
- Dimensionamento técnico e económico da regularização ou escavação a efetuar e elaboração do projeto do canal, compatibilizando-o com as condicionantes técnicas e ambientais;
- Caracterização das condições de escoamento para a solução adotada e eventual ajuste do projeto do canal.

Os estudos desenvolvidos na primeira fase, demonstraram a total inadequabilidade das condições existentes para as operações de bombagem e a necessidade de realizar um canal a jusante através de escavação no leito do rio.

Para o dimensionamento desse canal, a principal premissa foi a necessidade de garantir as condições apropriadas para realizar operações de bombagem, nomeadamente:

- O funcionamento até ao Nível mínimo de exploração da albufeira da Régua ($N_{me_{Régua}}=72,0$), garantindo a utilização de todo o volume disponível abaixo do Nível de Pleno Armazenamento ($NPA_{Régua}=73,5$);
- O arranque em bombagem com nível inicial na albufeira da Régua muito próximo do respetivo N_{me} (foi considerado um valor de mais 10 cm, correspondente a um volume que permite uma operação de bombagem contínua durante cerca de 1 hora até ser atingido o N_{me}).

Nesta fase foram definidas as principais características do escoamento (principalmente níveis médios) de forma a avaliar as perdas de energia para os diferentes regimes de exploração (turbanamento e bombagem) e com elas realizar a otimização e dimensionamento económico do canal.

Definida a geometria deste, foi possível caracterizar com mais detalhe as condições de escoamento resultantes das diversas hipóteses de exploração, não só do AHFT, mas também conjugadas com a exploração da central da Valeira (situada no rio Douro a montante da confluência do rio Tua) e das cotas de exploração da albufeira da Régua. O detalhe exigido nesta fase implicava a definição de campos de velocidades junto às singularidades, nomeadamente junto às estruturas de restituição, curvas do canal, confluência com o rio Douro e passagem em torno dos pilares da ponte ferroviária da linha do Douro.

A análise de escoamentos nos trechos fluviais a jusante do AHFT e a definição das características do canal a escavar no leito do rio, exigiu a simulação de escoamentos quer em regime permanente quer em regime variável. Para tal, desenvolveu-se um modelo numérico unidimensional que permitiu efetuar o dimensionamento do canal a escavar e a caracterização dos níveis médios e velocidades médias nas secções transversais. Nos locais onde a componente transversal do escoamento poderia ter significativa importância, por exemplo junto à restituição da central ou nas proximidades da confluência com o rio Douro e envolvente dos pilares da ponte ferroviária, considerou-se necessário caracterizar o escoamento nas duas componentes horizontais. Recorreu-se, então, a um modelo numérico bidimensional, em conjugação com um modelo físico reduzido construído no LNEC.

Na presente comunicação, após descrição das principais características do AHFT, são apresentados os pressupostos e critérios considerados nos estudos antes referidos, bem como os principais resultados obtidos nas análises numérica e física realizadas e respetiva análise comparativa.

2 APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FOZ TUA

O AHFT foi a primeira concessão atribuída à EDP no âmbito do “Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico”, aprovado em Dezembro de 2007. A sua construção iniciou-se em Abril de 2011 e prevê-se a sua entrada em serviço no segundo semestre de 2016.

O AHFT situa-se no rio Tua, afluente da margem direita do rio Douro, próximo da confluência destes dois rios (Figura 1) sendo o seu projeto constituído pelos seguintes elementos de obra principais (Figura 2):

- Barragem em betão, do tipo abóbada de dupla curvatura, localizada a cerca de 1100 m da referida confluência, na qual estão inseridos um descarregador de cheias de superfície, uma descarga de fundo e um dispositivo para libertação de caudal ecológico;
- Central em poço, equipada com dois grupos geradores reversíveis (turbina-bomba), localizada na margem direita, cerca de 500 m a jusante da barragem, e subestação compacta;
- Circuitos hidráulicos subterrâneos, na margem direita, constituídos por túneis independentes para cada grupo gerador, e canal a jusante escavado no leito do rio Tua.

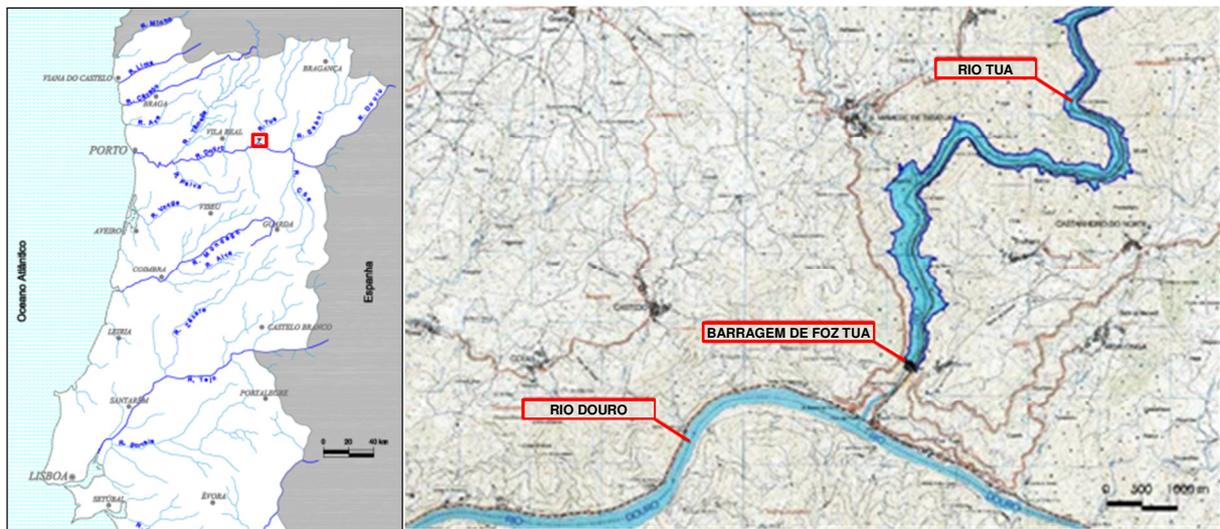


Figura 1. Localização do AHFT.

A barragem domina uma bacia hidrográfica com uma área de 3809 km², sendo os valores médios anuais da precipitação e da afluência, respetivamente 940 mm e 1421 hm³, no período 1958/98. À cota do nível de pleno armazenamento (NPA=170), a albufeira criada inunda uma área de 420,9 ha e armazena um volume total de 106,1 hm³, dos quais cerca de 11 hm³ são utilizados para a exploração normal da central.

A albufeira terá, em condições normais, um regime de exploração entre o NPA e o nível mínimo de exploração, à cota (167,00). O nível mínimo de exploração extraordinário situa-se à cota (162,00).

A barragem, com uma altura máxima teórica de 108 m acima do ponto mais baixo da fundação, tem o coroamento, situado à cota (172,00), com um desenvolvimento de 275 m e uma espessura de 5 m.

Na zona central do coroamento da barragem insere-se o descarregador de cheias, com capacidade máxima de vazão de 5500 m³/s sob o nível de máxima cheia (NMC=171). É constituído por uma estrutura descarregadora, funcionando com superfície livre, e uma bacia de dissipação de energia por impacto localizada no leito do rio, na continuação do soco de fundação da barragem. A estrutura descarregadora está dividida em quatro portadas iguais, com 15,7 m de largura cada, e crista à cota (159,00), dotadas de comportas segmento.

A descarga de fundo tem capacidade máxima de vazão de 200 m³/s e o seu circuito hidráulico, com o eixo à cota (96,55), atravessa o corpo da barragem na prumada do pilar central da zona descarregadora, sendo genericamente constituído por uma conduta metálica

com secção corrente retangular com 2,1 m de largura e 3,1 m, equipada com duas comportas.

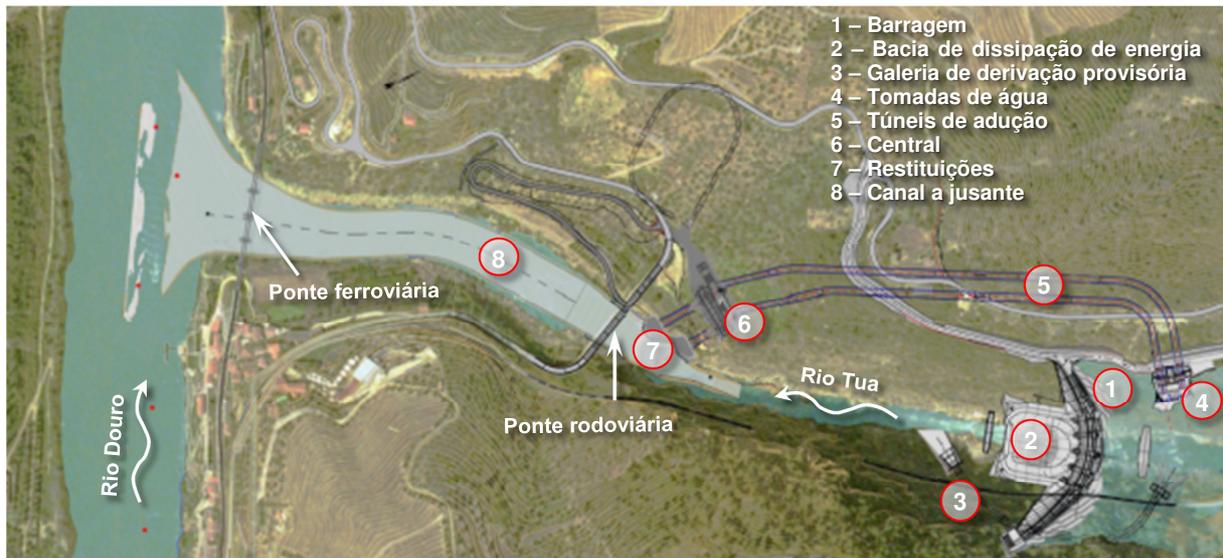


Figura 2. Planta geral do AHFT.

O dispositivo de caudal ecológico, projetado para libertar caudais compreendidos entre $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $10 \text{ m}^3/\text{s}$, encontra-se inserido no pilar extremo do descarregador de cheias (do lado da margem direita) e no corpo da barragem.

A central está equipada com dois grupos turbina-bomba do tipo Francis, de eixo vertical, estando cada grupo dimensionado para um caudal nominal de $155 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma queda estática de 96 m, a que corresponde a potência unitária nominal de 131 MW. O plano médio do distribuidor das turbinas-bomba está posicionado à cota (53,00).

Os grupos turbina-bomba são alimentados por túneis de adução que têm comprimentos totais de aproximadamente 580 m e 630 m. Estes túneis têm inclinação constante e em grande parte da sua extensão são revestidos com betão cofrado e têm secção circular, com diâmetro interior de 7,5 m. A montante da central existem troços blindados com cerca de 70 m de comprimento e diâmetro de 5,5 m. As tomadas de água são estruturas de betão situadas na encosta da albufeira, sensivelmente 100 m a montante da barragem. Estão equipadas com grades, comportas de serviço e comportas ensecadeiras, sendo manobras a partir de estruturas verticais em poço/torre. A jusante dos grupos, cada estrutura de restituição compreende um curto túnel escavado no maciço, poço da comporta e bocal de saída para o rio Tua.

Entre as estruturas de restituição e a confluência com o rio Douro é escavado um canal no leito do rio para garantir adequadas condições de bombagem (Figura 3). Este canal tem sensivelmente 600 m de comprimento, talvegue à cota (68,0) e um perfil tipo trapezoidal com 54 m de rasto. Junto às estruturas de restituição, o canal é aprofundado até à cota (60,5), sendo a transição realizada através de uma rampa. Existe também uma rampa na ligação com o talvegue natural do rio Tua, a montante da restituição. A transição para o rio Douro é conseguida à custa de um alargamento progressivo junto à margem direita do rio Tua, tendo em vista compensar as frações de secção ocupadas pelos pilares e fundações da ponte ferroviária.

Em condições normais, os níveis a jusante na zona da restituição serão os correspondentes aos da exploração da albufeira da barragem da Régua ($NPA_{Régua}=73,5$ e $Nme_{Régua}=72,0$), entre os quais o volume é de cerca de 12 hm^3 . Em condições de cheia na bacia do Douro prevê-se que o nível máximo junto à restituição da central possa atingir a cota (95,00).

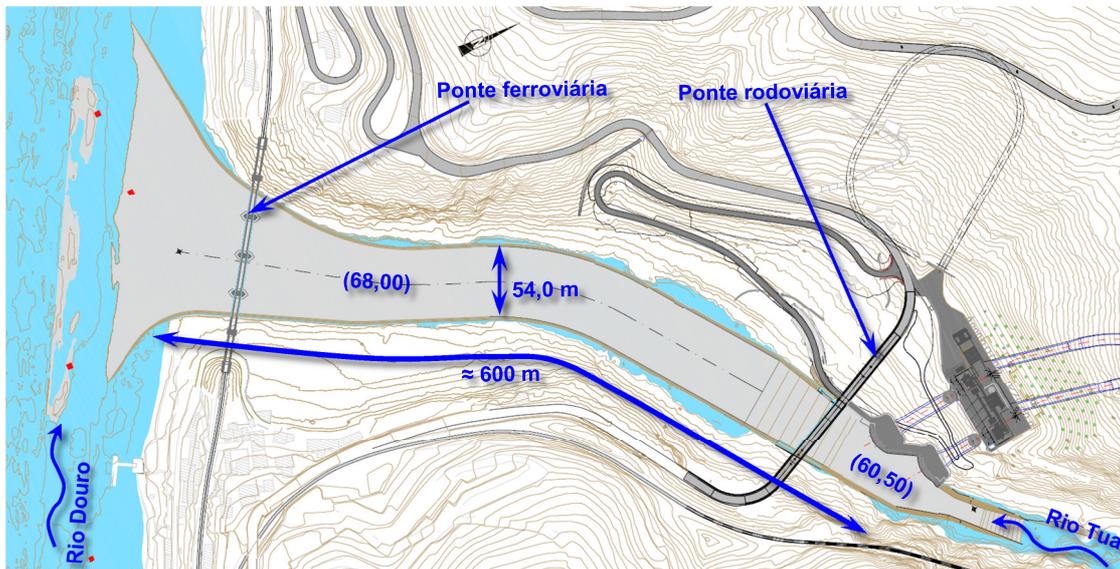


Figura 3. Planta do canal a jusante.

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ESCOAMENTOS

3.1 Modelo Unidimensional

Os estudos dos escoamentos em regime permanente foram efetuados recorrendo a um programa de cálculo automático que realiza a integração numérica da equação diferencial do escoamento gradualmente variado num canal com secção transversal irregular (cálculo da curva de regolfo). Na realidade este programa, realizando o cálculo em regime permanente, corresponde à funcionalidade que permite o cálculo das condições iniciais para as simulações de regimes não permanentes.

O estudo dos regimes de escoamento não permanentes em canais irregulares foi realizado com base num modelo numérico de simulação, do tipo unidimensional, baseado nas equações de Saint-Venant. Neste modelo, o sistema de equações algébricas não lineares constituído pelas equações resultantes da discretização das equações de Saint-Venant e pelas equações fronteira internas e externas é resolvido pelo método de Newton-Raphson, conhecidas que sejam as condições num determinado instante t (para $t=0$, as condições iniciais). Em cada iteração deste método, o sistema de equações lineares correspondente é resolvido recorrendo a uma técnica de duplo varrimento. Este método também é conhecido por método de Preissmann.

Estes modelos foram aplicados ao trecho final do rio Tua, situado entre barragem e a sua confluência com o rio Douro, e ao trecho do rio Douro correspondente à albufeira da barragem da Régua. Os caudais associados à exploração da central do AHFT foram considerados como um hidrograma afluente lateral, que assume valores positivos em situações de turbinamento e valores negativos em situações de bombagem.

Recorrendo ao modelo de regime permanente determinaram-se os níveis atingidos em secções consideradas com interesse mais significativo, para diversas combinações de

caudais afluentes resultantes de exploração das centrais hidroelétricas (futura central de Foz Tua e central existente da Valeira).

Recorrendo ao modelo de regime não permanente foi possível determinar as variações de nível ao longo do trecho estudado, decorrentes de operações (entradas ou saídas de serviço) em turbinamento e em bombagem dos grupos a instalar.

Na Figura 4 representam-se dois dos cenários de operações de arranque em bomba simulados. O primeiro (representado pelas 3 linhas superiores) corresponde a um arranque sequencial dos dois grupos do AHFT com um nível inicial na albufeira da Régua igual ao NPA=73,5 e sem qualquer outra afluência ao sistema.

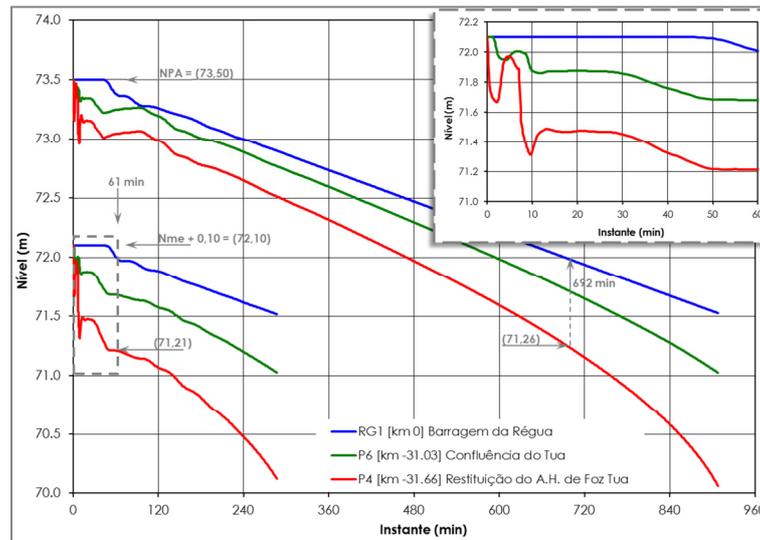


Figura 4. Modelo unidimensional. Arranques em bombagem. Variação de níveis no tempo.

Verifica-se que é possível utilizar em bombagem todo o volume armazenado entre o NPA=73,5 e o Nme=72,0 da albufeira da Régua garantindo, até ser atingido o nível mínimo junto à barragem da Régua, uma exploração contínua em bombagem de cerca de 11,5 horas (692 minutos). O segundo cenário (representado pelas 3 linhas inferiores e pelo seu pormenor de 60 minutos, no canto superior direito) corresponde a um arranque sequencial dos dois grupos do AHFT com um nível inicial na albufeira da Régua igual ao Nme+0,1=72,1 e sem qualquer outra afluência ao sistema. Como antes referido, considerou-se que o nível mínimo para o qual ainda se admite um arranque em bombagem, é um pouco superior (neste caso 10 cm) ao Nme de modo a permitir uma operação de bombagem contínua durante cerca de 1 hora até ser atingido o Nme na Régua.

Estando garantida a capacidade de alimentação proporcionada pelo canal escavado no leito do rio Tua para as situações de bombagem requeridas, procedeu-se à verificação do funcionamento (especialmente em relação à submergência) das restituições (quando funcionam como tomadas de água em bombagem) para os dois níveis mínimos definidos junto a esta estrutura, (71,26) e (71,21).

3.2 Modelo bidimensional

Para a simulação bidimensional utilizou-se o programa de cálculo variável Quad2D, desenvolvido pelo Grupo de Hidrodinâmica Computacional de la Universidad de Zaragoza e

comercializado pela empresa Inclam, S.L.. O princípio geral do modelo bidimensional é o de que se supõe que o escoamento pode ser descrito matematicamente pelos princípios de conservação da massa e pela segunda lei de Newton em duas direções horizontais. Em termos matemáticos adota-se a forma de equações em derivadas parciais, tratando-se de um sistema hiperbólico não linear de leis de conservação.

Esta aproximação tem associadas uma série de hipóteses que definem o modelo matemático de águas pouco profundas. Este modelo de escoamento tem por princípio que a altura da água é pequena quando comparada com a escala horizontal típica. As hipóteses fundamentais do modelo são as seguintes:

- As ondas que se produzem na superfície variam gradualmente;
- As perdas de energia por atrito em escoamento transitório não diferem muito das perdas por atrito em escoamento permanente, podendo o modelo de perdas ser representado por este último;
- O declive do fundo é pequeno e pode ser representado, aproximadamente, pelo valor do ângulo.

O sistema de equações resultante é resolvido por um método numérico de volumes finitos, permitindo obter resultados tanto em escoamentos lentos, como em rápidos ou transcíticos.

A base topográfica é inserida no modelo Quad2D com o formato de malha quadrada do tipo Grid Ascii da ESRI, e pode ser triangulada internamente, impondo-se a dimensão máxima do lado do triângulo e um erro máximo em cota.

Dada a geometria da confluência do rio Tua no rio Douro, e a existência na mesma da ponte ferroviária da linha do Douro, considerou-se conveniente, logo na fase de projeto do AHFT, realizar um estudo das condições de escoamento, não só com um modelo unidimensional, mas também recorrendo a um modelo bidimensional de modo a permitir detetar eventuais assimetrias do escoamento junto a esta confluência e prever eventuais ajustes na geometria das obras de regularização/escavação a realizar.

No entanto, já no início do Projeto de Execução, verificou-se ser necessário alterar as intervenções previstas para a proteção das fundações da ponte ferroviária existente na foz do rio Tua, as quais implicaram um constrangimento na secção de escoamento superior ao inicialmente previsto. Levantavam-se dúvidas sobre o impacto que a nova geometria teria sobre o escoamento em torno dos pilares da ponte ferroviária e sobre a inserção do escoamento do rio Tua no rio Douro (em situações de turbinamento ou de aflúncias naturais) ou sobre a chamada do caudal a partir do rio Douro (em situações de bombagem). De modo a dissipar quaisquer dúvidas relativamente ao desempenho da nova geometria, foi desenvolvido um novo modelo bidimensional relativo à zona envolvente da ponte ferroviária.

Os novos estudos de Hidráulica Fluvial então realizados incidiram sobre o seguinte sistema:

- O trecho final do rio Tua iniciando-se, sensivelmente, cerca de 200 m a montante da referida ponte ferroviária;
- Trecho do rio Douro com cerca de 750 m de extensão, dos quais aproximadamente 350 m a montante da foz do rio Tua e os restantes 400 m a jusante.

Com efeito, considerou-se que não havia influência das alterações realizadas na zona da confluência do rio Tua em trechos mais a montante, como por exemplo junto à restituição da central do AHFT. Desta forma, não se comprometendo a validade dos resultados e das condições de simulação junto ao local de interesse, foi possível aumentar a precisão da

discretização, com células de cálculo mais pequenas, refletindo melhor a geometria, e tempos de cálculo inferiores.

Nas simulações com o canal natural foram consideradas três condições fronteira:

- De montante, correspondente à afluência do rio Douro a partir da barragem da Valeira;
- De montante, correspondente à afluência a partir do rio Tua;
- De jusante, tendo em conta as curvas de vazão em regime permanente para os dois níveis de exploração da albufeira da Régua (NPA = 73,50 e Nme = 72,00).

Foi criada uma grelha de pontos, quadrada, com 0,5 metro de lado, desde o ponto mais baixo do sistema até à cota máxima de (80,0), abrangendo uma área do retângulo envolvente com 330336 m² (744x444), que tem uma área 200500 m² com informação topográfica, correspondendo assim a 802000 células quadradas com 0,25 m² de área (0,5 m de lado). O sistema modelado, ao ser triangulado, transforma-se num sistema com cerca de 1 000 000 de triângulos.

O sistema descrito está ilustrado na Figura 5. Na mesma figura estão representados os pontos e perfis que serviram de referência para a apresentação de resultados obtidos por modelação numérica e comparação dos mesmos com os do modelo físico, no caso dos cenários indicados.

Foz Tua		Valeira	Régua		Fronteira de jusante	Cenário
Q _{Tua} [m ³ /s]	Modo Turbina Bomba	Q _{Valeira} [m ³ /s]	Z _{Régua} [m]	Q _{Régua} [m ³ /s]	Z _{Jusante} [m]	nº
310	✓	0	73.5	310	73.61	3
-278		✓	73.5	-278	73.37	7
310	✓	0	72	310	72.23	10
-278		✓	72	-278	71.83	14
-278		✓	73.5	78	73.50	16
-278		✓	73.5	434	73.71	17
-278		✓	73.5	790	74.13	18
310	✓	356	73.5	666	73.96	24
310	✓	712	73.5	1022	74.43	25
310	✓	1068	73.5	1378	74.82	26
310	✓	356	72	666	72.85	28
310	✓	712	72	1022	73.59	29
310	✓	1068	72	1378	74.33	30
-		356	73.5	356	73.65	88
-		712	73.5	712	74.02	89
-		1068	73.5	1068	74.48	90
-		356	72	356	72.30	91
-		712	72	712	72.94	92
-		1068	72	1068	73.68	93

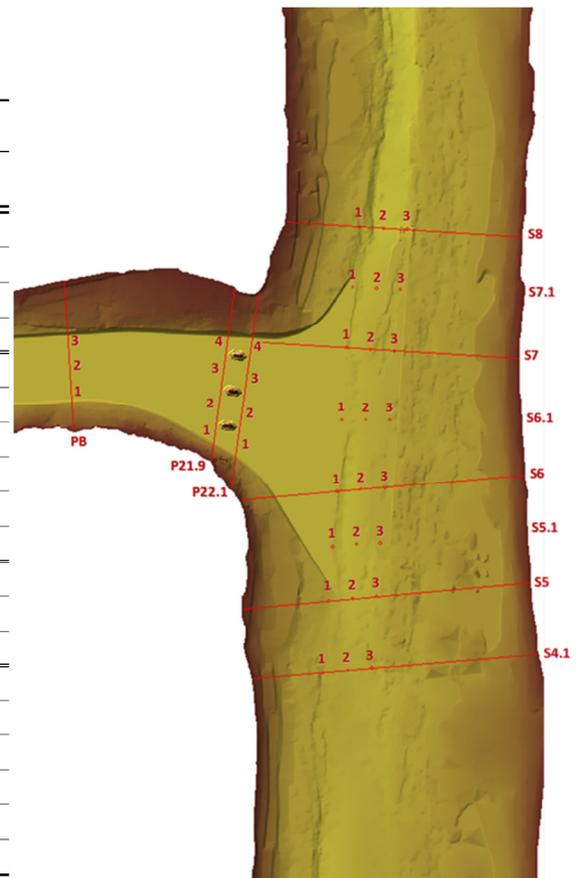


Figura 5. Modelo bidimensional. Sistema simulado. Cenários analisados.

Na Figura 6 apresenta-se um exemplo típico dos resultados obtidos por aplicação do modelo numérico, correspondendo à representação em planta das velocidades de escoamento relativo ao cenário 14, ou seja, bombagem no AHFT para o nível mais baixo na albufeira da

Régua, sem quaisquer outras afluições. As tonalidades de azul, representam a profundidade de escoamento, as setas correspondem aos vetores de velocidades e são também apresentados valores das velocidades pontuais obtidas com o modelo numérico e nos ensaios em modelo reduzido.

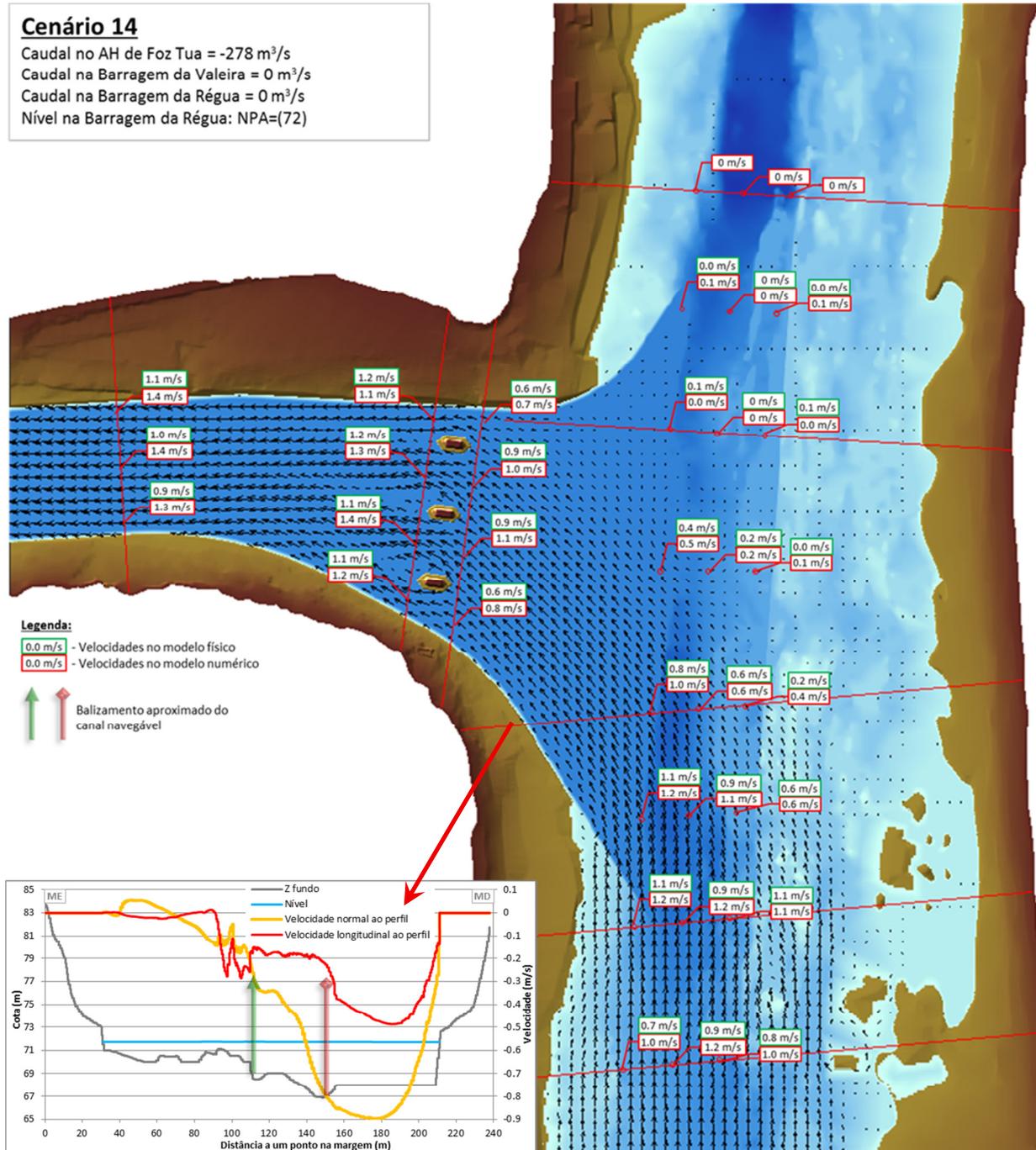


Figura 6. Modelo bidimensional. Cenário de bombagem. Resultados da simulação.

4 ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO

4.1 Objetivos dos ensaios em modelo reduzido

Na sequência dos estudos desenvolvidos pela EDP na fase de projeto, foi decidido realizar ensaios em modelo reduzido de diversos órgãos hidráulicos do AHFT, os quais decorreram no LNEC durante os anos de 2012 e 2013.

Tais ensaios envolveram a análise do comportamento das tomadas de água e restituições e trechos adjacentes dos circuitos hidráulicos, do descarregador de cheias e bacia de dissipação de energia, do trecho fluvial a jusante desta, do canal a jusante das restituições até à confluência com o rio Douro e de um trecho contíguo do rio Douro. Foram simuladas quer cheias naturais de diversa magnitude, associadas a diferentes contributos do rio Tua e do rio Douro, quer diversos cenários de exploração em turbinamento e em bombagem do AHFT, para diferentes níveis na albufeira da Régua e caudais turbinados na Valeira.

Na presente comunicação são apenas referidos os ensaios que tiveram como objetivo permitir a análise das condições do escoamento resultante da operação da central do AHFT, tanto em turbinamento como em bombagem.

4.2 Descrição do modelo físico reduzido e restantes instalações

O modelo reduzido do AHFT, ilustrado pela Figura 7, foi construído à escala 1/65,79. Este modelo reproduz a barragem e os dois circuitos hidráulicos de produção de energia, incluindo as tomadas de água, na albufeira do Tua, e a estrutura de restituição da central (Figura 7 a) e b)).



Figura 7. Modelo reduzido de Foz Tua. a) vista da barragem de montante para jusante; b) restituições; c) pormenor da confluência dos rios Tua e Douro.

No modelo foram, igualmente, reproduzidos um trecho do rio Tua entre a barragem e a confluência com o Douro (trecho no qual existem duas pontes, uma rodoviária e outra ferroviária) e um troço do rio Douro com 500 m de extensão que compreende a secção da confluência. Nestes trechos foram medidas velocidades por forma a caracterizar as condições do escoamento.

4.3 Principais ensaios realizados

Foram realizados ensaios representativos de cenários de exploração da central do AHFT em conjunto com a exploração dos aproveitamentos existentes a montante e a jusante no curso do rio Douro. Em particular, foram analisadas, para diferentes situações de turbinamento na barragem da Valeira, as condições do escoamento resultante da operação da central do AHFT, tanto em turbinamento como em bombagem, no troço do rio Tua, a jusante da restituição desta central, e no rio Douro, na zona da confluência. Foram ainda considerados os dois níveis característicos de exploração da albufeira da barragem da Régua, $N_{me} = 72,0$ e $N_{PA} = 73,5$.

Os ensaios realizados podem ser subdivididos em três conjuntos:

- os do primeiro conjunto podem ser considerados representativos da situação de referência, ou seja, aquela em que não existe a influência do AHFT, tendo sido simuladas condições de escoamento proveniente do aproveitamento da Valeira para diversas situações do funcionamento dos respetivos grupos, sem aflúncias do rio Tua;
- os do segundo conjunto referem-se a situações decorrentes da exploração em turbinamento dos dois grupos do AHFT, considerando o funcionamento simultâneo desses grupos ($Q_{Tua} = 310 \text{ m}^3/\text{s}$) com a existência de aflúncias do rio Douro correspondentes ao funcionamento dos grupos do aproveitamento da Valeira;
- os do terceiro conjunto referem-se a situações decorrentes da exploração em bombagem dos dois grupos do AHFT. Foi considerado o funcionamento simultâneo destes grupos ($Q_{Tua} = -278 \text{ m}^3/\text{s}$) com a existência de aflúncias do rio Douro correspondentes ao funcionamento dos grupos do aproveitamento da Valeira, em condições idênticas às consideradas para os ensaios em turbinamento.

4.4 Principais resultados

4.4.1 Ensaio na situação de referência

O primeiro conjunto de ensaios refere-se a situações de escoamento sem influência do AHFT, ou seja, sem aflúncias do rio Tua ($Q_{Tua} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$). Neste caso realizaram-se os ensaios considerando aflúncias do rio Douro correspondentes ao funcionamento do aproveitamento da Valeira com 1, 2 e 3 grupos, a que correspondem os valores de $356 \text{ m}^3/\text{s}$, $712 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1068 \text{ m}^3/\text{s}$, respetivamente.

Concluiu-se que as velocidades são muito uniformes e bem distribuídas, com valores no rio Douro, a seguir à confluência do rio Tua, variando entre $1,39 \text{ m/s}$ ($Q_{Valeira}=356 \text{ m}^3/\text{s}$) e $2,32 \text{ m/s}$ ($Q_{Valeira}=1068 \text{ m}^3/\text{s}$), para um nível da albufeira da Régua igual ao N_{me} . Para o N_{PA} , estes valores variam entre $0,57 \text{ m/s}$ e $1,78 \text{ m/s}$, respetivamente. De assinalar que nestas situações, em que não há contribuição do rio Tua, qualquer que seja o cenário de turbinamento no aproveitamento da Valeira, as velocidades no rio Douro a jusante da

confluência com aquele rio são sempre superiores às que se verificam a montante da mesma. Tal aumento de velocidade, justificado pela configuração topográfica do vale do rio Douro na zona, diminui naturalmente em valores absolutos e percentuais com a subida dos níveis no rio Douro associados à exploração do aproveitamento da Régua entre o Nme e o NPA.

4.4.2 Ensaios em modo de turbinamento

O segundo conjunto de ensaios refere-se a situações decorrentes da exploração em turbinamento dos grupos do AHFT ($Q_{Tua} = 310 \text{ m}^3/\text{s}$), em duas situações: i) considerando aflúências nulas no rio Douro e ii) considerando as aflúências no rio Douro correspondentes ao funcionamento do aproveitamento da Valeira (1, 2 ou 3 grupos respetivamente).

Para o cenário extremo fora do período de cheias, ou seja turbinamento em simultâneo dos dois grupos do AHFT e dos três grupos da Valeira, verifica-se que apesar do caudal sofrer um incremento de 29% (passando de $1068 \text{ m}^3/\text{s}$ (3 grupos do aproveitamento da Valeira sem AHFT, que corresponde à situação de referência) para $1378 \text{ m}^3/\text{s}$ (3 grupos do aproveitamento da Valeira mais AHFT)), as velocidades a jusante da confluência apresentam valores da mesma ordem de grandeza, sofrendo um incremento máximo de apenas cerca de 9%.

No caso da situação mais gravosa, em que os caudais a jusante da confluência sofrem um incremento de 87% (passando de $356 \text{ m}^3/\text{s}$ associado a 1 grupo do aproveitamento da Valeira, sem AHFT, que corresponde à situação de referência) para $666 \text{ m}^3/\text{s}$ (associado a 1 grupo do aproveitamento da Valeira mais AHFT), as velocidades na mesma zona, apesar de sofrerem um incremento significativo (aumentam de $0,57 \text{ m/s}$ para $1,1 \text{ m/s}$), continuam a apresentar valores máximos reduzidos.

4.4.3 Ensaios em modo de bombagem

Neste caso realizaram-se os ensaios decorrentes da exploração em bombagem dos dois grupos do AHFT ($Q_{Tua} = -278 \text{ m}^3/\text{s}$) em duas situações: i) considerando aflúências nulas no rio Douro e ii) considerando as aflúências no rio Douro correspondentes ao funcionamento do aproveitamento da Valeira (1, 2 ou 3 grupos respetivamente). No primeiro caso, verificou-se que ocorrem velocidades na zona da confluência orientadas no sentido contrário ao que acontece atualmente (jusante/montante), mas estas apresentam valores muito baixos (da ordem de $0,5 \text{ m/s}$). No segundo caso, a situação da existência do aproveitamento contribui para a melhoria das condições do escoamento na zona da confluência porque, sendo parte das aflúências do rio Douro absorvidas pelo rio Tua, o caudal que progride para jusante da confluência é inferior e, conseqüentemente, as velocidades de escoamento são inferiores às que se registavam previamente à existência do AHFT.

5 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM MODELO FÍSICO E DOS ESTUDOS COM MODELOS NUMÉRICOS

Para levar a cabo esta comparação foram escolhidas situações características dos diversos tipos de funcionamento, nomeadamente as seguintes:

- Cenário 26, representativo do funcionamento em turbinamento dos dois grupos da central do AHFT com os três grupos do aproveitamento da Valeira (1068 m³/s), que constitui o cenário extremo fora do período de cheias;
- Cenário 16, representativo do funcionamento em bombagem dos dois grupos da central do AHFT com alimentação essencialmente proveniente do aproveitamento da Valeira com um grupo em funcionamento (356 m³/s);
- Cenário 14, representativo do funcionamento em bombagem dos dois grupos da central do AHFT com alimentação essencialmente da albufeira Régua à cota (72,0).

Foi, ainda, escolhido o Cenário 90 como referência, por estar associado a uma situação frequente do funcionamento atual: os três grupos do aproveitamento da Valeira, correspondendo a um caudal no Douro igual a 1068 m³/s, sem afluições do rio Tua.

No Quadro 1 apresenta-se um resumo desta análise comparativa.

Quadro 1. Comparação dos valores de velocidade para os cenários 26, 14 e 16.

Cenário	Perfil	Velocidade		Cenário	Velocidade		Cenário	Velocidade	
		Modelo Reduzido (m/s)	Modelo Numérico (m/s)		Modelo Reduzido (m/s)	Modelo Numérico (m/s)		Modelo Reduzido (m/s)	Modelo Numérico (m/s)
26				14			16		
Turbinamento	P4,1	1,9	1,8	Bombagem	-0,8	-1,1	Bombagem	0,2	0,2
	P5	1,9	1,8		-1,0	-1,2		0,3	0,3
	P5.1	1,7	1,6		-0,8	-1,0		0,2	0,2
	P6	1,6	1,6		-0,6	-0,7		0,1	0,1
	P6.1	1,6	1,5		-0,2	-0,3		0,5	0,3
	P7	1,8	1,5		-0,1	0,0		0,6	0,6
	P7.1	1,7	1,6		0,0	0,0		0,5	0,9
	P22.1	0,5	0,6		-0,8	-0,9		-0,5	-0,5
	P21.9	0,5	0,8		-1,2	-1,3		-0,7	-0,8

A análise comparativa realizada permitiu confirmar que existe uma concordância assinalável entre os valores das velocidades do escoamento calculados pelo modelo numérico e os medidos no modelo reduzido, nos diversos modos de funcionamento do AHFT, tanto no rio Tua a jusante da restituição da central, como no rio Douro, a montante e a jusante da confluência.

Além disso, foi possível constatar que os campos de velocidades experimentais e numéricos são muito semelhantes para todos os cenários considerados.

6 CONCLUSÕES

Foram realizados estudos que envolveram a simulação numérica de escoamentos no canal a jusante da restituição do AHFT e na zona da confluência do rio Tua com o rio Douro, recorrendo a modelos numéricos unidimensionais e bidimensionais. Esses estudos foram acompanhados pela realização de ensaios em modelo reduzido desenvolvidos no LNEC.

Foram efetuadas simulações de cenários de exploração da central do AHFT conjugada com a exploração dos aproveitamentos existentes a montante (Valeira) e a jusante (Régua) no curso do rio Douro. Os cenários simulados consideram-se representativos dos extremos que podem ocorrer para situações de operação regular. Em particular, foram analisadas, para diferentes situações de turbinamento na barragem da Valeira, as condições do escoamento resultante da operação da central do AHFT, tanto em turbinamento como em bombagem, no troço do rio Tua a jusante da restituição desta central, e no rio Douro, na zona da confluência.

As comparações entre os resultados do modelo reduzido, realizadas no LNEC, e os resultados das simulações numéricas, realizadas pela EDP, permitiram concluir que, em termos globais, o comportamento do escoamento é semelhante no modelo reduzido e no modelo numérico, reproduzindo este último, com rigor significativo, as velocidades do escoamento e os padrões de campos de velocidades nos diversos modos de funcionamento do AHFT, tanto no rio Tua a jusante da restituição da central, como no rio Douro a montante e a jusante da confluência.

Os resultados obtidos revelam, de uma forma geral, um bom aproveitamento da totalidade da secção disponível para o escoamento, com distribuição de velocidades bastante uniforme em todas as secções do trecho analisado, quer nas operações de turbinamento, quer de bombagem do AHFT.

Mais especificamente, assinalam-se os seguintes aspetos:

- Na secção da ponte ferroviária, a distribuição de velocidades é bastante homogénea, quer em situações de turbinamento quer em situações de bombagem, não se tendo detetado velocidades médias consideradas elevadas;
- Na zona do canal de navegação, verificam-se distribuições de velocidades homogéneas e com direção predominantemente longitudinal. A componente lateral da velocidade apresenta, de uma forma geral, valores reduzidos (os máximos são da ordem de 0,5 m/s, verificando-se apenas para cenários pouco frequentes);
- Relativamente à situação pristina ou de referência (isto é, antes da entrada em funcionamento do AHFT), os acréscimos da velocidade de escoamento no rio Douro a jusante da confluência do rio Tua só têm significado percentual nos cenários em que os valores de referência são baixos. Nos restantes cenários tal acréscimo percentual é reduzido.