

DESCARREGADOR EM SIFÃO DA BARRAGEM DE UNDÚRRAGA. ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO

Maria Teresa VISEU

Eng^a Civil, PhD, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101; 1700 LISBOA,
tviseu@lnec.pt

Sílvia AMARAL

Eng^a Civil, Bolseira de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101; 1700 LISBOA,
samaral@lnec.pt

Angel GAMO

Eng^o Civil, AHG Consultores Associados, SL, MADRID, agamo@agamot.com

Alberto Pinto MAGALHÃES

Eng^o Civil, Investigador Coordenador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101; 1700 LISBOA,
pmagalhaes@lnec.pt

RESUMO

A barragem de Undúrraga situa-se em Espanha, na zona de Bilbao. Trata-se de uma barragem de enrocamento com uma cortina de betão, na qual se localizam o descarregador de cheias e a descarga de fundo, com uma altura em relação à fundação de 36 m e um volume total armazenado de 1,85 hm³. A revisão recente do estudo hidrológico levou à conclusão da necessidade de um aumento significativo da capacidade de vazão dos órgãos hidráulicos da barragem e uma das soluções estudadas consistiu na adopção de um descarregador auxiliar em sifão.

Para a avaliação do comportamento hidráulico da solução em sifões, foi construído no LNEC um modelo reduzido dos descarregadores da barragem de Undúrraga, não distorcido, à escala 1/20. Foi verificado o funcionamento dos sifões funcionando individualmente e em conjunto com os restantes órgãos de descarga. O presente artigo descreve o funcionamento dos sifões nas suas três fases características: escoamento em superfície livre, escoamento bifásico e escoamento em pressão. No decorrer dos ensaios, verificou-se a formação de vórtices na fase de escoamento em pressão e ainda na fase do escoamento bifásico, na situação transitória de funcionamento dos sifões, quando ocorre a descida do nível de água na albufeira. Apresenta-se ainda o estudo das soluções empreendidas para eliminar os referidos vórtices.

PALAVRAS-CHAVE

Descarregador em sifão, modelo físico, escoamento bifásico, escorvamento, desferragem

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A barragem de Undúrraga situa-se em Espanha, no rio Arratia, funciona como contra-embalse da central hidroeléctrica de Zadorra e garante o abastecimento de água à região metropolitana de Bilbao. Trata-se de uma barragem de enrocamento com cortina de betão, com uma altura em relação à fundação de 36 m e um volume total armazenado de 1,85 hm³. A barragem possui um corpo de betão na zona central, onde se situa o descarregador de cheias e a descarga de fundo. O descarregador de cheias de superfície é constituído por uma soleira frontal de perfil Creager, com crista à cota (210,00) e dois vãos controlados por comportas de segmento com 4,00 m de largura e 2,50 m de altura. O canal de descarga é constituído por dois canais inicialmente de secção em abóbada, com 4,00 m de largura de base, que atravessam o corpo da barragem e terminam numa estrutura de saída do tipo trampolim. O projecto data de 1968, tendo sido, então, os caudais de cheia, associados aos períodos de retorno $T = 500$ anos e $T = 1\ 000$ anos, estimados em 120,0 m³/s e 150,0 m³/s, respectivamente.

A revisão recente do estudo hidrológico evidenciou que as cheias afluentes podem ser muito superiores às determinadas no projecto. Nesta revisão verificou-se que a ponta de cheia associada ao período de retorno $T = 1\ 000$ anos e que a Cheia Máxima Provável (CMP) apresentam novos valores de 204,0 m³/s e 280,0 m³/s, respectivamente. Verificou-se ainda que o efeito do amortecimento das cheias na albufeira é praticamente inexistente, ou seja os caudais afluentes e efluentes da barragem são idênticos.

Foi, assim, necessário aumentar significativamente a capacidade de vazão dos órgãos hidráulicos da barragem, tendo os projectistas para o efeito, pré-seleccionado e dimensionado, três soluções alternativas [AGH, CONSULTORES ASSOCIADOS SL (2006)]:

- **Solução 1** – Modificação do descarregador existente para ampliar a sua capacidade de vazão;
- **Solução 2** – Construção de um descarregador auxiliar, com comportas radiais e desenvolvimento paralelo ao descarregador existente;
- **Solução 3** – Construção de um descarregador em sifão, com desenvolvimento paralelo ao descarregador existente.

Nesta comunicação faz-se, essencialmente, a avaliação do comportamento hidráulico de uma das soluções projectadas: a Solução 3 - descarregador auxiliar em sifão - com base no modelo reduzido à escala 1/20, construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

A Solução 1, doravante denominada de descarregador principal, consiste na solução existente, à qual se adiciona um deflector de betão colocado imediatamente a montante das comportas, de forma a aumentar o coeficiente de vazão do descarregador.

A Solução 3, doravante denominada de descarregador auxiliar, consiste em 4 sifões, constituídos por 4 condutas metálicas de 2,30 m de largura e 1,60 m de altura, às quais se seguem dois canais rectangulares de 5,00 m de largura, que terminam com trampolins.

Para estas soluções as capacidades de vazão teóricas são as que constam no Quadro 1.

Quadro 1 – Vazão teórica associada às situações características dos órgãos de segurança da barragem.

Tipo de ocorrência	Caudal descarregado (m ³ /s)			Total	Nível na albufeira
	Descarregador principal (Solução 1)	Descarregador auxiliar (Solução 3)	Descarga de fundo		
Cheia projecto (Q = 204,00 m ³ /s)	88,00	116,00	-	204,00	213,03
CMP (Q = 280,00 m ³ /s)	112,00	118,00	Q _{Máx} = 50,00	280,00	213,74

2. O MODELO

Para a realização do estudo experimental dos descarregadores da barragem foi construído um modelo físico não distorcido à escala geométrica de 1/20 (Figura 1). No modelo reproduziram-se, para além das estruturas da descarga de fundo e dos descarregadores de cheias principal e auxiliar, a zona a montante do aterro da barragem em que estas se integram e os trechos do leito do rio e das encostas a montante e a jusante, numa extensão suficiente para garantir a reprodução das condições de aproximação e de restituição dos caudais descarregados.



Figura 1 – Modelo físico da barragem de Undúrraga.

Esq. – Vista de montante para jusante; *Dir.* – Vista de jusante para montante.

O comprimento total do modelo corresponde a um trecho do protótipo com 280,0 m e a largura a um trecho do protótipo com 160,0 m. O modelo tem uma extensão correspondente a cerca de 100,0 m para montante, relativamente ao eixo da barragem. A extensão para jusante da secção terminal dos trampolins corresponde a cerca de 135,0 m.

3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

3.1. Funcionamento geral

O funcionamento de um sifão é caracterizado por três fases distintas [KHATSURIA (2005)]:

- uma 1ª Fase, anterior ao escorvamento do sifão, em que o mesmo funciona como um descarregador em superfície livre (“*weir flow*”), cuja lei de vazão é proporcional a $h^{3/2}$;
- uma 2ª Fase, em que o escoamento é bifásico (“*air-regulated flow*”), com o qual se inicia um processo de descarga de caudais cada vez maiores para uma carga praticamente constante;

- uma 3ª Fase, em que o escoamento ocorre em pressão (“*blackwater flow*”), com ausência de ar, e com vazão proporcional a $h^{1/2}$.

De uma forma geral, os descarregadores em sifão são dimensionados para funcionar na 2ª fase, e não na fase de escoamento em pressão, por a esta corresponder uma lei de vazão desfavorável.

Observou-se o funcionamento do descarregador auxiliar incluindo, em particular, o escoamento a montante dos sifões, na secção terminal dos troços em pressão, nos canais com superfície livre e nos trampolins. As três fases de funcionamento mencionadas são, para o descarregador de Undúrraga, as seguintes [VISEU *et al.* (2007)]:

- 1ª Fase (de 0,0 a aproximadamente 22,0 m³/s) – funcionamento como um descarregador em superfície livre;
- 2ª Fase (entre aproximadamente 22,0 e 124,9 m³/s) – descarga de ar e água (escoamento bifásico);
- 3ª Fase (entre 124,9 e 127,9 m³/s) – funcionamento em pressão (escoamento no interior do sifão com total ausência de ar).

Na primeira fase de funcionamento do descarregador, ou seja, para caudais até, aproximadamente, 22,0 m³/s, o descarregador funciona adequadamente, tanto, no que respeita às características de aproximação do escoamento à entrada dos sifões, como às condições na descarga, em que se observa uma descarga simétrica nos jactos.

Na segunda fase de funcionamento do descarregador, ou seja, para os caudais compreendidos entre 22,0 m³/s e 124,9 m³/s, o comportamento em modelo do descarregador auxiliar da barragem de Undúrraga é o seguinte (*vide* Figura 2):

- os sifões escorvam para um nível de água na albufeira sensivelmente à cota (213,50) - na prática este nível varia entre as cotas (213,37), para os menores caudais, e (213,63) para os maiores;
- uma vez escorvados os sifões, observa-se o funcionamento dos mesmos numa fase transitória, de caudais decrescentes associados à descida do nível de água na albufeira da cota (213,50) para, sensivelmente, a cota (211,50);
- uma vez atingida a cota (211,50) - na prática este nível de equilíbrio varia entre as cotas (211,21), para os menores caudais, e (211,76) para os maiores - os sifões passam a funcionar em regime permanente de caudais, ou seja, o caudal afluente à albufeira iguala o descarregado pelo sifão.

Durante a fase transitória da descida do nível de água na albufeira, motivada por se escoar nos sifões um caudal superior ao fornecido ao modelo, observa-se o seguinte:

- trata-se de uma descarga não controlada de caudais superiores aos afluentes¹, com variações rápidas dos níveis de água no rio a jusante, ou seja, verifica-se que o escoamento em superfície livre é imediatamente seguido pelo escoamento em pressão (“*blackwater flow*”); de notar que é possível controlar este processo, diminuindo os caudais descarregados com a abertura das válvulas de arejamento, que desta forma introduzem ar no escoamento;
- ocorre a formação de vórtices de dimensão apreciável, com chaminé, na zona da entrada dos sifões.

¹ Ao valor do máximo caudal descarregado, nesta fase do processo de descida de água na albufeira dá-se, usualmente, na terminologia inglesa, a denominação de “*priming flow*”.

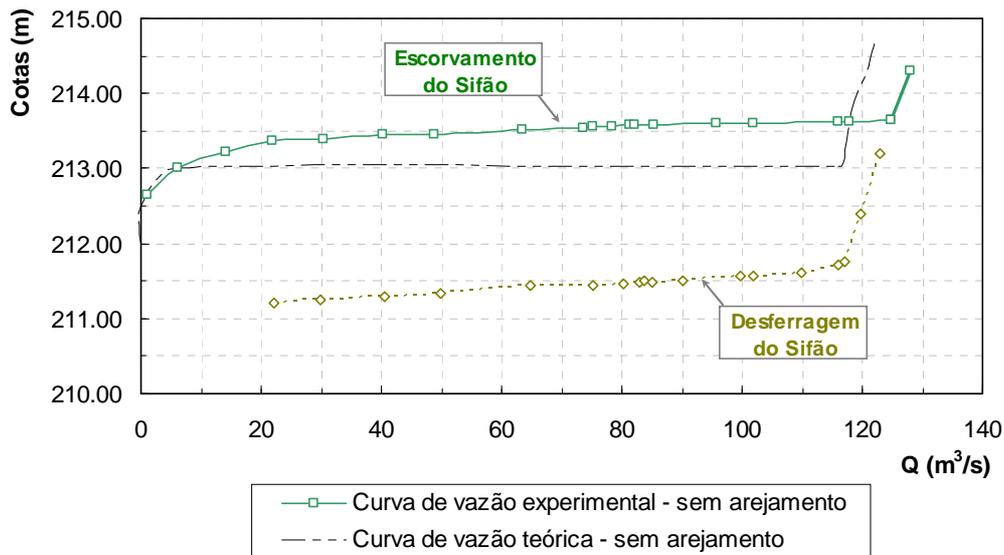


Figura 2 – Curvas de vazão teórica e experimental. Sem arejamento.

Uma vez atingida a cota em que a capacidade de descarga dos sifões iguala o caudal afluyente - cota que, tal como foi referido, varia consoante o caudal afluyente, entre as cotas (211,21) e (211,76) -, observa-se que os vórtices desaparecem, apresentando o descarregador auxiliar, na zona de entrada, um bom funcionamento, sem formação de perturbações assinaláveis. Verifica-se, assim, que as condições de aproximação à entrada dos sifões variam na situação de escoamento bifásico (“*air-regulated flow*”) consoante estes descarregam na fase transitória ou na fase de equilíbrio de caudais afluentes e efluentes, sendo que a comparação entre estes dois estados se pode observar na Figura 3.



Figura 3 – Vista do escoamento à entrada dos sifões (fase de escoamento bifásico). Q = 118,0 m³/s (CMP)
 Esq. – Capacidade do sifão superior ao caudal afluyente; Dir. – Sifão em equilíbrio.

Por outro lado, verificou-se que no modelo, para caudais na gama dos 22,0 a 82,0 m³/s, os sifões “desferram” pontualmente quando estão a funcionar na fase de equilíbrio de caudais afluentes e descarregados (sensivelmente à cota (211,50)), situação esta que leva à paragem de funcionamento dos mesmos. Em consequência, assiste-se a uma subida do nível da água na albufeira até, sensivelmente, à cota (213,50) que induz, uma vez mais, os sifões a escorvarem. Entra-se, assim, num processo oscilatório de escorvamento/desferragem dos sifões e de consequentes variações do nível na albufeira, sensivelmente, entre as cotas (213,50) e (211,50). Este processo de instabilidade da acção

sinfónica é denominado na terminologia anglo-saxónica por “*hunting*” e corresponde a um funcionamento indesejável. De notar, no entanto, que nesta situação específica, os resultados do modelo podem ser afectados por efeitos de escala significativos porque no protótipo a área inundada a cada cota e a capacidade da albufeira são muito superiores às reproduzidas no modelo reduzido. Assim, na realidade, afigura-se que a ocorrência do processo oscilatório “*hunting*” pode ter no protótipo uma frequência de ocorrência muito menor.

Na terceira fase de funcionamento do descarregador, ou seja, na zona de escoamento em pressão, associada a valores de caudal superiores a 124,9 m³/s, dá-se a ocorrência em permanência de vórtices com dimensão significativa.

3.2. Curva de vazão

a) válvulas de arejamento fechadas

A determinação da curva de vazão experimental do descarregador auxiliar revestiu-se de alguma complexidade, devido, ao já descrito, fenómeno de “*hunting*” que ocorre no modelo.

A Figura 2, já apresentada em 3.1, apresenta as curvas de vazão teórica e experimental do descarregador auxiliar, não considerando qualquer arejamento.

Nesta figura, a curva de vazão experimental do descarregador auxiliar é representada a verde: a curva representada a traço contínuo representa do nível de água na albufeira a que os sifões escorvam e a curva a traço interrompido representa o nível em que os sifões funcionam em equilíbrio de caudais afluentes e descarregados.

Note-se ainda que, na curva de vazão obtida experimentalmente, a primeira zona crescente da curva verde a traço contínuo representa a zona de escoamento em superfície livre, a zona aproximadamente horizontal representa a zona de funcionamento bifásico (“*air-regulated flow phase*”) e a segunda zona crescente representa a zona em que os sifões funcionam em pressão.

Da análise da referida figura observa-se ainda que, para o funcionamento na fase “*air-regulated flow*”, o sifão só escorva com o nível da água aproximadamente à cota (213,50), ou seja, cerca de 0,50 m acima do nível considerado no projecto (213,03). Verifica-se, também, que no modelo, a fase de escoamento em pressão “*blackwater flow*” surge mais “tardiamente” do que no considerado no projecto (*i.e.* para maiores caudais). Esta situação é a favor da segurança, já que os sifões devem preferencialmente funcionar na fase “*air regulated flow*”.

Em particular, quando não se considera o funcionamento do descarregador principal e os sifões funcionam isoladamente, estes escorvam praticamente com a mesma cota (213,63), para os caudais de projecto (116,0 m³/s – T = 1 000 anos) e o correspondente à CMP (118,0 m³/s). No projecto considera-se que estes caudais característicos são escoados com níveis de água na albufeira, respectivamente, às cotas (213,03) – T = 1 000 anos – e (213,74) – CMP.

A capacidade máxima de vazão deste novo descarregador é de, aproximadamente, 127,9 m³/s para um nível de água na albufeira à cota (214,31), ou seja, próximo do nível do coroamento. Comparando este valor com o respectivo na curva de vazão teórica, observa-se que, na fase de funcionamento em pressão, a vazão medida é superior à esperada segundo pressupostos teóricos, que considera a vazão de 121,0 m³/s, para o nível de água na albufeira à cota (214,37).

b) válvulas de arejamento abertas

A curva de vazão experimental do descarregador auxiliar com arejamento (Figura 4) foi de fácil determinação, na medida em que, a presença de ar no escoamento induzido pela abertura das válvulas, faz com que não ocorra nestes ensaios o fenómeno de “*hunting*” observado no modelo nos ensaios realizados sem a introdução do ar.

Relativamente a esta curva de vazão, verifica-se que embora a entrada forçada de ar permita um melhor funcionamento dos sifões (em particular, evita a ocorrência dos caudais elevados associados ao fenómeno de “*priming flow*”, do processo oscilatório “*hunting*” e de vórtices na albufeira), a redução da capacidade de vazão do descarregador é muito significativa, ficando esta reduzida quase a metade.

Note-se, por exemplo, que sem arejamento o sifão conseguia descarregar cerca de 127,9 m³/s não ultrapassando a cota (214,31), enquanto que, com arejamento, se observa que o máximo caudal que o sifão consegue descarregar com uma cota semelhante (214,48) é de cerca de 72,7 m³/s. Ou seja, observa-se uma redução na capacidade de vazão de aproximadamente 44 %.

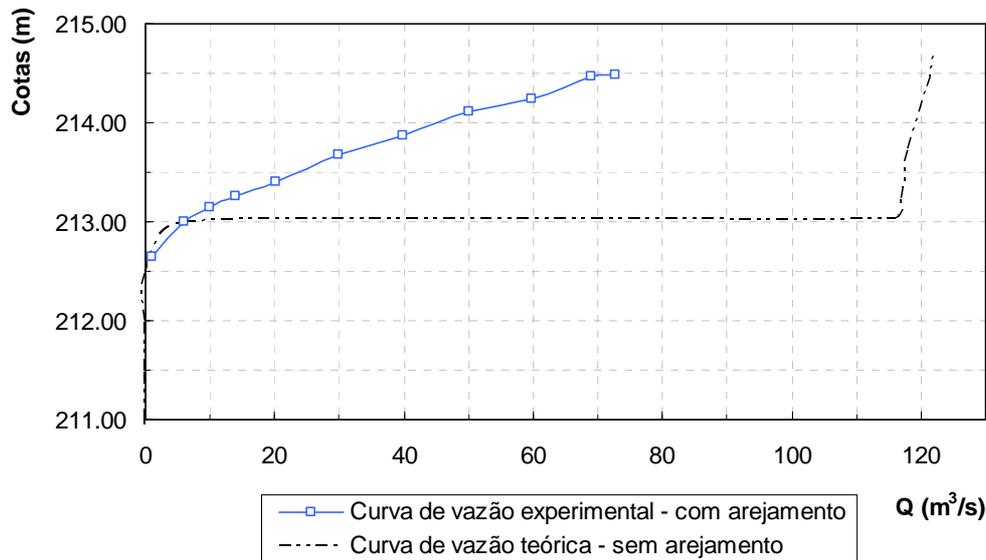


Figura 4 – Curva de vazão experimental. Com arejamento.

3.3 Eliminação dos vórtices

Os ensaios realizados no modelo com as formas do projecto revelaram a ocorrência de vórtices de dimensão significativa [VISEU *et al.* (2007)]. De uma forma geral pode dizer-se que ocorrem (ou podem ocorrer) vórtices quando se estabelece uma corrente que actua tangencialmente a uma massa de água imóvel ou quase imóvel. Também se pode afirmar que qualquer assimetria é favorável à formação de vórtices. Finalmente, numa estrutura hidráulica que comporta um orifício imerso, o baixo grau de submergência do orifício constitui um factor altamente favorável à formação de vórtices.

A formação de vórtices em estruturas hidráulicas pode provocar os seguintes inconvenientes [MAGALHÃES e MARTINS (1981)] :

1. acréscimo das perdas de carga e/ou diminuição da vazão;
2. arrastamento de materiais flutuantes (quer no sentido de os concentrar numa dada zona quer no sentido de os fazer transitar para uma galeria ou conduta);
3. vibrações;
4. fenómenos pneumáticos provocados pela entrada de ar.

De uma forma sintética pode dizer-se que há três métodos para eliminar vórtices:

1. melhorar o “*lay-out*” do sifão;
2. aumentar a submergência;
3. usar dispositivos anti-vórtices.

O primeiro método implica modificações significativas do projecto. Os dispositivos anti-vórtices podem considerar-se divididos em dois tipos [VISEU *et al.* (2007)]:

- a. dispositivos que contribuem para a eliminação de zonas mortas no escoamento;
- b. dispositivos de intersecção dos escoamentos de circulação.

Os segundos podem classificar-se quanto ao seu aspecto geral: horizontais ou verticais, ou quanto à localização: superficiais ou profundos. A escolha é determinada pelo tipo de vorticidade a eliminar (superficial ou com chaminé desenvolvida) e pela variação dos níveis de água na albufeira. Entre estes dispositivos figuram, por exemplo, as grades verticais e horizontais (superficiais ou profundas) e os septos.

Assim, efectuaram-se sucessivas modificações à entrada do descarregador auxiliar até se obter uma solução satisfatória.

A primeira modificação ensaiada consistiu em prolongar em 1,0 m o tecto da entrada do sifão por forma a aumentar a submergência da tomada de água e tentar evitar a formação dos vórtices (ver Figura 5 *Esq.*, na qual FA significa “Formas Alternativas”). Esta modificação não produziu o efeito esperado, continuando a verificar-se a formação de vórtices na fase transitória de funcionamento do sifão, quando ocorre a descida do nível de água na albufeira (Figura 5 *Dir.*).



Figura 5 – Primeira modificação ensaiada. Prolongamento de 1 m do tecto do sifão.

Esq. – Prolongamento do tecto do sifão; *Dir.* – Escoamento com surgimento de vórtices.

A segunda modificação ensaiada consistiu em colocar uma estrutura horizontal flutuante formada por uma malha de vigas transversais e longitudinais. O flutuador foi atirantado a montante por dois cabos. Esta alteração permite “intersectar” os vórtices, verificando-se ainda que as condições de aproximação à entrada do descarregador auxiliar melhoraram (Figura 6). Trata-se de uma solução económica mas que pode pôr problemas de manutenção.



Figura 6 – Segunda modificação ensaiada. Adopção de uma estrutura malhada horizontal flutuante.

A terceira modificação ensaiada consistiu em colocar uma grade vertical sobre o tecto de entrada do sifão. Esta modificação também permite “intersectar” os vórtices, embora se assista a uma circulação do escoamento na zona da entrada dos sifões que traduz uma tendência para a sua formação. Esta modificação tem a vantagem de se tratar de um dispositivo fixo.



Figura 7 – Terceira modificação ensaiada. Adopção de uma estrutura malhada vertical.

Cima. – Vista de topo; *Dir.* – Vista frontal.

Desta forma, decidiu-se adoptar esta última solução. Assim, o aspecto da grade a colocar na entrada do descarregador e apoiada no tecto do sifão é o da Figura 7. Os elementos verticais e horizontais da grade têm secção paralelepípedica e atravessam as zonas de formação dos vórtices, intersectando assim os escoamentos de circulação.

Os ensaios provaram que estas alterações apresentam um funcionamento adequado, deixando de se verificar perturbações no escoamento à entrada dos sifões e também a formação dos vórtices observados, mesmo para os caudais mais elevados, tanto no funcionamento isolado como no funcionamento conjunto com o descarregador principal (Figura 8).

A curva de vazão do descarregador auxiliar determinada experimentalmente depois de colocada a grade à entrada do descarregador em sifão comprova, ainda, que a capacidade de vazão do descarregador não é praticamente alterada nas fases de escoamento em superfície livre e de escoamento bifásico (Figura 9). No entanto, pode observar-se na mesma figura que, na fase de escoamento em pressão, a capacidade de vazão diminui ligeiramente, devido ao acréscimo de perda de carga gerado pela existência da grade à entrada do sifão.



Figura 8 – Funcionamento dos sifões com a solução de dispositivo anti-vórtice proposta.

$Q = 127,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal máximo descarregado pelos sifões)

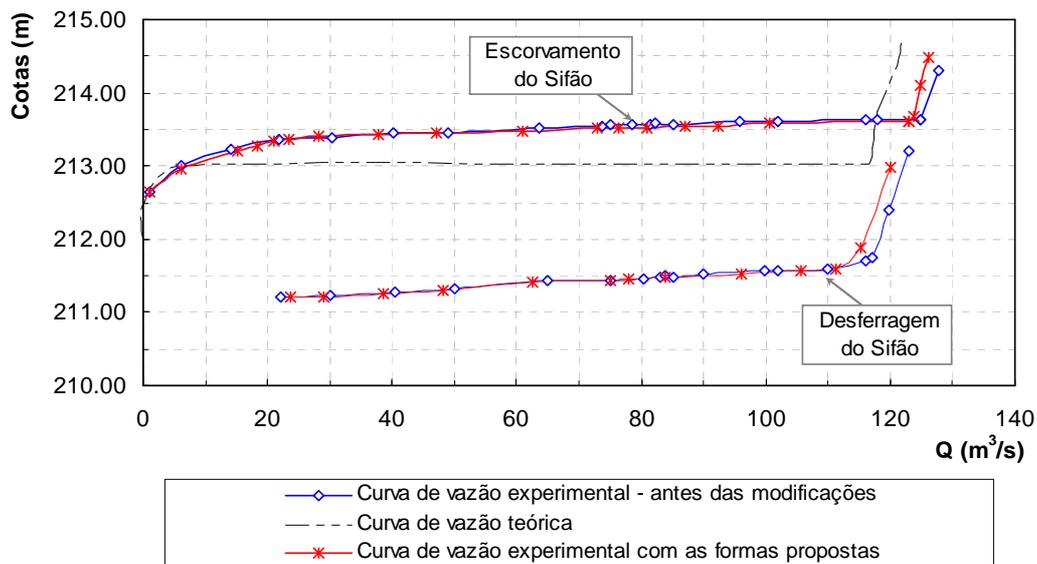


Figura 9 – Curvas de vazão experimentais sem arejamento.

Antes e após a solução de dispositivo anti-vórtice proposta instalada.

4. CONCLUSÕES

A barragem de Undúrraga é uma barragem importante, não só pelas suas dimensões como pelas suas funções (abastecimento de água à cidade de Bilbau).

O descarregador auxiliar em sifão, ensaiado em modelo, permitiu verificar que as novas cheias são escoadas com folgas relativamente aceitáveis. Observou-se, também, que, no modelo, a fase de

escoamento em pressão “*blackwater flow*” surge mais “tardiamente” do que o considerado no projecto (*i.e.* para maiores caudais). Esta situação é a favor da segurança, já que os sifões devem preferencialmente funcionar na fase de escoamento bifásico (“*air-regulated flow*”). Por outro lado, verificou-se que os sifões de Undúrraga escorvam com um nível de água na albufeira superior ao considerado no projecto, o que é contra a segurança.

No que diz respeito às formas de entrada, os ensaios em modelo reduzido permitiram concluir que as formas inicialmente projectadas são adequadas quando os sifões estão a funcionar na fase de escoamento bifásico, em regime permanente. No entanto, verifica-se a formação de vórtices na fase de escoamento em pressão e ainda na fase do escoamento bifásico, na situação transitória de funcionamento dos sifões, quando ocorre a descida do nível de água na albufeira. Atendendo a este facto propôs-se a construção de uma grade sobre o tecto de entrada do sifão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng.º Adolfo Múgica do Consórcio Águas Bilbao – Bizkaia o apoio prestado e a autorização para a publicação dos resultados que constam da presente comunicação. Ao Eng.º Rui Martins agradecem-se as trocas de impressões e os comentários que permitiram melhorar o resultado final deste estudo.

BIBLIOGRAFIA

AGH, CONSULTORES ASSOCIADOS SL (2006) - “Estudio de la ampliación de la capacidad de desagüe de la presa de Undúrraga”. Documento Interno.

KHATSURIA R.M. (2005) - *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Marcel Dekker editors, New York.

WISEU T.; AMARAL S.; MAGALHÃES A.P. (2007) - “Barragem de Undúrraga. Estudo hidráulico em modelo reduzido dos descarregadores de cheias”. Relatório do LNEC, Dezembro.

MAGALHÃES A.P.; MARTINS, R. (1981) - “Estudo das causas do aparecimento de vórtices num circuito de água de refrigeração e da maneira de os eliminar”. Relatório do LNEC, Dezembro.