



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

ENSAIOS HIDRÁULICOS EM MODELO FÍSICO DE UMA CÂMARA DE VÓRTICE

O caso da Av. Almirante Reis, Lisboa

João Nuno FERNANDES¹; Ricardo JÓNATAS²; António MURALHA³

¹ Bolseiro de pós-doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, jnfernandes@lnec.pt, 21 844 3772

² Bolseiro de experimentação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, rjonatas@lnec.pt, 21 844 3944

³ Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, amuralha@lnec.pt, 21 844 3442

Resumo

No presente trabalho apresentam-se os principais resultados obtidos através da realização de ensaios hidráulicos, em modelo reduzido, de uma câmara de vórtice projetada para ligação ao túnel de Monsanto – Sta. Apolónia do Plano Geral de Drenagem de Lisboa.

O túnel terá uma secção circular com diâmetro interno de 5 500 mm. A câmara de vórtice, localizada na Av. Almirante Reis, tem como objetivo conduzir o escoamento da bacia associada a essa zona da cidade para o túnel geral. A câmara de vórtice servirá para fazer a passagem da entrada à cota (20,06) para a saída à cota (6,08). O desvio do caudal é feito através de uma estrutura em “vórtice” sendo o desnível altimétrico vencido através de uma queda do escoamento sobre uma câmara de dissipação localizada a um nível inferior.

O modelo foi construído no pavilhão de Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) à escala 1:11,57 e compreende (i) o canal de entrada; (ii) a câmara de vórtice; (iii) a câmara de dissipação (iv) a conduta de equilíbrio e (v) a conduta de jusante.

Nesta comunicação apresentam-se, para os vários caudais ensaiados, os resultados obtidos, nomeadamente, as alturas e velocidades de escoamento e os valores das pressões na soleira da câmara de vórtice.

Palavras-chave: Câmara de vórtice, Plano geral de drenagem de Lisboa, Modelação física.

Tema: 3 - Hidrologia, hidráulica fluvial e obras hidráulicas e 7 - Serviços de abastecimento, drenagem e tratamento de águas.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do Plano Geral de Drenagem de Lisboa prevê-se a construção de um túnel de Monsanto a Sta. Apolónia que atravessará parte da cidade de Lisboa. Tratar-se-á de um túnel de secção circular com diâmetro interno de 5 500 mm. A entrega de caudais da bacia que compreende a Av. Almirante Reis será efetuada através de uma câmara de vórtice que tem como objetivo conduzir o escoamento da bacia associada a essa zona da cidade para o túnel e dissipar a energia devida à velocidade do escoamento e ao desnível entre o coletor pluvial e o túnel.

Essa ligação será efetuada através de uma estrutura em “vórtice” sendo o desnível altimétrico vencido através de uma queda do escoamento sobre uma câmara de dissipação a um nível inferior. Tendo em conta o estado da arte do tipo de solução projetada, foi construído um modelo físico no pavilhão de Estruturas Hidráulicas do LNEC à escala 1:11,57 recorrendo às técnicas geralmente utilizadas, à utilização do acrílico para observação do escoamento e à impressão 3D da peça da soleira em “vórtice”.

Na presente comunicação apresentam-se os resultados dos ensaios efetuados, nomeadamente a caracterização do escoamento, para vários caudais, no canal de entrada, na estrutura em vórtice e na bacia de dissipação.

2. OBJETIVOS E ENSAIOS REALIZADOS

Na presente comunicação apresenta-se o comportamento geral do escoamento com as formas de projeto. É efetuada uma avaliação dos ensaios no modelo físico, sendo apresentadas uma análise quantitativa e uma análise qualitativa.

Na análise qualitativa analisam-se caudais crescentes de 1 em 1 m³/s para o intervalo de caudais entre 10 a 15 m³/s. As principais características do escoamento e pequenas particularidades são registadas.

Na análise quantitativa, são analisados os caudais 5,0; 10,1; 14,2; 15,1 e 19,0 m³/s nomeadamente: (i) as alturas de escoamento no canal de entrada; (ii) as alturas de escoamento no extradorso da voluta da câmara de vórtice; (iii) as alturas de escoamento na câmara de vórtice; (iv) as velocidades de escoamento na voluta da câmara de vórtice; (v) as pressões do escoamento na soleira da voluta; (vi) as alturas e pressões do escoamento na câmara de dissipação; e (vii) as alturas de escoamento na conduta de jusante.

3. MODELO FÍSICO

3.1 Descrição geral do modelo físico

O modelo físico inclui o canal de entrada de caudal, a zona da queda ou câmara de vórtice (incluindo a voluta), a câmara de dissipação com a conduta de equilíbrio e a conduta de

jusante (cf. Figura 1a) O modelo físico foi construído, sem distorção, à escala geométrica de 1/11.57. No tipo de escoamento em análise, as forças predominantes são as de inércia e de gravidade. Todos os ensaios serão conduzidos de maneira a garantir que a semelhança dinâmica seja satisfeita com base na semelhança de *Froude*.

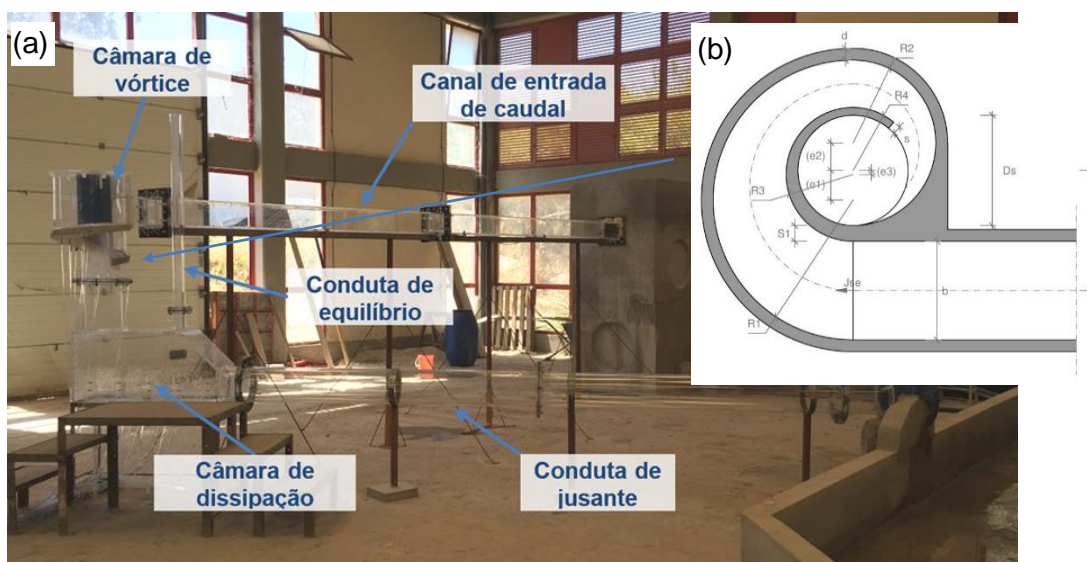


Figura 1. (a) Vista geral do modelo físico e (b) geometria da voluta (adaptada de Hager 1999)

Por forma a possibilitar a visualização do escoamento, sempre que possível foi utilizado acrílico transparente na construção das peças. Pela sua complexa geometria, o elemento mais difícil de implementar no modelo físico foi a voluta. Na Figura 1(b) são apresentadas as principais variáveis geométricas desse elemento. A soleira desta componente foi efetuada através de técnicas em impressão 3D e posteriormente incluída na conduta vertical. LNEC (2017) apresenta a descrição completa do modelo.

3.2 Equipamento e métodos de medição

Os caudais foram medidos através de caudalímetros electromagnéticos (Altometer, SC100AS) com diâmetro de 350 mm com um erro de medida global inferior a 0,5%. As pressões médias ao longo da fronteira do escoamento foram medidas através de piezómetros ligados a um manómetro multitubular com um erro de medida correspondente a 1 mm de coluna de água.

Os principais resultados (e.g. andamento da superfície livre) são apresentados com recurso a fotografias do escoamento e medições nas paredes do modelo.

Adicionalmente, a medição das alturas de água na câmara de vórtice foi efetuada com recurso a sondas de nível ultra-sónicas (Baumer, UNDK 30) que utilizam a emissão de uma frequência sónica de 240 kHz para determinar a sua distância relativamente a uma determinada superfície refletora, com uma incerteza de 0.5 mm. As velocidades foram medidas com recurso a sondas UVP Monitor Model (UVP-DUO), com resolução máxima de 0.05 m/s e precisão máxima teórica de 0.8%.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Análise qualitativa

A análise quantitativa iniciou-se com um caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. A elevação da superfície livre após a entrada na voluta é significativamente assimétrica verificando-se uma muito maior altura de água no extradorso da curva. Verifica-se o descolamento do escoamento na parede interior, junto da entrada do escoamento na conduta vertical (após a voluta). O jato oco que incide na base da câmara de dissipação não permite a formação de um colchão de água com altura significativa na zona do impacto. De resto, não existem fenómenos significativos, sendo o escoamento na câmara de vórtice semelhante ao descrito na literatura, ou seja, com a maior altura de água após a entrada na voluta (cf. Figura 2).



Figura 2. Escoamento no canal de entrada de caudal e câmara de vórtice ($10 \text{ m}^3/\text{s}$)

A situação para $11 \text{ m}^3/\text{s}$ é similar à anterior verificando-se, no entanto, que na entrada do escoamento na conduta vertical, os escoamentos exterior e interior encontram-se conforme se pode observar na Figura 3.



Figura 3. Vista do topo da conduta de queda vertical (caudal de $11 \text{ m}^3/\text{s}$)

Aumentando progressivamente o caudal até $13 \text{ m}^3/\text{s}$, verifica-se que a diferença de alturas de água entre o extradorso e intradorso da curva vai-se esbatendo. O colchão de água na câmara de dissipação vai-se reduzindo ainda mais devido ao maior impacto do jato.

Para o caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, a capacidade de vazão à entrada parece perto do limite, verificando-se a maior altura de água à entrada da voluta. Para $15 \text{ m}^3/\text{s}$ a entrada é completamente obstruída sendo a capacidade de vazão comprometida pela entrada na voluta.

Destaca-se o facto de o andamento da superfície livre, após a entrada no canal de montante, se manter, para todos os caudais ensaiados, constante ao longo de cerca de $1,5/2 \text{ m}$ (no modelo físico), assegurando-se, desta forma, que o regime uniforme é atingido.

4.2 Análise quantitativa

4.2.1 Canal de entrada de caudal

O andamento da superfície livre na conduta de entrada de caudal é apresentado, para caudais até $19,0 \text{ m}^3/\text{s}$, na Figura 4.

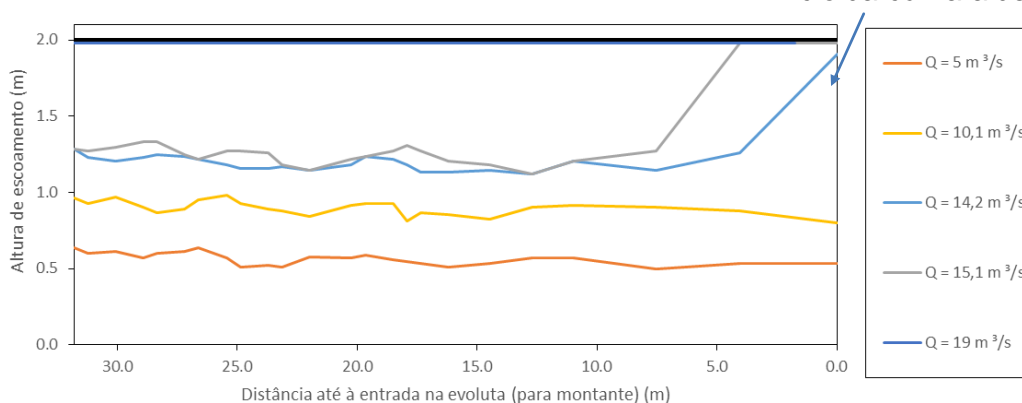


Figura 4. Andamento da superfície livre na conduta de entrada de caudal.

Verifica-se que, suficientemente longe da entrada na voluta, a altura de escoamento é relativamente constante. Desta forma, pode considerar-se que o regime uniforme é atingido no canal de entrada de caudal. Para os caudais ensaiados, a altura de escoamento corresponde a uma altura inferior à altura crítica, sendo o escoamento rápido.

Nos ensaios com caudais $5,0$ e $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$, o escoamento mantém uma altura praticamente constante até à entrada na voluta, não havendo influência de jusante.

O ensaio com o caudal de $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$ corresponde à situação limite antes do escoamento atingir o topo da conduta de entrada. Verifica-se, para esse caudal, uma capacidade de vazão da voluta insuficiente levando à formação do ressalto hidráulico e correspondente influência nas alturas da superfície livre para montante.

Nos ensaios com caudais mais elevados, $15,1$ e $19,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a insuficiência da capacidade de vazão torna-se mais relevante levando a um funcionamento do canal de entrada de caudal

em pressão. Destaca-se o facto de, para o caudal mais elevado, o escoamento se efetuar em pressão em toda a extensão do canal de entrada.

4.2.2 Zona da queda

Na Figura 5 são apresentadas as fotografias do escoamento na voluta para os caudais simulados. Verifica-se que o escoamento para os ensaios com os caudais inferiores (5, 10,1 e 14,2 m³/s) corresponde ao esperado, ou seja, com a elevação do escoamento a verificar-se a jusante da entrada na voluta. A localização da altura de escoamento mais elevada foi verificada com os valores descritos na literatura, tendo-se confirmado essa correspondência. Também conforme descrito por Hager (1999), o escoamento apresenta duas elevações para esses caudais. Para os ensaios correspondentes a caudais superiores (15,1 e 19,0 m³/s), o escoamento é condicionado pela insuficiente capacidade de vazão da secção de entrada da voluta.

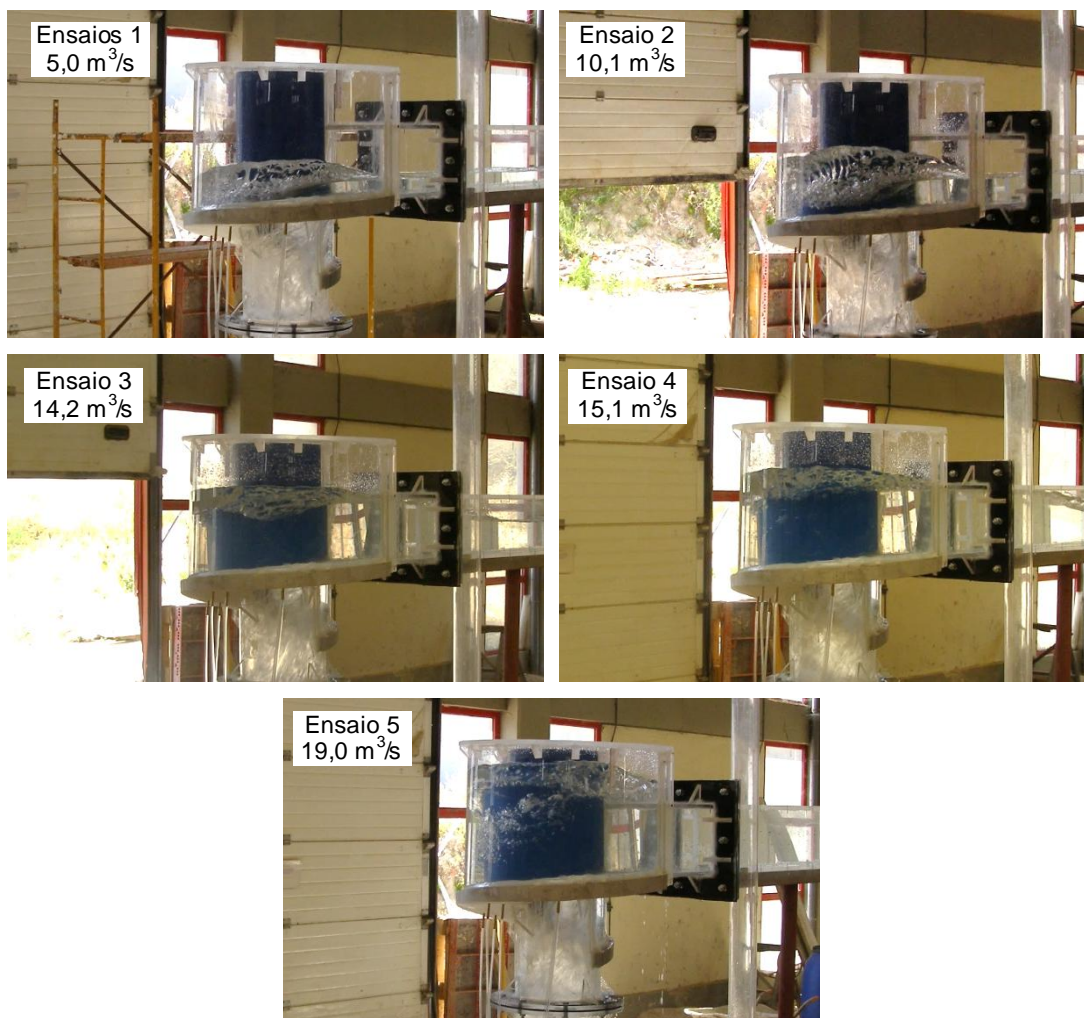


Figura 5. Andamento da superfície livre na voluta

Os resultados do andamento da superfície livre para os diferentes caudais no extradorso da voluta são apresentados na Figura 6.

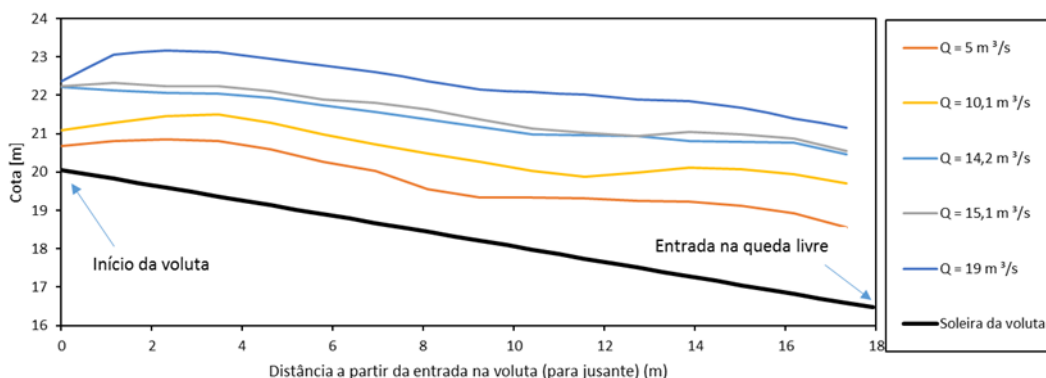


Figura 6. Andamento da superfície livre no extradorso da curva da voluta

As pressões médias foram medidas na soleira da voluta através da colocação de tomadas de pressão e posterior leitura dos valores correspondentes num quadro de pressões. A localização dessas tomadas de pressão é apresentada na Figura 7(a). Na Figura 7(b) são apresentados os valores da medição das alturas piezométricas na soleira da voluta.

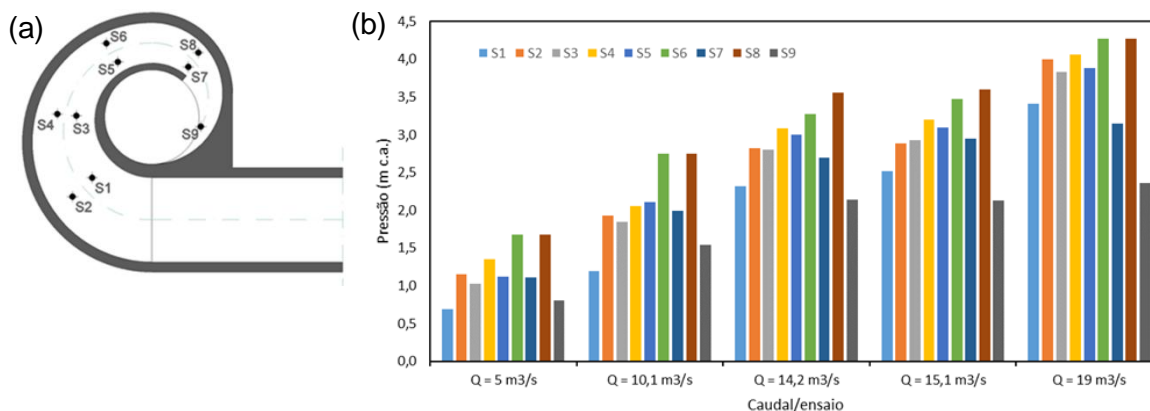


Figura 7. (a) Localização das tomadas de pressão e (b) Pressões medidas na soleira da voluta

Verificam-se valores superiores de pressão para os maiores caudais. A sobrelevação no extradorso da curva na voluta leva ao aumento, para o mesmo caudal, das pressões nessa zona (e.g. $p/\gamma_{S2} > p/\gamma_{S1}$ ou $p/\gamma_{S4} > p/\gamma_{S3}$).

Por forma a verificar o andamento da superfície livre e as velocidades na zona da queda, foram estudados com maior detalhe os ensaios correspondentes a caudais de 10,1 e 15,1 m³/s, respetivamente. Para esses casos foram medidas as alturas de escoamento e as velocidades em três secções transversais recorrendo, respetivamente, a sondas de nível e a sondas UVP.

As secções seleccionadas são apresentadas na Figura 8. Em cada secção foram registadas as velocidades médias em 1 minuto em 12 pontos correspondentes a 4 verticais de 3 pontos cada ambos igualmente espaçados.

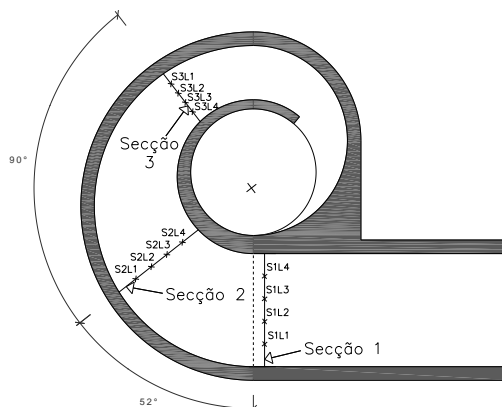


Figura 8. Localização das secções de medição das alturas e velocidades de escoamento

Os resultados obtidos para os caudais $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e $15,1 \text{ m}^3/\text{s}$ são apresentados nas Figuras 9 e 10, respetivamente.

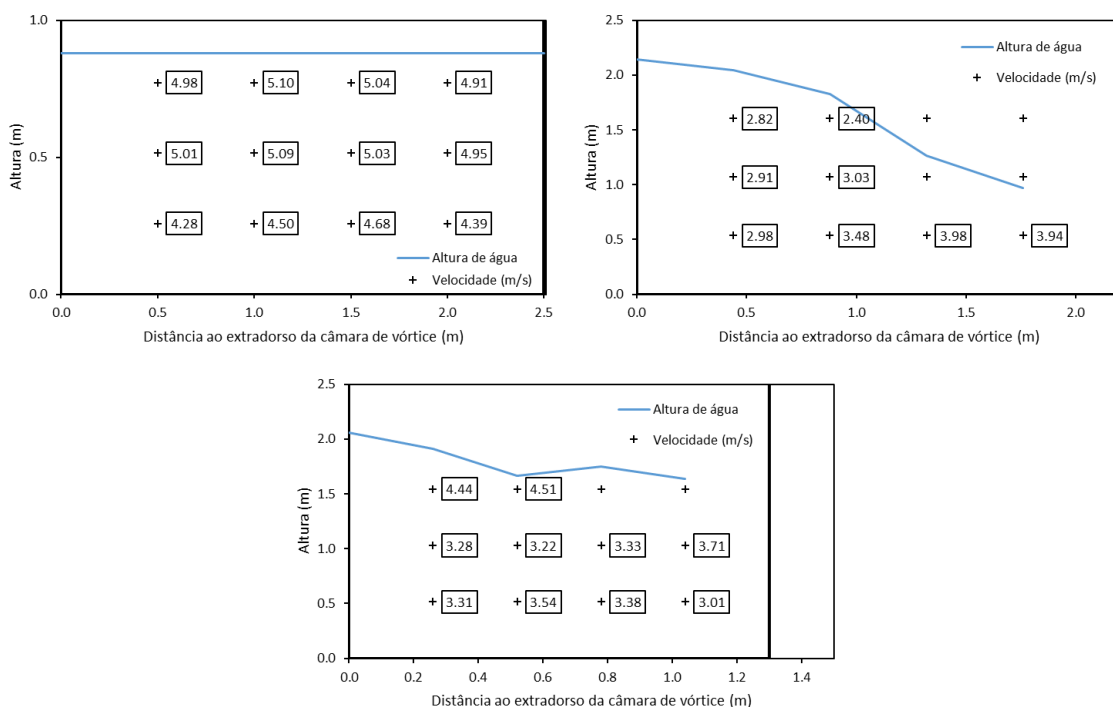


Figura 9. Alturas e velocidades de escoamento nas secções 1 a 3 para $Q = 10,1 \text{ m}^3/\text{s}$

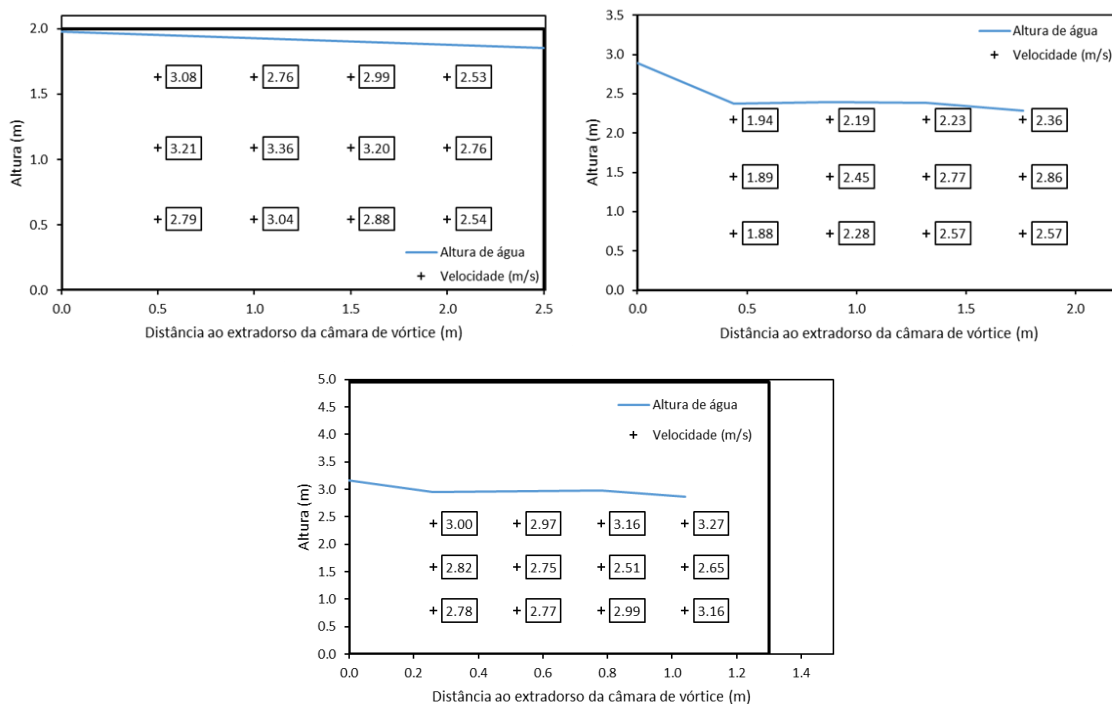


Figura 10. Alturas e velocidades de escoamento nas secções 1 a 3 para $Q = 15,1 \text{ m}^3/\text{s}$

A força centrífuga na zona circular da câmara de vórtice leva à sobreelevação da superfície livre no extradorso da curva. Esse efeito verifica-se principalmente na secção 2.

Para os caudais ensaiados, a altura de água na zona da queda é aceitável. Relativamente às velocidades de escoamento, verifica-se, como expectável, uma maior velocidade no intradorso da curva. De resto, para os caudais ensaiados, as velocidades de escoamento são aceitáveis.

4.2.3 Câmara de dissipação

Na Figura 11 é apresentado o andamento da superfície livre para os ensaios realizados.

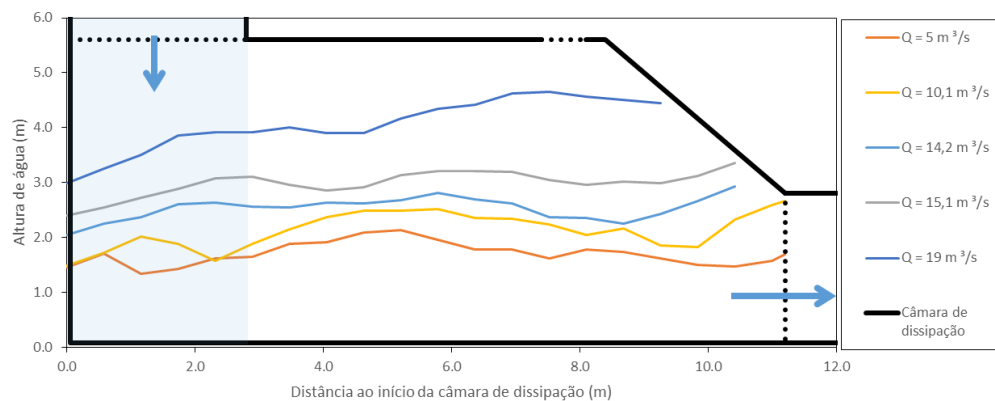


Figura 11. Andamento da superfície livre na câmara de dissipação

Para qualquer dos caudais ensaiados, o escoamento apresenta uma elevada emulsão de ar o que leva a um aumento significativo da altura de escoamento. As alturas de escoamento apresentadas representam a envolvente superior da superfície livre. Na Figura 12 apresentam-se as fotografias do escoamento de $Q = 19,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

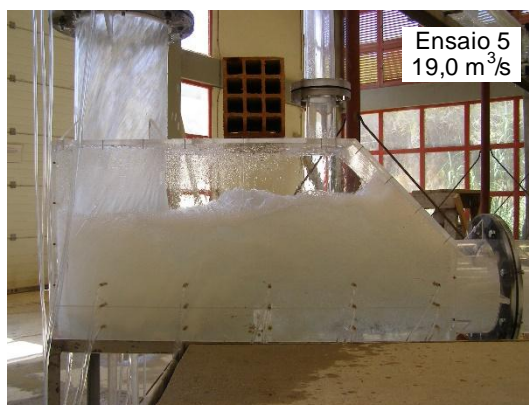


Figura 12. Andamento da superfície livre na câmara de dissipação

Regista-se o facto de, para os dois ensaios com caudais inferiores (5 e $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$), o escoamento não atingir, à entrada do canal de jusante, a parte superior de jusante da câmara de dissipação.

Para os ensaios com caudais superiores a $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$, a superfície livre atinge essa parte da câmara, facto que, só por si, não corresponde a um funcionamento deficiente da câmara de dissipação.

Na Figura 13 são apresentadas as medições das pressões absolutas medidas na soleira da câmara de dissipação.

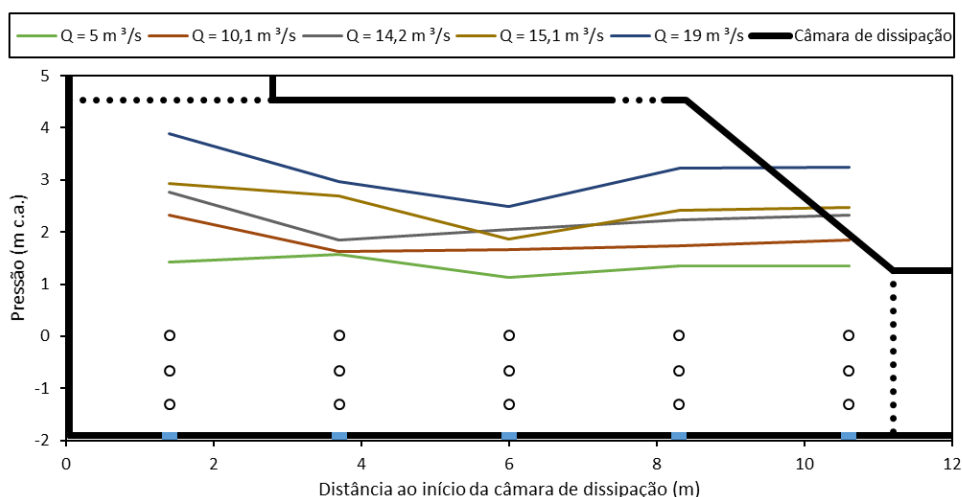


Figura 13. Pressões medidas na soleira da câmara de dissipação



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

As pressões foram medidas em ambas as paredes da câmara de dissipação tendo-se obtido resultados similares para cada um dos níveis inferior, intermédio e superior.

Verifica-se, de uma forma geral, que os valores de pressões absolutas nos vários níveis aumentam com o caudal. Em termos de variação ao longo do comprimento da câmara de dissipação, não se verificam grandes variações com exceção das tomadas localizadas diretamente a jusante do jato. De um modo geral, os valores de pressão obtidos não são significativos, mas deverão, de qualquer modo, ser considerados durante a fase de dimensionamento das paredes e soleira da câmara de dissipação.

5. CONCLUSÕES

Na presente comunicação são apresentados os principais resultados obtidos em modelo físico com as formas de projeto definidas para a câmara de vórtice da Av. Almirante Reis referente ao Plano Geral de Drenagem de Lisboa.

O modelo físico foi construído conforme os desenhos recebidos à escala geométrica de 1:11,57. Para simplificação da interpretação dos resultados obtidos foi efetuada primeiramente uma análise qualitativa, aumentando progressivamente o caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ até $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Seguidamente, efetuou-se uma análise quantitativa dos resultados, dividindo o modelo em conduta de entrada, zona da queda, câmara de dissipação e conduta de jusante.

Da análise efetuada, destacam-se os seguintes resultados:

- (i) O escoamento na conduta de entrada de caudal, suficientemente longe da entrada na voluta, apresenta uma altura constante, considerando-se que o regime uniforme é atingido. A altura de escoamento é inferior à crítica sendo o escoamento rápido.
- (ii) Para ensaios com caudal inferior a $14,2 \text{ m}^3/\text{s}$, o escoamento mantém a altura de regime uniforme até à entrada na voluta.
- (iii) Para o caudal de $15,1 \text{ m}^3/\text{s}$, devido à influência da condição de jusante, verifica-se a existência de ressalto hidráulico a montante da entrada na câmara de vórtice.
- (iv) O escoamento na voluta segue, para os três caudais inferiores, um andamento aceitável e de acordo com a literatura.
- (v) A capacidade de vazão da voluta não é suficiente para o escoamento dos dois caudais superiores ensaiados, $15,1$ e $19,0 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (vi) O escoamento na câmara de dissipação é ajustado para qualquer dos caudais simulados.
- (vii) Os valores de pressão obtidos na soleira e nas paredes da câmara de dissipação não são significativos, mas deverão ser considerados durante a fase de dimensionamento estrutural.
- (viii) Relativamente ao escoamento na conduta de jusante, verifica-se o aumento progressivo da altura de água para os quatro caudais inferiores. Para o caudal de $19,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a entrada na conduta ocupa toda a secção gerando um escoamento em pressão reduzindo-se significativamente a altura de água e gerando um ressalto hidráulico a jusante.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao sector de construção de modelos do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC o trabalho de modelação e construção do modelo físico e ao Eng.º Tiago Gomes pela ajuda na realização dos ensaios. Os agradecimentos estendem-se ao Eng.º José Silva Ferreira pela colaboração no estudo e pela autorização para a sua publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hager W.H. (1999) Wastewater Hydraulics – Theory and Practice. 2nd Edition, Springer, Berlin.

LNEC (2017) Plano Geral de Drenagem de Lisboa – Ensaio hidráulico em modelo físico da voluta na Av. Almirante Reis. LNEC - Proc. 0605/121/20854. Nota Técnica 89/2017 – DHA/NRE.