

1. INTRODUCCIÓ

Una vegada s'ha estudiat de forma exhaustiva el comportament hidràulic de la superfície tractada en aquesta tesina tant des del punt de vista numèric com experimental, cal utilitzar els resultats obtinguts per aplicar-los al disseny d'un aforador.

Així doncs, l'expressió de la superfície a construir i el seu domini de definició (totes les coordenades en **metres**) per una aforador de B metres d'amplada és la següent:

$$z = f(x,y) = -[a (y+bB) + cB^2/(y+bB)] + (d/B) [|x/B|^\alpha / (e|x/B|^\alpha + f(y/B)^2 + g(y/B) + h)]$$

$$a = 0.1691$$

$$b = 0.1093$$

$$c = 3.288 \cdot 10^{-2}$$

$$d = 2.879 \cdot 10^4$$

$$e = 1.811 \cdot 10^5$$

$$f = 1.372 \cdot 10^4$$

$$g = -1.254 \cdot 10^4$$

$$h = 4037$$

$$\alpha = 3.282$$

$$x \in [-B/2, B/2]$$

$$y \in [-0.025 \cdot B, 1.445 \cdot B]$$

(8.1.1)

A més del procés d'aforament pròpiament dit, cal conèixer els condicionants externs que interaccionarien amb la presència d'aquesta estructura en el riu per tal de garantir-ne un **bon funcionament** així com un **impacte visual i ambiental reduït**. Tot seguit es tracten els aspectes que es consideren de gran rellevància en la construcció d'un aforador i que permeten materialitzar en el terreny els estudis realitzats.

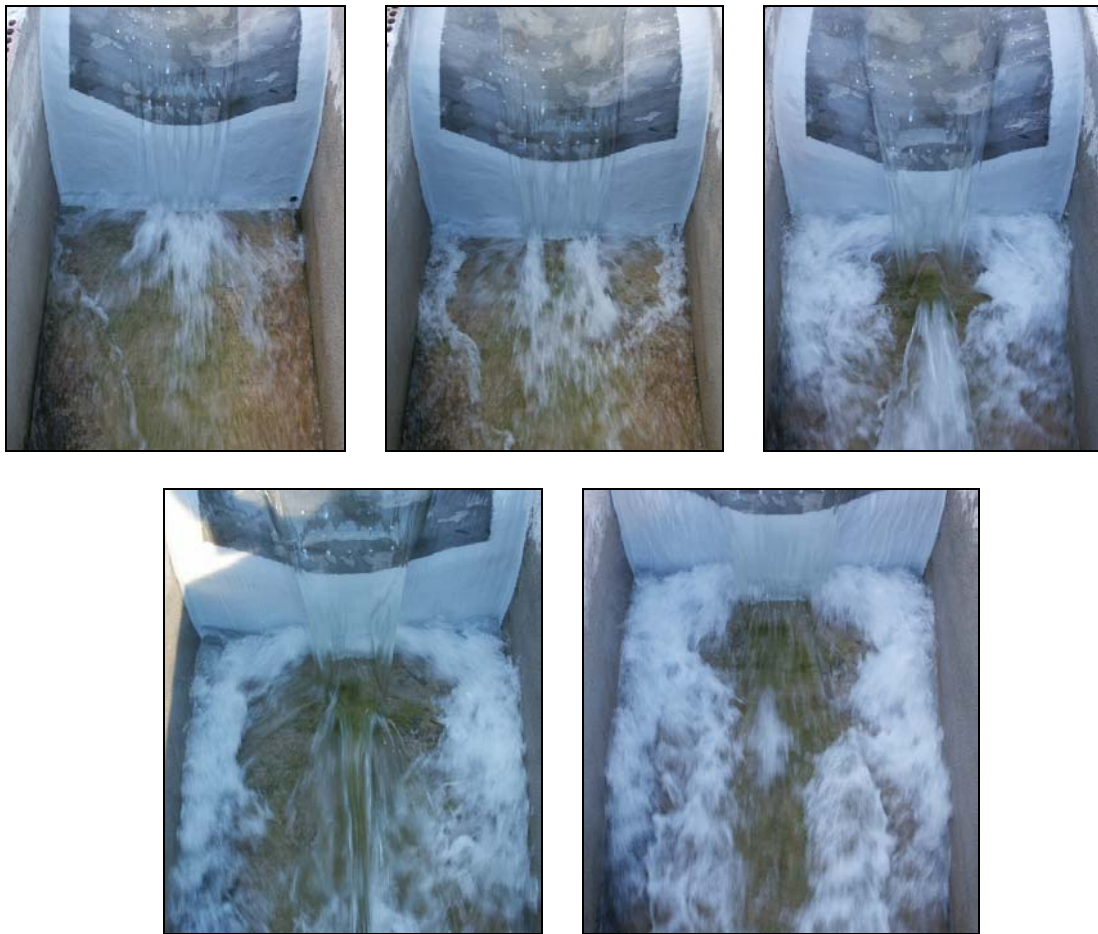
2. PREDISSENY D'UN DISSIPADOR D'ENERGIA

Un aspecte de vital importància en la concepció de qualsevol sistema d'aforador és la forma com es dissipa l'energia aigües avall. La construcció d'aquest element en el riu, per la seva morfologia, obliga al fluxe a experimentar una caiguda amb la qual cosa aquest passa de règim subcrític a supercrític per qualsevol valor de cabal. Si no s'actua aigües avall, l'aforador entregaria l'aigua al riu en règim ràpid ($Fr > 1$) i això suposaria de manera continuada una erosió excessiva de la llera del riu. Amb la construcció d'un dissipador d'energia es pretén que el fluxe torni al seu estat inicial abans de trobar-se amb l'aforador, és a dir, al règim subcrític.

En les següents fotografies es pot observar amb claretat la turbulència de l'aigua en la caiguda per diferents cabals. Realment l'energia cinètica a dissipar serà inferior perquè en realitat el salt d'aigua hauria de superar un desnivell de gairebé mig metre menys, ja que la sobreelevació del model respecte del fons del canal simplement respon

a facilitar el procés constructiu del model, com s'ha comentat en el capítol 4. Si el canal es troba aquesta distància de gairebé 50 centímetres per sota del nivell corresponent al teòric llit del riu, el fluxe perd una energia potencial precisament equivalent a aquesta distància. Per tal de conservar l'energia total el fluxe ha d'augmentar la seva energia cinètica per compensar la pèrdua d'energia potencial.

Com ha quedat exposat la turbulència real del fluxe a considerar és inferior a la que es pot observar en les següents fotografies, però continua sent d'una magnitud gens menyspreable. Només cal imaginar aquestes caigudes d'aigua en aforadors reals de grans dimensions per entendre la necessitat de dissipar l'energia.



Fotografies 8.2.1. Caigudes d'aigua observades per 10, 20, 40, 60 i 80 l/s respectivament.

El dissipador d'energia a construir ha de ser un element capaç d'alterar el fluxe provocant un **ressalt hidràulic** per tal d'entregar la làmina d'aigua al riu en règim lent. En primer lloc s'ha estudiat la possibilitat de construir el tipus de dissipador d'energia més habitual format per un *vas esmorteïdor* just en l'extrem d'aigües avall del model. La morfologia d'aquest dissipador d'energia així com la longitud necessària requerida perquè es desenvolupi completament el ressalt hidràulic requereixen d'un estudi teòric que es realitza a continuació.

L'estudi hidràulic a realitzar se simplifica enormement pel fet que les seccions transversals objecte de l'estudi són seccions rectangulars d'un metre d'amplada. Per aquest motiu els càlculs són fàcils d'implementar en les rutines numèriques.

A grans trets el dimensionament d'aquest dissipador d'energia s'ha fet seguint les següents pautes: en primer lloc s'ha dimensionat el sistema pel màxim cabal mesurat al laboratori: 90 l/s. Per qualsevol valor de cabal inferior està garantit que es desenvoluparà un ressalt hidràulic sempre i quan es desenvolupi pel cabal de disseny.

En la figura 8.2.1. apareix l'esquema del dissipador d'energia així com totes les magnituds que apareixen en els càlculs. El perfil d'aigua que sobrepassa l'aforador s'ha obtingut gràcies a les mesures de camp realitzades. S'ha elaborat un nou programa en *Matlab* anomenat *Dissipador.m* (els llistats del qual s'adjunten a l'annex 2) per conèixer aquesta configuració. En primer lloc es calcula el valor H tenint en compte que hi circulen 90 l/s i que a una distància suficient aigües avall s'estableix un règim uniforme. Per pendents moderats com els que s'estudien el canal és tipus M des del punt de vista hidràulic. El valor de H es dedueix de l'expressió de Manning:

$$Q = A * R_h^{2/3} * j^{1/2} / n \quad (8.2.1)$$

On Q és el cabal, A l'àrea de la secció que depèn de H, R_h el radi hidràulic que també depèn de H, j el pendent del riu i n el coeficient de rugositat de Manning. Seguidament es calcula l'energia específica E d'una secció qualsevol de l'aforador. Per una profunditat del *vas esmorteïdor* qualsevol Δz es coneix l'energia específica a la caiguda sobre el vas i d'aquí s'obté el calat d'aigua en la caiguda (y_1). Gràcies a la fórmula de Belanguer que apareix al document [6] es coneix quin és el calat conjugat de y_1 (y_2). Si aquest calat y_2 equival a $\Delta z + H$ s'accepta el valor de Δz i en cas contrari el propi programa actua iterativament modificant el valor de Δz fins arribar a la convergència. Finalment en el document [6] també s'aconsella utilitzar la formulació de Silvester per conèixer la distància L necessària perquè es desenvolupi el ressalt hidràulic. Per tal que la fórmula de Belanguer sigui aplicable cal que el graó se situï a una distància prou superior a L respecte el propi aforador.

Calat conjugat de y_1 segons l'equació de Belanguer:

$$y_2 = y_1((1+8Fr_1^2)^{0.5}-1)/2 \quad (8.2.2)$$

Longitud total de ressalt segons l'equació de Silvester:

$$L = 9.75y_1(Fr_1-1)^{1.01} \quad (8.2.3)$$

El programa *Dissipador.m* ha proporcionat els següents resultats:

$$\Delta z = 11.9 \text{ cm}$$

$$L = 1.34 \text{ m} \quad (8.2.4)$$

$$H = 9.99 \text{ cm}$$

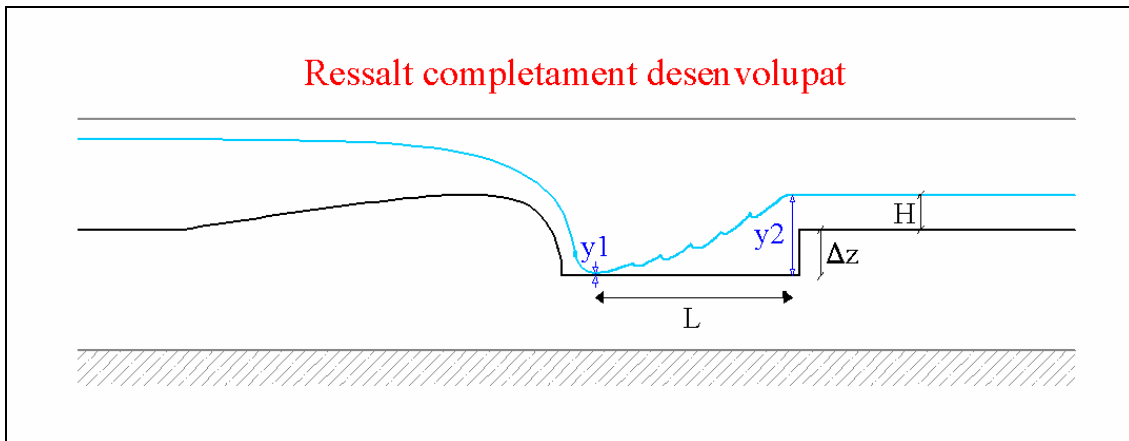


Figura 5.4.1. Esquema del dissipador d'energia estudiat numèricament.

3. ESCALA DE PEIXOS

3.1. ESTRUCTURA AMB VAS ESMORTEÏDOR

Un aspecte mediambiental de vital importància en la concepció de qualsevol sistema d'aforador és la construcció d'una escala de peixos. Aquesta estructura generalment en forma de graons permet als peixos remuntar el riu tot i la presència de l'obstacle que l'aforador representa. Si en aquest sistema d'aforador que s'estudia es construeix l'habitual escala de peixos aïllada del propi aforador la solució seria bona des del punt de vista mediambiental, però presentaria una deficiència greu.

Els esforços destinats a conèixer amb precisió el cabal circulant per sobre de l'aforador perdrien rellevància ja que també caldria aforar correctament l'escala de peixos per tal de valorar el cabal total circulant pel riu. Així doncs es planteja la possibilitat que el propi aforador actuï com escala de peixos, permetent que els peixos puguin passar per sobre de l'aforador. Està clar que pel dissipador d'energia predissenyat en l'apartat anterior les condicions del fluxe en cap cas permetrien que l'aforador actués com a escala de peixos.

En conseqüència caldrà dissenyar un sistema de dissipació d'energia igualment eficaç que el de l'apartat anterior a la vegada que per mitjà d'una alteració del fluxe hidràulic l'aforador es converteixi simultàniament en una escala de peixos. Es pretén que aquesta alteració del fluxe es produeixi a partir d'un **anegament del ressalt hidràulic**. Això significa que el ressalt no té prou energia com per poder-se desenvolupar completament i com a conseqüència el començament del règim lent es va desplaçant progressivament cap a aigües amunt fins que intercepta el fluxe d'aigua en la caiguda. Si aquest anegament fos complet, les condicions del fluxe aigües avall influenciarien el fluxe en règim lent en el propi aforador i això suposaria que aquesta estructura perdria les seves propietats com a mesurador de cabal ja que desapareixeria la relació biunívoca entre calats i cabals.

Aquest anegament del ressalt hidràulic es duria a terme a partir d'un descens de cota uniforme de tot l'aforador, o el que és el mateix, a partir d'escurçar la longitud de

l'aforador suprimint una distància per ara desconeguda de l'extrem d'aigües amunt. Com es veurà en l'apartat següent aquest canvi en la geometria suposa unes modificacions en el fluxe extremadament petites sempre i quan aquesta distància retallada sigui raonablement petita. A més de ser petit, la magnitud de l'error comès és conegut amb la qual cosa aquesta possibilitat és del tot factible.

En la següent figura es pot observar la configuració geomètrica que donaria lloc a un anegament excessiu i a un anegament adient per aquest cas.

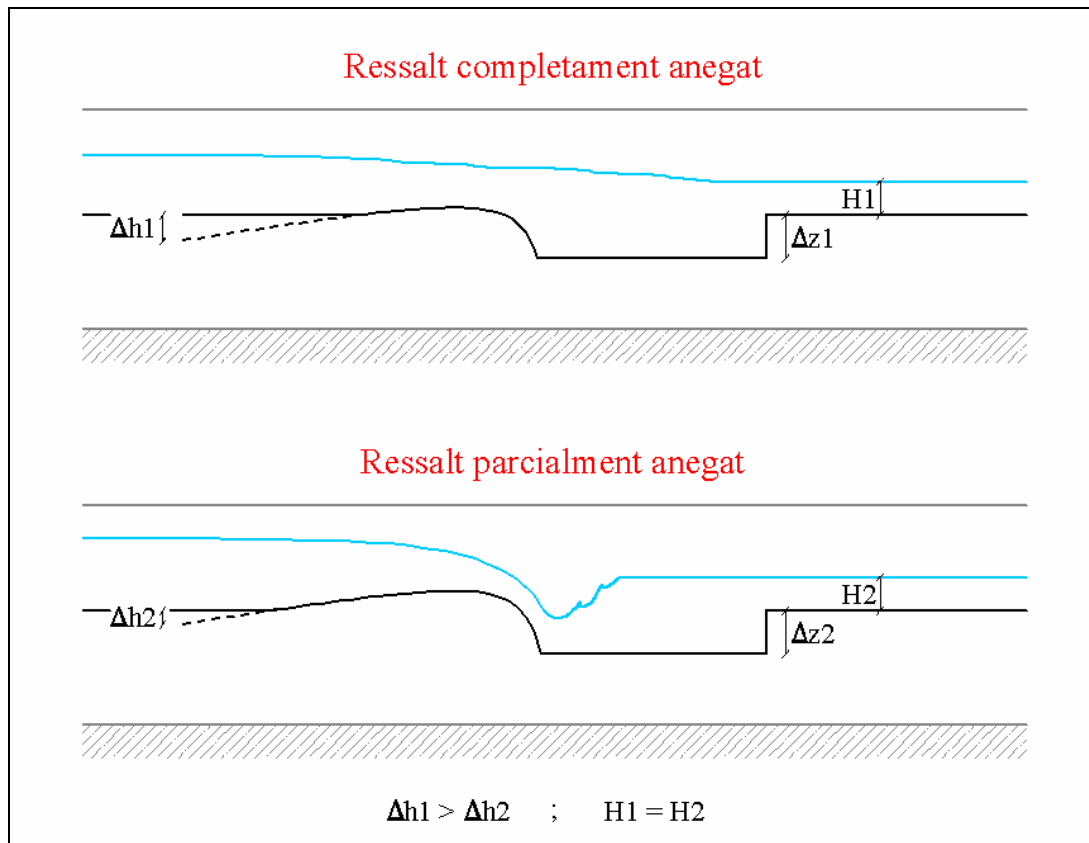


Figura 5.4.2. Posició de l'aforador pels diferents graus d'anegament del ressalt hidràulic.

Els càlculs analítics realitzats a partir de simples consideracions energètiques han indicat que el valor de Δh_2 indicat a la figura pel màxim cabal estudiat de 90 l/s que fa que la longitud de ressalt sigui petita supera els 20 centímetres en l'escala del model, és a dir, que l'aforador quedaria per sota del nivell corresponent a la llera del riu. Aquest fet no permet que l'aforador sigui operatiu i per tant es descarta aquest sistema de dissipació d'energia i escala de peixos funcionant simultàniament.

3.2. TRAM DE TRANSICIÓ DE PENDENT ELEVAT

Una altra possible solució plantejada consisteix en construir un pla inclinat de fort pendent que enllaci l'inici de la caiguda amb la llera del riu aigües avall de l'aforador. En la següent figura es pot apreciar l'esquema d'aquesta alternativa. Hidràulicament aquesta estructura suposa la presència d'un tram de canal S seguit d'un tram de canal M, la qual cosa en teoria provoca la formació d'un ressalt hidràulic.

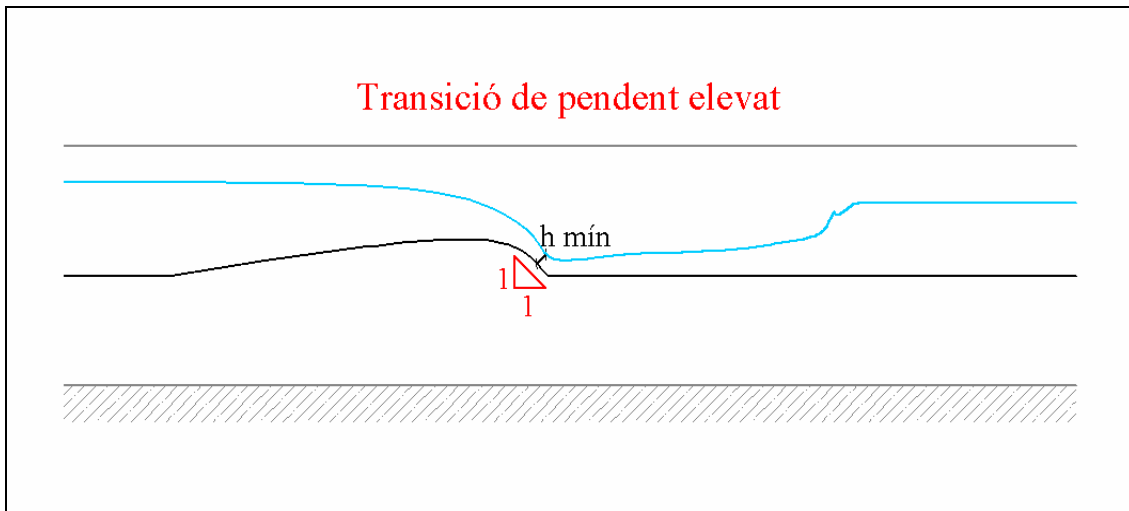


Figura 5.4.3. Dissipador d'energia a partir d'una transició de pendent elevat en la caiguda

Utilitzant el programa *Aguapucha* s'ha pogut detectar la formació d'aquest ressalt uns 2 metres aigües avall del model a escala pel cabal més desfavorable considerat, els 90 l/s. Els càlculs s'han realitzat considerant que el pendent del pla inclinat val 1.

Per tal d'estudiar si els peixos són capaços de superar un fluxe d'aquestes característiques s'han aprofitat els estudis realitzats per Bateman [7]. Segons aquest document els peixos disposen de dos tipus de músculs que els permeten superar fluxes adversos. En primer lloc es considera que tots els peixos estan dotats d'uns músculs que els permeten moure's per l'aigua a una velocitat moderada durant molt de temps sempre i quan l'oxigen no sigui escàs. Aquests són els anomenats *músculs vermells* i es considera que com a màxim permeten al peix desplaçar-se una distància equivalent a 10 vegades la seva longitud en un segon. El segon grup de músculs són anomenats *músculs ordinaris* i poden ser utilitzats durant períodes de temps molt curts pel fet que del seu ús se'n deriva la producció d'àcid làctic. Aquests músculs entren en escena només en situacions d'emergència o d'extrema necessitat i permeten una velocitat màxima no superior a 12 vegades la seva longitud per segon. Per tant, la velocitat màxima del fluxe que un peix qualsevol de longitud L (en metres) pot superar pren el següent valor

$$v_{\text{peix}} = 12 * L \text{ m/s} \quad (8.3.1)$$

Si aquesta velocitat és superior a la màxima velocitat que té lloc en l'entorn de l'aforador el peix podrà remuntar aquest obstacle. Segons els càlculs efectuats amb el programa *Aguapucha* la secció més crítica es troba en el pla inclinat col·locat a la caiguda amb una profunditat de 4.20 centímetres. Aprofitant l'escala de velocitats existent en un fenomen amb semblança de Froude com aquest (expressió 3.4.3) la màxima velocitat registrada en un aforador d'amplada B metres té aquesta expressió:

$$v_{\text{màx}} = 3.03 * B^{0.5} \text{ m/s} \quad (8.3.2)$$

Igualant aquestes velocitats s'obté la longitud mínima requerida per un peix per tal de remuntar l'aforador

$$L = 0.253 * B^{0.5} \text{ m} \quad (8.3.3)$$

En la següent gràfica apareixen les longituds de peix mínimes per amplades d'aforador de fins a 30 metres que permeten remuntar l'estructura.

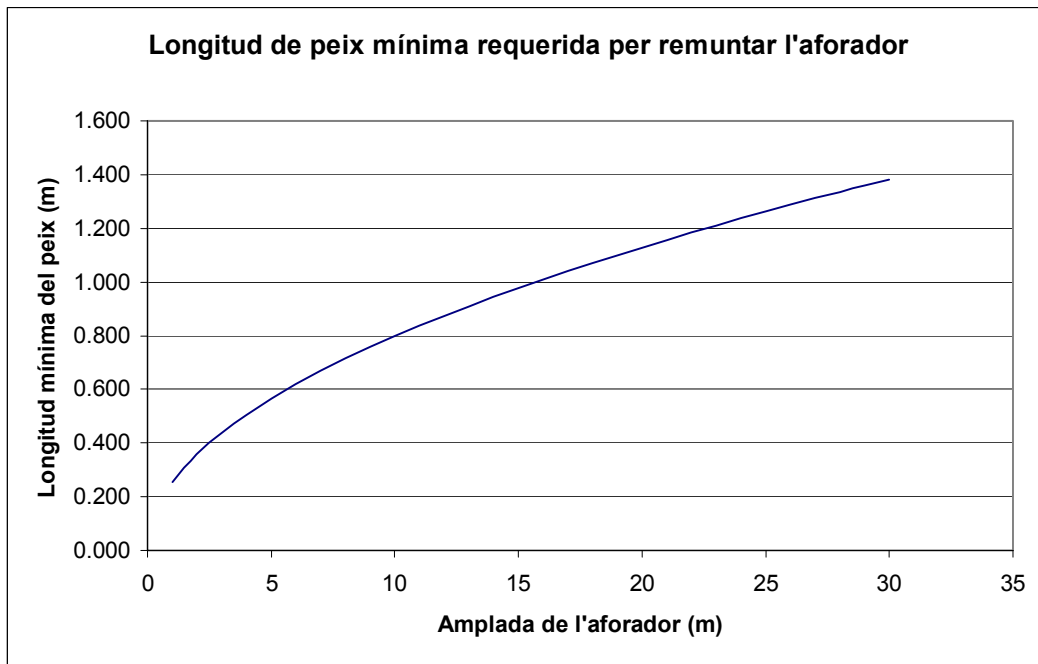


Figura 5.4.4. Longitud del peix més petit capaç de remuntar l'aforador per diferents amplades d'aquest segons l'estudi teòric realitzat per un cabal de 90 l/s a escala 1:1.

I en el següent gràfic es mostren les profunditats mínimes amb les que es trobarien els peixos.

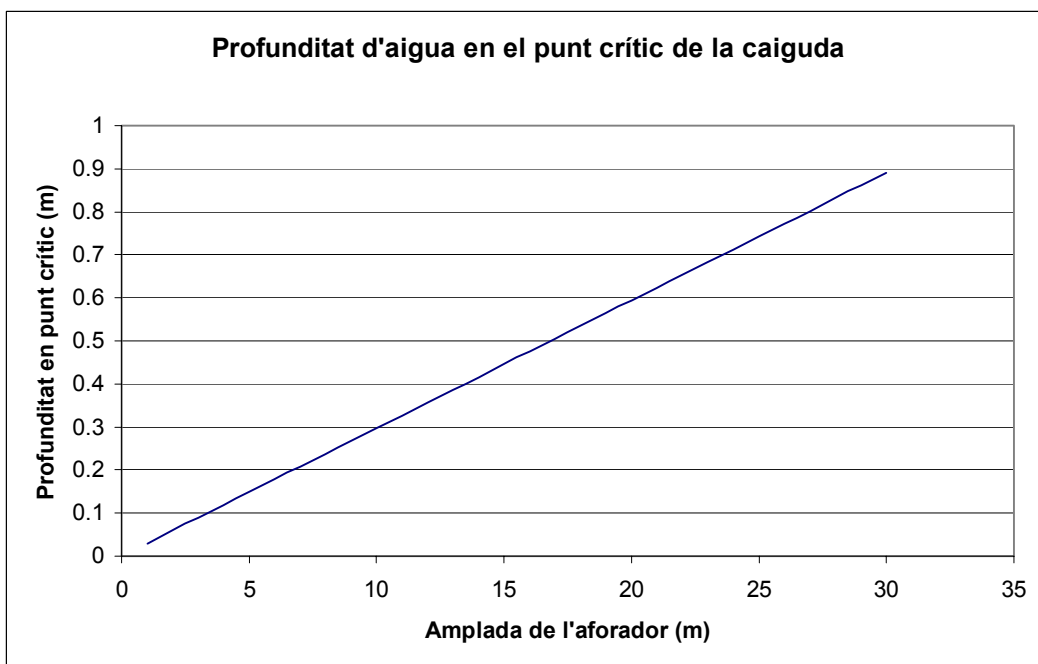


Figura 5.4.5. Profunditats mínimes d'aigua en l'aforador per diferents amplades d'aquest segons l'estudi teòric realitzat per un cabal de 90 l/s a escala 1:1.

Els resultats indiquen clarament que els peixos no són capaços de superar l'obstacle aparegut amb la construcció de l'aforador. Cap peix d'unes dimensions raonables superaria els requeriments mínims trobats, sempre de forma teòrica. Per exemple, per un aforador de tamany mig com correspondria a una amplada de 10 metres tots aquells peixos de longitud inferior als 79.8 centímetres no superarien l'estructura, és a dir, que cap peix seria capaç de superar-la.

En definitiva, tot i que aquest sistema permetria la formació d'un ressalt hidràulic i en principi l'energia es dissiparia de forma eficient, el propi aforador en sí mateix no podria actuar com a escala de peixos almenys per cabals mitjos i alts. Per cabals baixos la longitud mínima de peix es veuria reduïda però la profunditat d'aigua començaria a ser un factor limitatiu.

3.3. CONCLUSIONS

Les conclusions que es poden extreure dels resultats obtinguts dels estudis corresponents a aquests dos possibles sistemes de dissipació d'energia i d'escala de peixos funcionant simultàniament, són que la dissipació d'energia possiblement es pugui dur a terme sense massa problemes però en cap cas el sistema pot funcionar com una escala de peixos de forma eficient.

Realitzar un estudi teòric del problema suposa introduir un gran nombre de simplificacions per un problema hidràulicament molt complex. Tot i que aquest problema s'afrontaria de millor forma des d'un punt de vista experimental els resultats teòrics i numèrics obtinguts permeten extreure'n conclusions negatives fiables.

Altres possibilitats que es podrien tenir en compte són construir una escala de peixos amb graons enlloc del pla inclinat de l'apartat 3.2. o estudiar la possibilitat de construir una escala de peixos lateral independent del fluxe per sobre de l'aforador.

En aquesta tesina el dissipador d'energia i l'escala de peixos no són temes prioritaris però sí s'ha procurat realitzar-ne un primer estudi. A fi de dissenyar aquests dos elements de l'aforador caldria estudiar el problema de forma experimental i molt més exhaustivament.

4. NIVELLS D'OPERATIVITAT

Una vegada aquest possible sistema d'aforador entrés en funcionament podrien aparèixer diversos factors externs capaços d'alterar-ne les propietats. La principal font de preocupacions és la possibilitat que l'aforador quedi parcial o totalment colmatat per sediments. Com s'ha comentat aquest aforador pretén no ser una barrera pel transport de sediments i per això la transició entre el riu i l'estructura es fa de forma contínua, sense cap graó. Malgrat tot, per grans avingudes la turbulència pot movilitzar i transportar una quantitat de partícules sòlides molt superior a l'habitual i aleshores l'aforador sí actuaria com un obstacle per aquest transport sòlid. Tot i aquesta contingència, es considera que aquest sistema d'aforador és *autonetejant*. En la següent figura s'observa amb claretat quin aspecte tindria l'aforador una vegada colmatat.

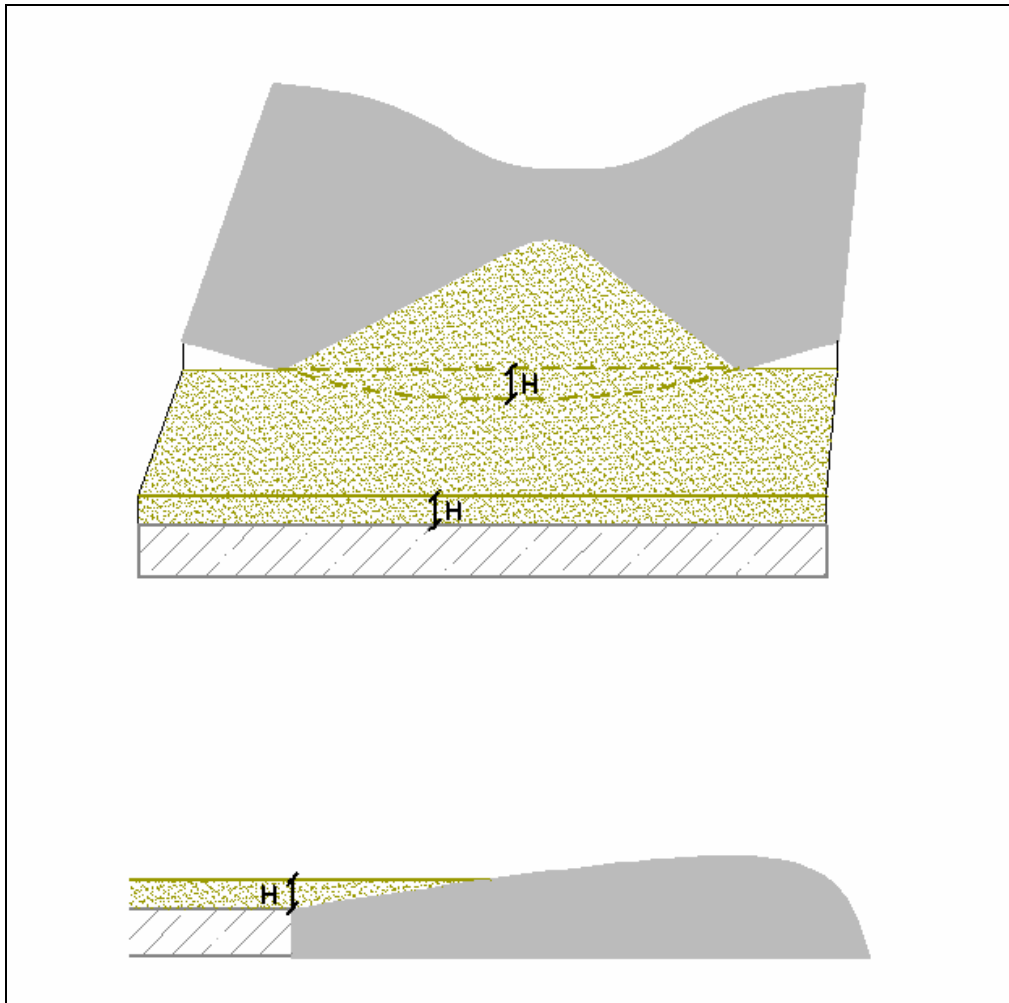


Figura 8.4.1. Perspectiva i perfil de l'aforador colmatat per una capa de sediments de gruix H.

Per analitzar si aquesta problemàtica pot afectar directament a l'operativitat de l'aforador, cal avaluar la importància de les modificacions en la superfície de l'estructura aparegudes com a conseqüència de l'acumulació de sediments. Concretament cal determinar si aquests sediments modifiquen els valors de les cotes d'aigua existents per qualsevol valor de cabal. Si es mesuren calats diferents als que es mesurarien pel mateix cabal amb l'aforador net el càlcul d'aquest cabal seria erroni. Cal conèixer amb precisió la magnitud d'aquests errors, per tal de conèixer quan s'està aforant de forma correcta, per quin rang de cabals i per quin nivell de colmatació.

En el següent gràfic s'indiquen els errors comesos en la determinació de les cotes d'aigua emprades pel càlcul de cabals quan l'aforador presenta diferents graus de colmatació. S'ha considerat que els sediments s'acumularien en capes horitzontals i s'ha analitzat el problema per un gruix de sediments de 4, 8 i 12 centímetres en el model. Per efectuar els càlculs s'ha emprat el programa *Aguapucha* una vegada verificada la seva fiabilitat per la facilitat amb que es pot canviar la cota del fons i la forma de les seccions. S'han calculat calats per un nombre finit de cabals i s'hi han fet passar les corbes corresponents.

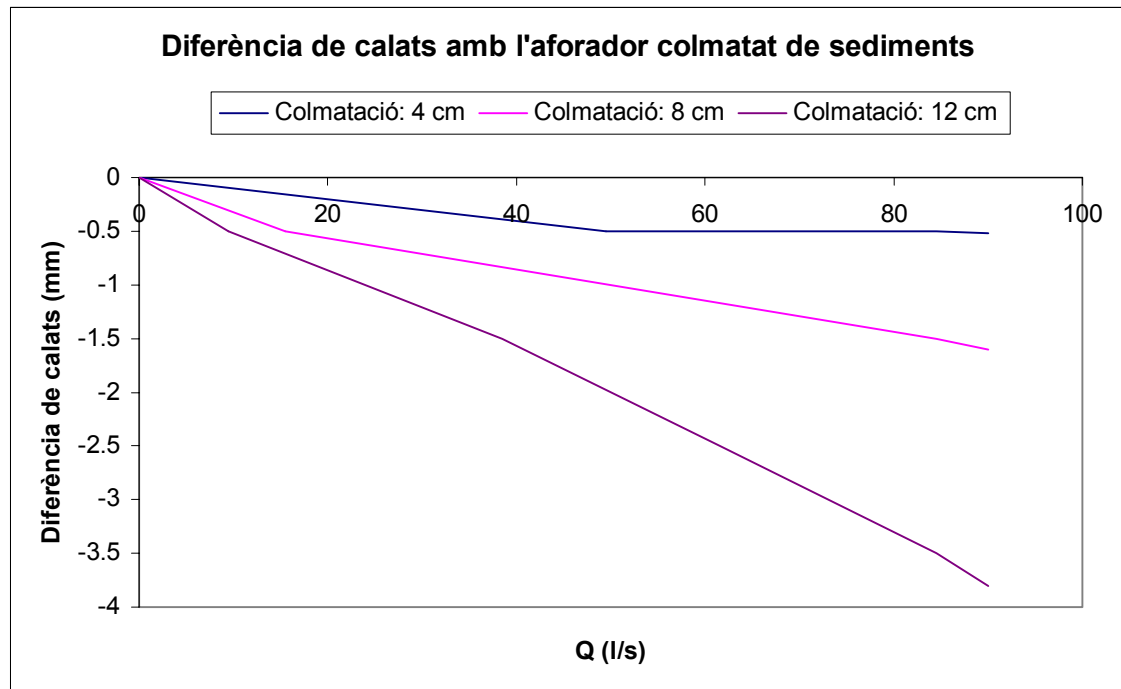


Figura 8.4.2. Error comès al mesurar calats en un aforador colmatat fins a diferents nivells en l'extrem d'aigües amunt de l'aforador.

En aquest gràfic es posa de manifest com l'error comès en la determinació de la cota de la làmina d'aigua augmenta a mesura que augmenta el nivell de colmatació, tal i com es podia preveure. Això significa que a mesura que la geometria reproduïx pitjor la geometria inicial el fluxe també es va modificant. Per exemple, per un cabal de 90 l/s en el model, ΔH se subestima en 3.8 mil·límetres per una alçada colmatada de 12 centímetres, 1.6 mil·límetres per una alçada de 8 centímetres i 0.5 mil·límetres per un aforador colmatat 4 centímetres.

Per un hipotètic aforador d'amplada B metres en primer lloc caldria jutjar quin nivell de colmatació s'ha assolit, entre quin dels tres casos cal ponderar els resultats. Seguidament es calcularia el cabal circulat a partir del valor ΔH obtingut com a resta del nivell d'aigua mesurat i el nivell d'aigua en repòs. Gràcies a la semblança de Froude es coneix el cabal equivalent en el model a escala de 1 metre d'amplada. Entrant en la gràfica 8.4.2. i fent una mitja ponderada dels dos valors de les corbes corresponents es quantifica la subestima de ΔH que s'hauria comès en el model a escala. Multiplicant aquesta distància per B i sumant-la al valor de ΔH de l'aforador real s'obté la correcció desitjada que ens permetrà obtenir una estima molt millor del cabal circulat.

A simple vista l'error que es cometria sense corregir el valor de ΔH sembla raonablement petit, però per tal de valorar-lo correctament cal conèixer l'error en termes de cabal, que és realment el que es pretén calcular. Aquest error és independent de la semblança geomètrica existent i per això es pot analitzar còmodament a partir dels resultats experimentals obtinguts al laboratori. Després de comparar els resultats s'ha observat que l'error màxim suposa una subestima del 2.64 % i correspon al màxim cabal estudiat (90 l/s). Efectivament, continuen sent valors baixos i amb la correcció realitzada passen a ser pràcticament inapreciables.

Per justificar la disminució del valor de la cota absoluta d'aigua amb l'augment de la cota del fons de l'aforador només cal tenir en compte el valor de l'*energia específica* de la secció. Com l'energia total es manté i la cota de la solera augmenta l'energia específica en la secció disminueix. En la branca en règim lent de la corba d'energia específica una disminució d'aquesta suposa una disminució del calat. De fet és un problema anàleg al del fluxe que es troba un graó i experimenta un sot.

Malgrat que el dragat dels sediments acumulats en el fons de l'aforador sempre sigui recomanable, quan no sigui possible dur-lo a terme es considera que la correcció efectuada és prou satisfactòria.

Aquests resultats permeten una aplicació molt interessant a aquest aforador: si existeixen limitacions d'espai l'aforador pot ser retallat en el seu extrem d'aigües amunt. Com la cota del parament d'aigües amunt de l'estructura ha de coincidir amb la llera del riu, això suposarà que l'aforador tingui una cota relativa respecte la llera del riu inferior al cas estudiat. Aquest cas correspon clarament al de la figura 8.4.1. però enlloc de sediments hi ha la llera del riu. Com ja es coneix la correcció a fer els límits geomètrics de l'aforador els pot fixar el projectista en funció de les limitacions d'espai o pressupost. Tot i això es recomana emprar el domini $y \in [-2.5 \text{ cm}, 144.5 \text{ cm}]$ a escala 1:1 perquè permet obtenir uns nivells de precisió molt elevats.

5. FORMACIÓ D'EMBASSAMENT

La construcció d'aquest aforador provoca un augment de la làmina d'aigua per tal de poder sobrepassar l'estructura. Una vegada establerts els límits geomètrics de l'aforador a partir dels condicionants exposats en l'apartat anterior es pot conèixer la sobreelevació del nivell existent per qualsevol valor de cabal. Realment no seran variacions excessives però sí suficients com per considerar que l'aigua queda embassada.

Quan es planteja la possibilitat de crear un embassament aigües amunt d'una resclosa es procura obtenir un màxim volum emmagatzemat d'aigua per un nivell d'aigua donat. Sovint la capacitat de l'embassament és el paràmetre essencial de disseny, per exemple quan cal abastir nuclis de població. Amb aquesta premisa s'estudia la topografia per tal de determinar quin seria el millor emplaçament per la resclosa. Generalment aquest augment de la superfície de terreny inundat es tradueix en un augment del desequilibri mediambiental.

En el cas d'un aforador, la seva construcció respon senzillament a la necessitat de modificar el fluxe d'aigua per tal de poder-ne avaluar el cabal. Com l'aigua embassada aigües amunt serà intrascendent a efectes de determinació d'aquest cabal, el criteri per emplaçar l'aforador no serà obtenir el màxim volum d'aigua. De fet el criteri serà just el contrari: es procurarà que la presència de l'aforador alteri en el menor grau possible l'entorn i per això caldrà determinar el punt del riu en què *el volum d'aigües embassat aigües amunt sigui el mínim possible*.