

## **1. PLANTEJAMENT**

El fluxe d'aigua objecte d'aquest estudi presenta una sèrie de singularitats que en dificulten en gran mesura la seva caracterització. És per això justament que s'ha construït un model a escala per tal de conèixer determinats aspectes del fluxe que difícilment podríem conèixer a partir de consideracions teòriques. Gràcies al model a escala es poden quantificar diverses variables simplement mesurant-les per un cabal conegut per extreure'n posteriorment les conclusions pertinents.

Les singularitats principals de la superfície estudiada són les següents:

- Forts pendents en el sentit del fluxe. Per aquest motiu no seran aplicables un gran nombre de formulacions teòriques de tipus hidràulic que utilitzen simplificacions pròpies de considerar pendents reduïts en canals.
- Pendent advers en la primera part de la superfície. L'estructura estudiada col·locada en un canal natural o artificial suposarà que aquest sigui un canal tipus A en un petit tram. Aquest tipus de canal és difícil de trobar perquè generalment el fluxe s'estableix aprofitant els desnivells del terreny.
- Canvis de corbatura transversals. La superfície passa de ser cóncava en amunt a ser cóncava en avall. Aquest fet tampoc és gens habitual.

Malgrat l'evidència de la necessitat de treballar amb un model a escala, això no ens eximeix d'emprar mètodes numèrics per realitzar-ne un estudi paral·lel. Són moltes les eines informàtiques disponibles que poden permetre l'obtenció d'uns resultats més complets i satisfactoris si s'utilitzen de forma adient.

Com es veurà en els següents apartats no només s'han utilitzat programes d'ordinador ja elaborats on senzillament s'introdueixen les dades i se n'extreuen resultats, sinó que també s'han realitzat tasques de programació per tal d'obtenir eines informàtiques més apropiades per aquest estudi. En determinades ocasions els programes disponibles han estat confeccionats a partir de certes simplificacions que poden no ser massa coherents amb la situació estudiada. També és possible que el mateix programa no permeti introduir de forma senzilla la geometria a estudiar.

L'objectiu d'aquest estudi numèric bàsicament consisteix en complementar els resultats experimentals i d'aportar informació d'aquells aspectes que puguin quedar incomplets per la dificultat de realitzar-ne mesures (sobretot pel que fa a velocitats i pressions). Però a més el fet de contrastar resultats numèrics i experimentals permet valorar la fiabilitat dels mètodes numèrics: en una altra situació on la construcció d'un model reduït no sigui possible es podrà conèixer la fiabilitat dels resultats obtinguts numèricament. En l'apartat de conclusions es parlarà amb més detall de l'error comès en les mesures i de la fiabilitat dels resultats obtinguts.

## **2. ESTUDI UNIDIMENSIONAL: AGUAPUCHA**

El primer programa que es va utilitzar per estudiar el fluxe va ser el programa *Aguapucha*. Es tracta d'un programa d'integració de corbes de rabeig realitzat pels professors Allen Bateman Pinzón i Jerónimo Puertas Agudo. És un programa unidimensional realitzat en llenguatge *Fortran* l'eficàcia del qual està sobradament contrastada per la llarga experiència que es té en el seu ús. Gràcies al seu manual d'ús [4] s'han pogut confeccionar els dos arxius de dades necessaris pel seu funcionament: els arxius *optimiza* i *datos*. Els llistats d'aquests dos arxius així com tots aquells llistats corresponents a aquest capítol han estat adjuntats a l'annex 2.

### **2.1. ARXIUS DE DADES**

En l'arxiu *optimiza* s'introdueixen totes les dades corresponents a la geometria de la superfície així com tot allò que fa referència al cabal.

Aquest programa no permet la introducció de la geometria de forma analítica, tot i disposar d'ella. El sistema per facilitar aquesta informació consisteix en definir la forma de determinades seccions i d'indicar-ne la seva posició. El programa s'encarrega de definir la geometria de la secció en qualsevol punt intermig entre dues seccions definides consecutivament per mitjà d'una interpolació linial. *Aguapucha* només admet la introducció de les següents formes: arcs de circumferència concaus en amunt o en avall i trapezis (rectangles en el cas de bases iguals i triangles en el cas d'una base nul·la). Per seccions més complexes com les estudiades el programa permet ensamblar diverses subseccions de forma vertical. Aquest mètode pot semblar inexacte per estructures singulars però per la majoria de seccions existents és més que suficient.

Tot seguit s'explicarà breument el significat de les diverses instruccions de l'arxiu *optimiza*. En primer lloc s'escriuen el nombre de seccions que es definiran i el nombre de trams entre seccions, 8 en ambdós casos. Les dues següents línies serveixen per introduir el coeficient de fricció de Manning, 0.015 pel cas del formigó. A continuació es defineix cadascun del 8 trams existents, donant la coordenada longitudinal del principi i del final i els números de les seccions transversals de dites seccions. En les 8 línies següents es defineixen en ordre correlatiu les seccions transversals per mitjà de la composició de subseccions: un arc de circumferència concau en amunt i dos trapezis amb base superior més gran que la base inferior. Seguidament s'introdueix el cabal circulat per cada tram; en aquest cas el cabal és únic en tot el domini. Les 8 línies següents serveixen per donar la cota del fons de les 8 seccions definides. A continuació s'indica si els 7 trams de secció variable són estretaments (s'escriu 0.15) o bé eixamplaments (s'escriu 0.30). L'avantpenúltima línia indica la cota màxima d'aigua possible: +0.45 m, 90 centímetres per sobre del fons en tot el canal. I per últim en les dues últimes línies s'indica que el canal no està dividit en diverses cel·les laterals.

L'altre arxiu elaborat, el *datos*, dóna una sèrie de pautes al programa de com realitzar els càlculs.

En primer lloc s'indica l'arxiu que conté la geometria i la seva extensió (*optimiza.dat*). En la segona línia hi ha tres camps numèrics: en el primer d'ells el 0 indica que el mètode d'integració emprat és Newton-Raphson; el valor 1 del segon camp fa que en l'arxiu de resultats *calado* s'escrigui el resultat a cada punt calculat; i el 1 del tercer camp indica que els resultats gràfics apareguin conjuntament. En la darrera línia s'introdueixen les dades de control de càlcul. Si el primer número és negatiu la integració de la corba de rabeig es realitza cap aigües amunt, en règim lent, i si és positiu cap aigües avall, en règim ràpid. El valor numèric d'aquest primer camp indica el pas d'integració en metres. El segon camp és el coeficient de pas emprat en el mètode de Newton-Raphson (1). Tot seguit s'indiquen les coordenades de les seccions inicials i finals del domini d'integració, que dependran de si s'integra en règim ràpid o règim lent. I per últim en el darrer camp es dona el valor de la condició de contorn, en la secció aigües avall per règim lent i en la secció aigües amunt per règim ràpid.

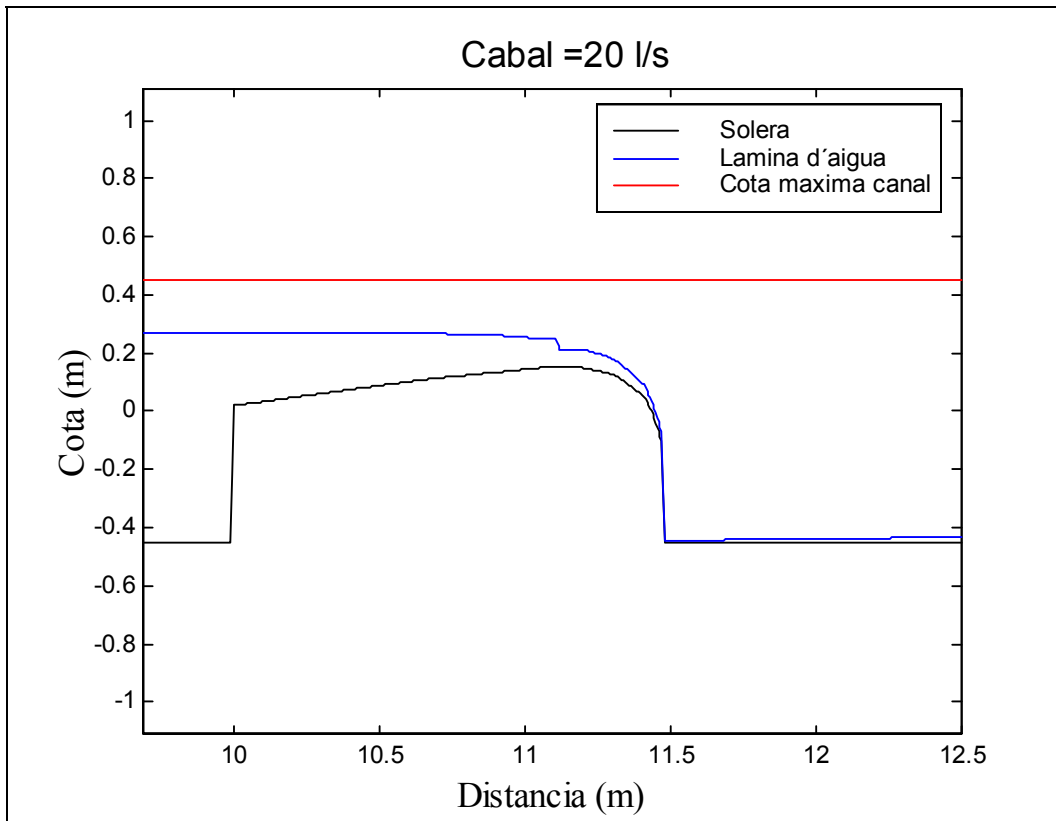
## **2.2. ESTRATÈGIA DE RESOLUCIÓ**

Com s'ha vingut comentant llargament en aquesta tesina el fluxe d'aigua per sobre de la superfície estudiada experimenta una caiguda per qualsevol valor de cabal, és a dir, es passa de règim lent a règim ràpid.

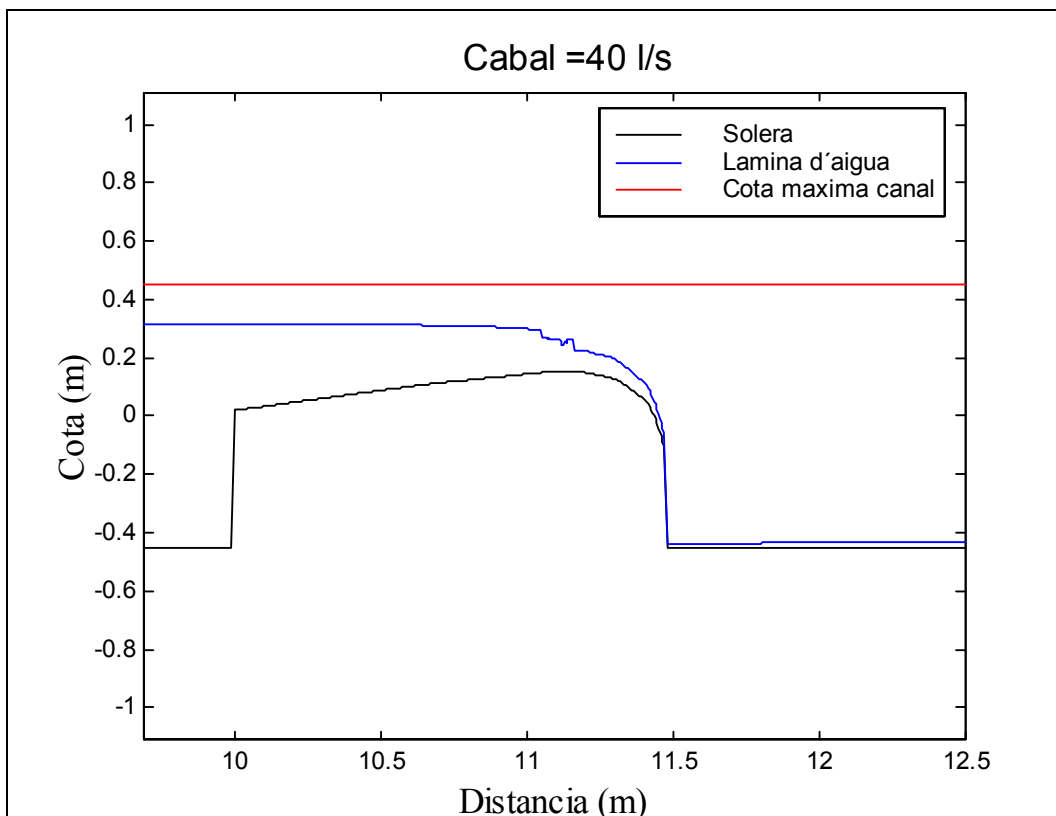
Malauradament el programa no és capaç d'integrar conjuntament tota la corba de rabeig. El règim crític és un règim totalment inestable. Matemàticament la determinació del pendent de la làmina d'aigua en règim crític resulta impossible perquè el denominador val 0. Aquest fet és un problema numèric greu i per tal d'evitar-lo el programa *Aguapucha* utilitza una estratègia que evita aquesta inestabilitat en el càlcul.

Si la integració es realitza en règim lent, és a dir, des d'aigües avall en cas que el calat calculat pel programa sigui inferior al crític el programa no el té en compte. La integració de la corba s'efectua a partir de calats superiors al crític, amb valors de Froude inferiors a 1. Per això la corba és incompleta. Igualment integrant en règim ràpid, des d'aigües amunt, les seccions amb calats superiors al crític tampoc són integrades. Gràcies a aquesta estratègia s'eviten les inestabilitats pròpies del règim crític, i convé idear un mètode de resolució que permeti integrar tota la corba de rabeig.

L'estratègia de resolució escollida en primer lloc ha consistit en executar el programa en règim lent, amb una condició de contorn aigües avall molt baixa. En l'arxiu de resultats *calado* es pot observar el punt exacte en què el règim comença a ser lent. Com s'ha explicat anteriorment només s'accepta aquest tram en règim lent. Seguidament s'executa el programa en règim ràpid, col·locant la condició de contorn just on es produeix el règim crític. Prenent els calats dels dos trams es pot dibuixar tota la corba de rabeig. Tot seguit es mostren les gràfiques elaborades utilitzant el programa *Matlab* per 20 i 40 l/s respectivament.



**a**



**b**

**Figura 7.2.1.** Corbes de rabeig integrades utilitzant el programa *Aguapucha*. La figura **a** correspon a un cabal de 20 l/s i la figura **b** correspon a un cabal de 40 l/s.

### **2.3. UTILITAT DEL PROGRAMA EN AQUEST ESTUDI**

- **Alçada de la banqueteta d'obra**

L'estudi realitzat amb el programa *Aguapucha* ha resultat de vital importància per aquesta tesina. Cal destacar que aquest estudi es va fer abans d'instalar el model a escala definitivament en el laboratori i aquest fet va condicionar decisivament aquest procés.

Per tal d'evitar la influència del fluxe aigües avall sobre el propi model es va decidir col·locar aquest sobre una banqueteta construïda sobre el canal. D'aquesta manera també es facilitaria el procés de presa de mesures. Així doncs, calia construir una banqueteta d'obra a la màxima cota possible sense que això no limités excessivament el cabal màxim que passés per sobre del model. Tal i com s'ha vist en el capítol 4 aquesta banqueteta té una alçada de 30 centímetres, perquè segons l'anàlisi realitzada en aquestes condicions hi podria circular un cabal de fins a 100 l/s, un valor més que suficient per l'estudi que s'ha dut a terme. En la següent taula es pot observar amb claretat les cotes d'aigua calculades en el canal abans d'arribar al model i en diversos punts de l'eix longitudinal d'aquest. El valor 0.45 m és el nivell màxim del canal.

$Q(m^3/s)$	<i>Secció calculada</i>						
	<i>canal</i>	<i>+0.00 m</i>	<i>+0.30 m</i>	<i>+0.60 m</i>	<i>+0.90 m</i>	<i>+1.20 m</i>	<i>+1.29 m</i>
<b>0.001</b>	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.166	0.141
<b>0.005</b>	0.211	0.211	0.211	0.211	0.208	0.180	0.156
<b>0.010</b>	0.236	0.236	0.236	0.235	0.231	0.198	0.169
<b>0.020</b>	0.270	0.270	0.269	0.268	0.261	0.213	0.186
<b>0.030</b>	0.295	0.294	0.294	0.292	0.285	0.235	0.206
<b>0.040</b>	0.316	0.315	0.314	0.312	0.305	0.224	0.201
<b>0.050</b>	0.332	0.331	0.330	0.327	0.320	0.235	0.212
<b>0.060</b>	0.343	0.344	0.341	0.338	0.329	0.266	0.236
<b>0.070</b>	0.355	0.354	0.353	0.349	0.339	0.260	0.235
<b>0.080</b>	0.368	0.365	0.364	0.359	0.349	0.277	0.249
<b>0.090</b>	0.380	0.376	0.374	0.369	0.358	0.252	0.230
<b>0.100</b>	0.391	0.386	0.384	0.379	0.367	0.277	0.253

**Taula 7.2.1.** Cotes de làmina d'aigua en metres per diferents cabals i en diferents seccions segons l'estudi realitzat amb el programa *Aguapucha*.

- **Absència de llit de graves**

En la figura 7.2.1. es pot observar amb claretat com el fluxe d'aigua experimenta una contracció molt sobtada al trobar-se el model a escala. Òbviament aquesta contracció no existiria si aquesta estructura s'utilitzés com a aforador ja que es pretén que la llera del riu sigui contínua. Com s'acaba de veure aquesta contracció simplement respon a facilitar el procés de presa de mesures i a evitar qualsevol possible influència del fluxe aigües avall del model.

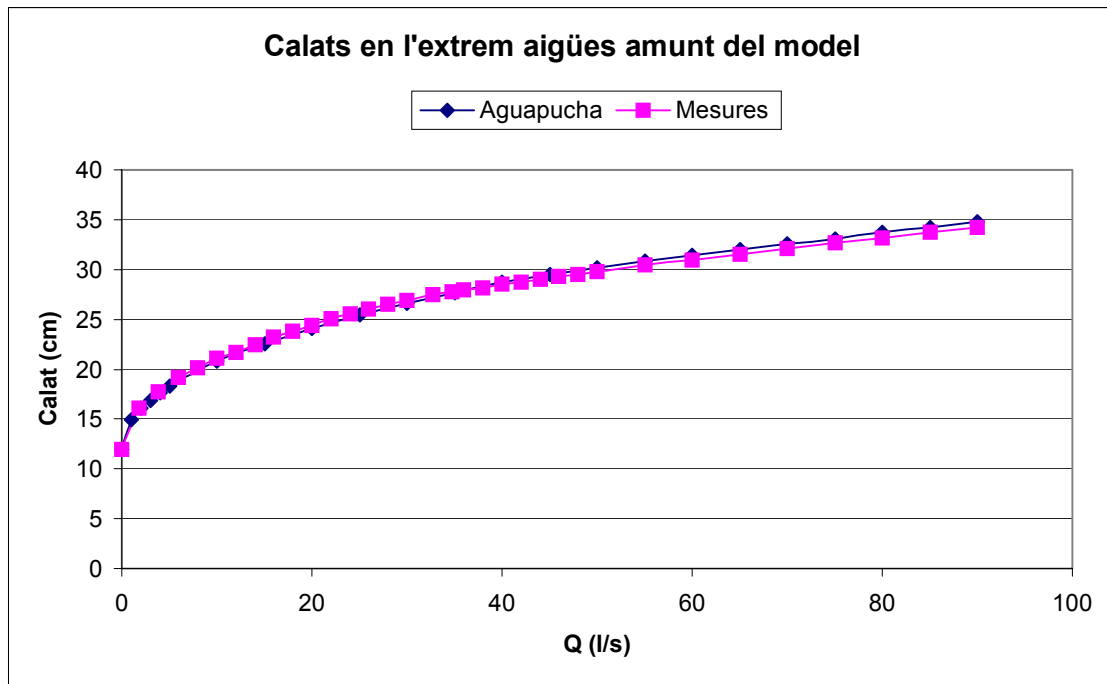
En un principi es va creure que la construcció de la banquetta requeriria omplir amb graves el fons del canal aigües amunt fins a la cota del model una certa distància per evitar que les línies de corrent experimentessin corbatures excessives irrealment en el prototipus. Aquest reompliment de graves, a més de suposar un esforç considerable, també significaria una complicació greu pel funcionament del model: el desguàs de fons no podria ser tapat o destapat des d'aigües amunt, la qual cosa significaria que la pressió d'aigua enlloc de contribuir a l'estanqueïtat del sistema no faria més que empènyer el tap cap enfora si aquest es col·loqués aigües avall.

Per tots aquests inconvenients abans de construir el desguàs de fons i d'idear un sistema eficaç per tapar-lo o destapar-lo segons convingui, s'han comparat els calats proporcionats pel programa *Aguapucha* considerant un llit de graves per eliminar la transició i sense considerar-lo. Com que en cap cas el programa proporciona valors de calats diferents fins als mil·límetres que és la precisió que dona el programa no ha calgut construir aquest llit de graves.

El fet que el fluxe no percep aquesta contracció i que per tant reproduceix correctament el que passaria en un hipotètic prototipus s'ha pogut constatar un cop el model va entrar en funcionament. D'aquesta manera es torna a posar de manifest la fiabilitat d'aquest programa.

#### **2.4. NIVELL DE PRECISIÓ I DEFICIÈNCIES DEL PROGRAMA**

Una vegada es va dur a terme la campanya de presa de mesures al laboratori es va poder verificar la fiabilitat del programa *Agupucha* per aquest estudi. En primer lloc es va poder comprovar com els calats d'aigua a l'entrada del model eren molt semblants als que s'havien previst en l'anàlisi numèrica. Com a partir d'aleshores els nivells d'aigua decreixen progressivament per efecte de la caiguda que s'origina, aquests valors són els que marquen si l'aigua arriba a sobresortir per sobre del canal o no. En el següent gràfic es poden observar aquestes cotes d'aigua segons el programa *Aguapucha* i segons les mesures efectuades. Com es pot observar fins a un valor de 50 l/s la diferència és mínima, com a màxim de pocs mil·límetres. A partir d'aleshores el programa sobrevalora lleugerament els calats, però en cap cas aquesta diferència és superior al centímetre. Així doncs es pot concloure que aquest programa ha resultat molt útil a l'hora de conèixer fins on es podria construir la banquetta d'obra.



**Figura 7.2.2.** Cotes d'aigua en l'extrem aigües amunt del model segons el programa *Aguapucha* i segons les mesures efectuadaes al laboratori.

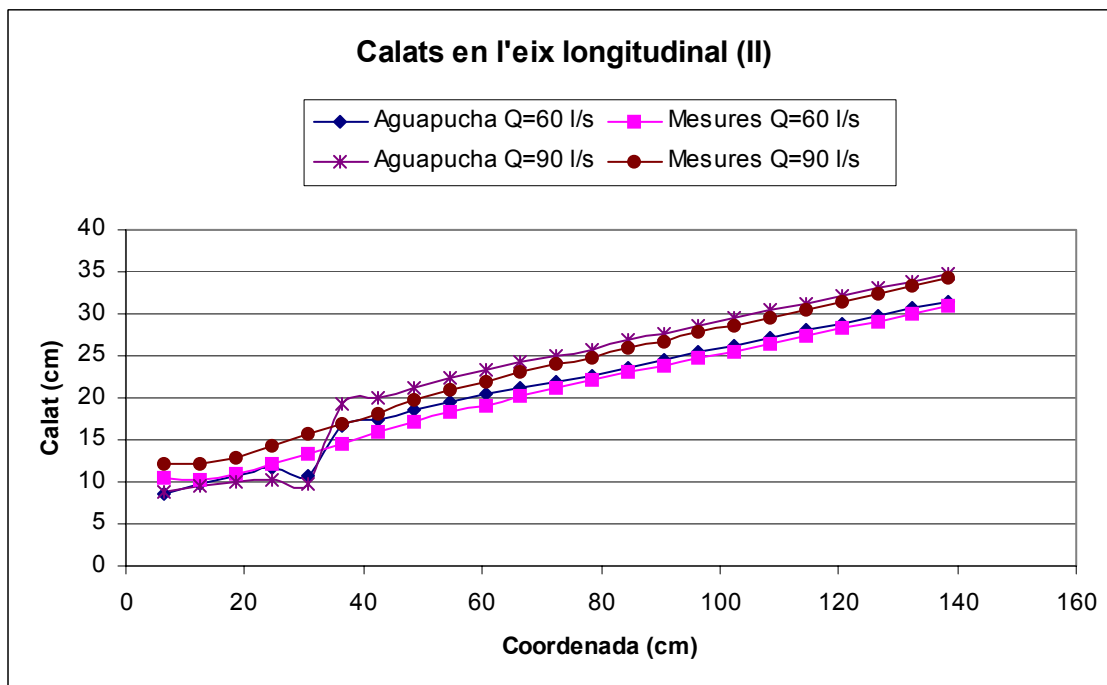
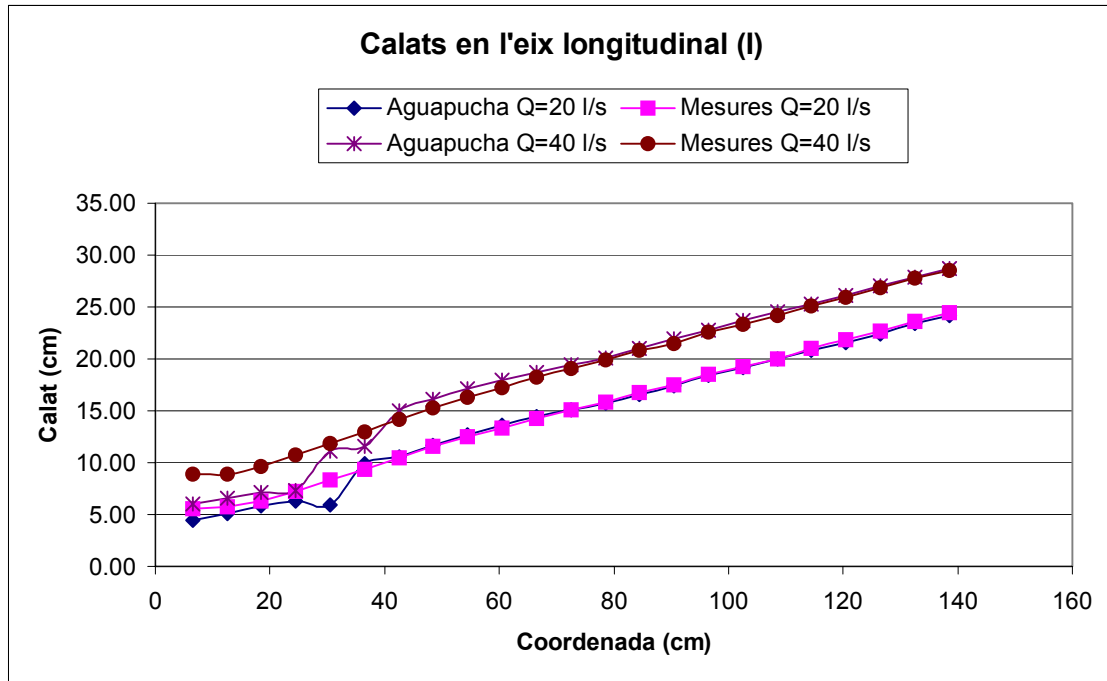
Pel que fa a la resta del model, també s'ha verificat si els resultats proporcionats pel programa s'ajusten bé a les mesures o no. En la figura 7.2.1. s'observa clarament com el programa indica que el fluxe s'instabilitza molt al voltant del règim crític. Les observacions al laboratori han mostrat com aquesta inestabilitat en cap cas apareix, per cap rang de cabals. En la següent fotografia es pot observar com la làmina d'aigua es va corbant progressivament per un cabal de 20 l/s.



**Fotografia 7.2.1.** Pèrdua gradual de calat al voltant del règim crític per un cabal de 20 l/s.

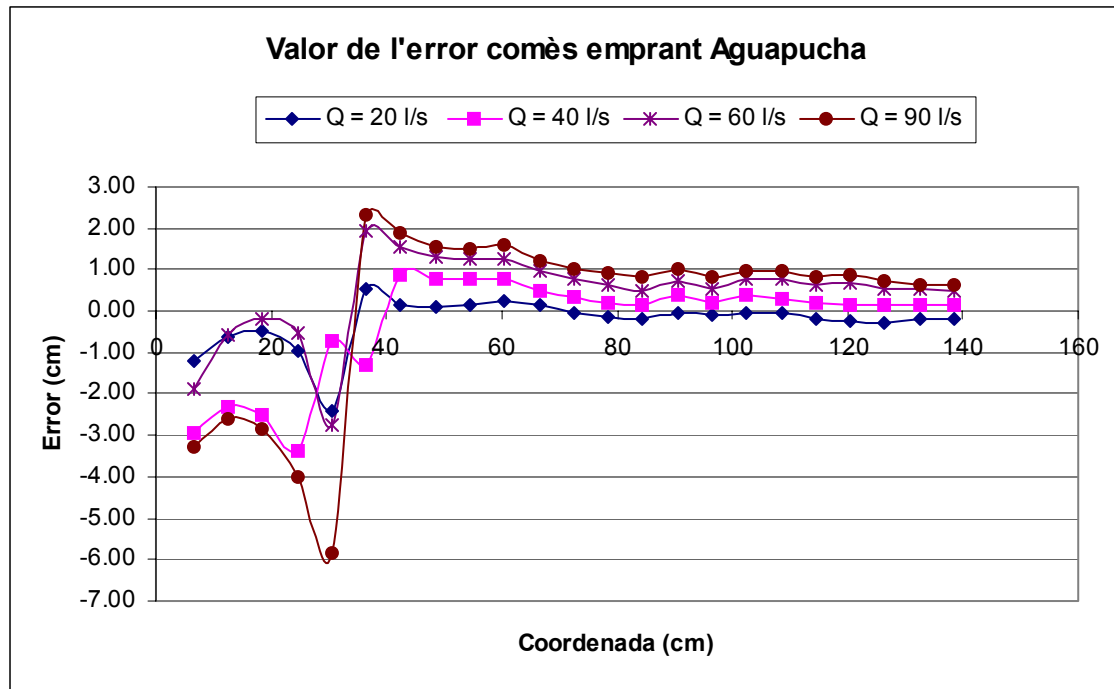
Així doncs, es pot concloure que el programa *Aguapucha* no reproduïx bé la zona propera al règim crític. Els forts pendents existents a partir d'aleshores tampoc

permeten obtenir uns resultats acurats a aquest programa ja que està concebut per pendents moderats. En les següents gràfiques es poden observar els bons resultats aportats pel programa lluny de la zona propera a l'aparició del règim crític per diversos valors de cabal.



**Figures 7.2.3.** Calats mesurats i calculats amb el programa *Aguapucha* per diversos cabals.





**Figura 7.2.4.** Error comès al calcular els calats d'aigua amb el programa *Aguapucha*. S'aprecia clarament com l'error augmenta en la zona del règim crític.

Per tal de poder reproduir correctament el fluxe en la zona propera al crític s'ha cregut convenient utilitzar un programa d'elaboració pròpia. La creació i utilització d'aquest programa es tractarà en el següent apartat.

Pel que fa a la precisió dels resultats obtinguts fora de la zona d'influència del règim crític cal catalogar-la com molt bona. En la majoria de punts mesurats l'error no supera els 2 mil·límetres, un valor prou bo si es tenen en compte les següents fonts que poden induir a error:

- Determinació imprecisa del cabal a l'aforador del laboratori.
- Pèrdues puntuals en el circuit seguit per l'aigua i filtracions no detectades.
- Impossibilitat d'introduir la geometria del model de forma analítica.
- Imprecisions en la construcció del model.
- Imprecisions en la col·locació del model sobre la banquetta d'obra.
- Errors en la mesures de calats de diversos tipus (sistemàtics, accidentals).

### **3. PROGRAMA D'INTEGRACIÓ DE CORBES DE RABEIG D'ELABORACIÓ PRÒPIA: EULER**

Un cop detectades les deficiències existents en el programa *Aguapucha* es va decidir treballar en *Matlab* per tal de crear un programa unidimensional capaç de solucionar en la mesura del possible aquestes mancances. Inicialment s'ha confeccionat

un programa unidimensional per canals rectangulars anomenat *Euler*. En el següent subapartat s'explica l'esquema de resolució emprat per aquest programa.

### **3.1. PROGRAMA EULER: PRINCIPI DE FUNCIONAMENT**

Per un cabal donat el calat crític de la secció rectangular és únic. Un cop aquest calat es determina el programa integra el fluxe emprant el mètode d'Euler tant en règim lent (donant una condició de contorn arbitrària aigües avall) com en règim ràpid (condició de contorn aigües amunt també arbitrària).

Per tal d'evitar inestabilitats amb el règim crític el programa introdueix una estratègia prou interessant. Imaginem que s'està integrant la corba en règim ràpid (anomenada *S* en el programa). El programa calcula el valor del pendent motriu, que multiplicat pel pas d'integració i sumat al calat del punt anterior dona el valor del calat en el punt analitzat. Si aquest calat és inferior al calat crític calculat, s'accepta. En cas contrari el valor del calat pres correspon a un lleugerament inferior al crític en un tant per cent molt petit. D'aquesta forma s'aconsegueix que aquesta corba estigui completament en règim ràpid i per això el règim crític no crea cap mena d'interferència. El mateix passa pel règim lent (corba *M*): per calats calculats de valor inferior al crític es pren un valor de calat lleugerament superior al crític, just el tant per cent anterior.

Un cop es disposa de les dues corbes, per tal d'integrar la corba de rabeig cal analitzar quina de les dues s'accepta en cadascun dels trams. El criteri és ben senzill: per cadascun dels punts integrats es pren el calat corresponent a la corba *M* o a la corba *S* segons quin sigui el valor de força específica més gran. D'aquesta forma es confecciona la corba de rabeig definitiva anomenada *Làmina Mixed*. L'expressió de la força específica és la següent:

$$F_E = Ay + \beta Q^2 / (gA) \quad (7.3.1)$$

On *F* és la força específica, *A* l'àrea d'aigua en la secció, *y* el centre de gravetat de la secció,  $\beta$  el coeficient de Boussinesq que es pren igual a 1, *Q* el cabal circulat i *g* l'acceleració de la gravetat.

Per últim el programa elabora 3 gràfics que donen tota la informació necessària referent a la integració de la corba de rabeig.

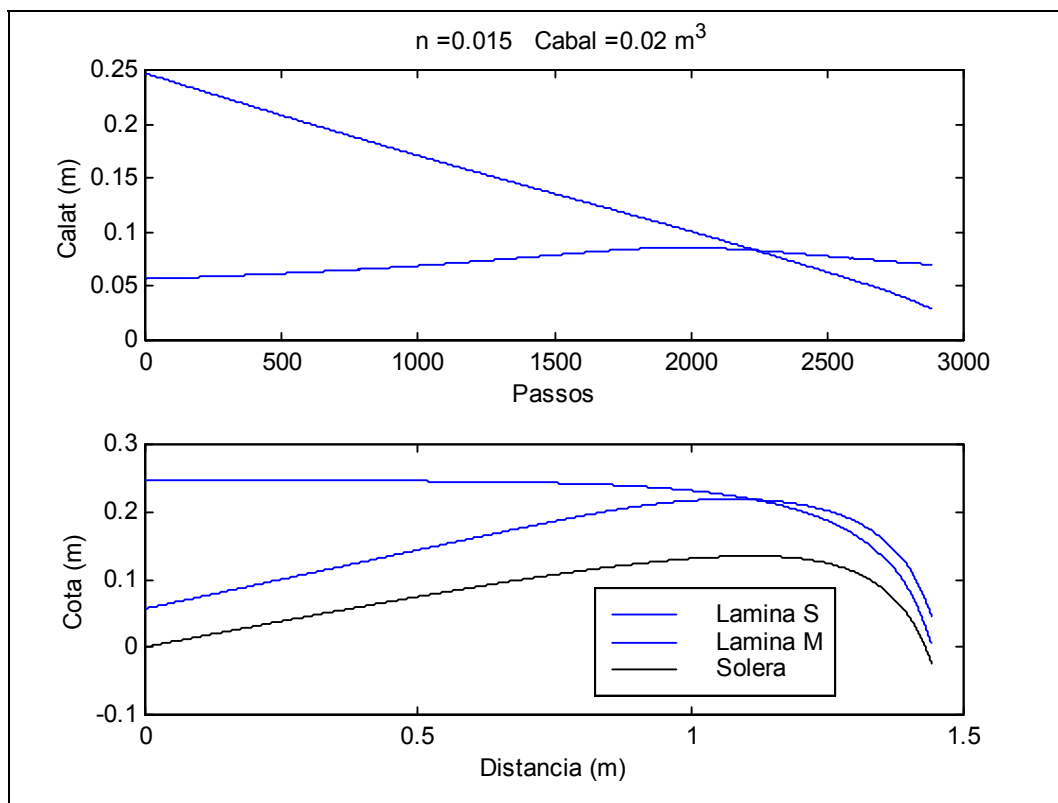
### **3.2. ADAPTACIÓ DEL PROGRAMA: ESTRUCTURA MODULAR**

Utilitzar el programa *Euler* en el cas que ens ocupa requereix d'una sèrie de modificacions. En la superfície a estudiar cada secció té unes propietats pròpies degut a la geometria canviant. La modificació essencial en el programa consisteix en permetre que aquest pugui calcular qualsevol de les propietats requerides per qualsevol secció en l'instant que calgui.

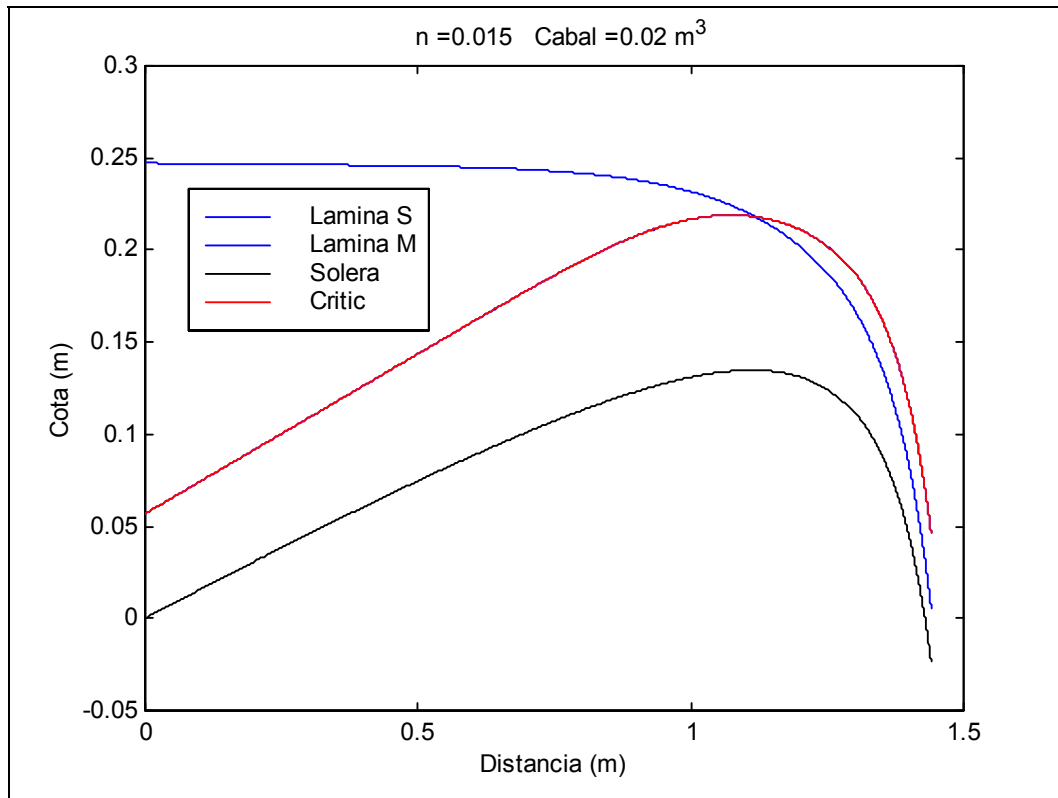
En primer lloc el calat crític variarà en cada secció i lògicament dependrà del cabal circulat. Per mitjà d'un procés iteratiu el programa calcula el calat crític en cada

secció resolent un zero de funcions. Un cop es disposa de la corba de calats crítics en tot el domini del model cal integrar les corbes *M* i *S* per tal de confeccionar la corba de rabeig definitiva *Lamina Mixed*.

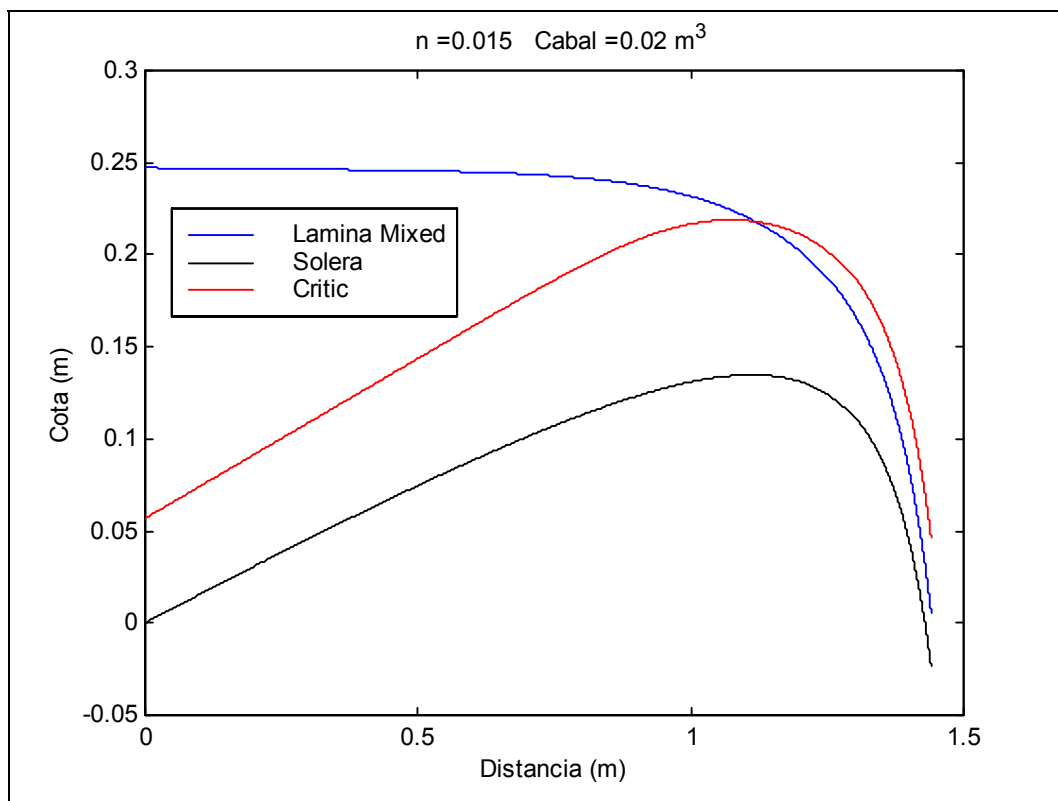
A fi d'integrar aquestes corbes el programa necessita conèixer en cada pas d'integració paràmetres com ara l'àrea d'aigua, el perímetre mollat, l'ample mollat, la derivada de l'àrea en funció de la coordenada longitudinal i el pendent del fons per tal de poder calcular el pendent motriu  $S_f$  i la força específic  $F_E$ . Com aquests càlculs s'han d'efectuar reiteradament s'ha cregut convenient escriure aquestes funcions en arxius externs en forma de *function* de tal forma que puguin ser cridades des del programa principal *Euler*, tenint així millor estructurat el programa. Aquesta forma d'organitzar el programa s'anomena **estructura modular**. Tot seguit es mostren els gràfics que elabora el programa un cop executat per un cabal de 20 l/s.



**Figura 7.3.1.** Calats i làmines *M* i *S* calculats pel programa *Euler* per un cabal de 20 l/s a escala no distorsionada.



**Figura 7.3.2.** Làmines *M* i *S* i corba de règim crític a escala distorsionada per un cabal de 20 l/s.



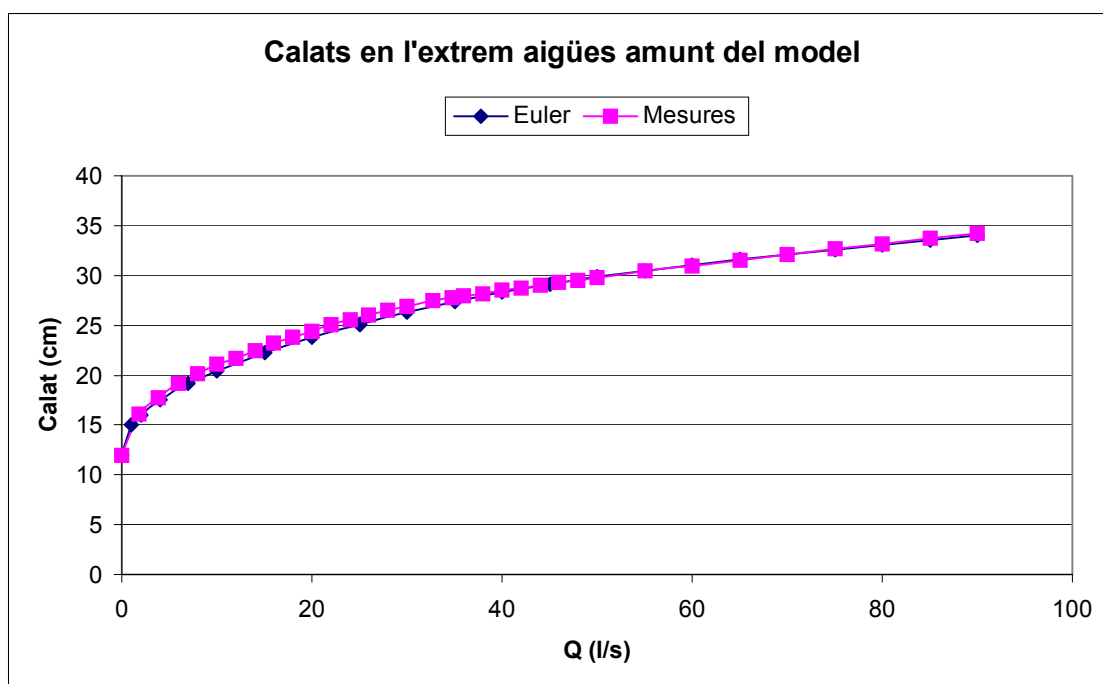
**Figura 7.3.3.** Làmina *Mixed* i corba de règim crític a escala distorsionada per un cabal de 20 l/s.

### 3.3. VALORACIÓ DELS RESULTATS

Tal i com s'ha fet pel programa *Aguapucha* es compararan els resultats obtinguts amb els resultats experimentals mesurats al laboratori. Tot i la precisió amb què s'han efectuat aquestes mesures no es pot garantir que siguin els valors de calat correctes, ja que estan afectats per un error el valor del qual es desconeix per complet. Malgrat tot es tracta d'uns valors de referència prou bons i sí permeten conèixer qualitativament la forma de la làmina d'aigua.

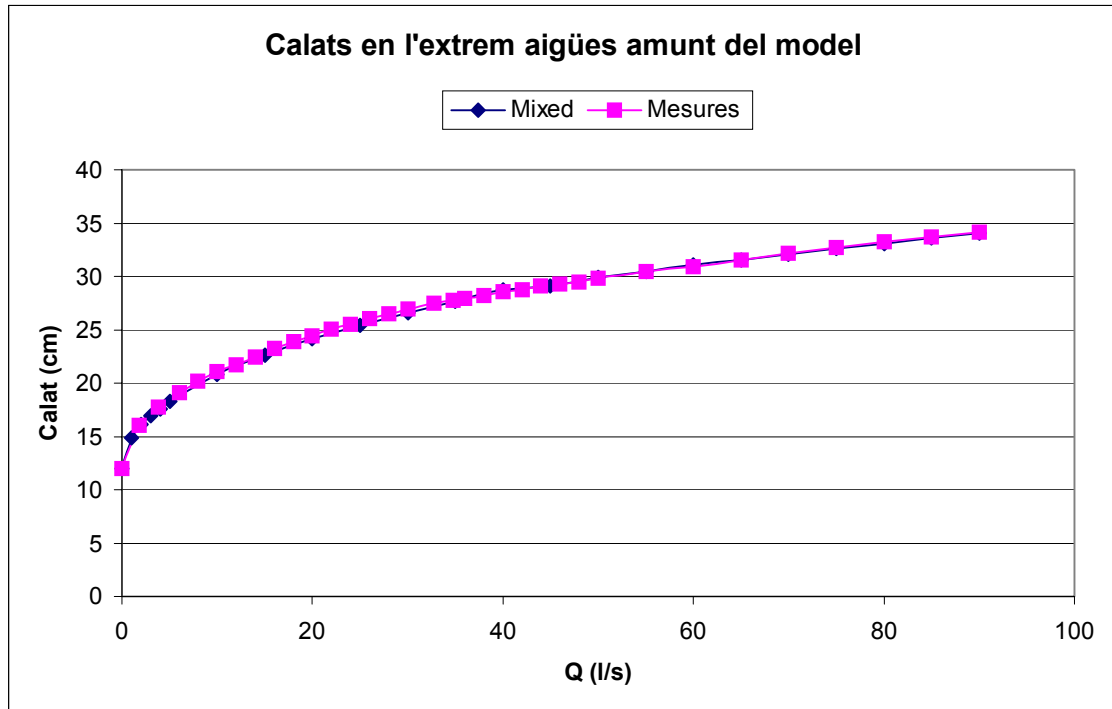
En primer lloc s'ha realitzat una anàlisi comparativa dels calats en l'extrem aigües amunt del model pel rang de cabals estudiat, tal i com es va fer pel programa *Aguapucha*. En la següent figura es pot observar amb claretat com per cabals reduïts el programa *Euler* dona uns valors de calat lleugerament inferiors als mesurats, mentre que a partir d'un cabal aproximat d'uns 40 l/s l'ajust és pràcticament perfecte. Per tal de poder valorar numèricament aquestes diferències s'han adjuntat les fulles d'Excel emprades per la confecció d'aquests gràfics en l'annex 2, on també es poden trobar els diferents arxius corresponents als treballs hidràulics d'aquesta tesina.

Malgrat que l'error comès per cabals petits es considera excessiu, els resultats mostrats en aquest gràfic són prou interessants. En l'apartat anterior s'ha pogut veure com el programa *Aguapucha* era molt útil per determinar els calats corresponents a cabals petits, fins a uns 40 l/s. A partir d'aleshores el programa sobrevalora els calats i per aquest motiu els resultats deixen de ser fiables. En canvi, els resultats fiables en el programa *Euler* apareixen justament a partir dels 40 l/s. Per tot el que s'acaba d'exposar s'assigna un rang de validesa a cadascun dels programes: programa *Aguapucha* fins a una cabal de 40 l/s i programa *Euler* per cabals superiors a 40 l/s.



**Figura 7.3.4.** Cotes d'aigua en l'extrem aigües amunt del model segons el programa *Euler* i segons les mesures efectuades al laboratori.

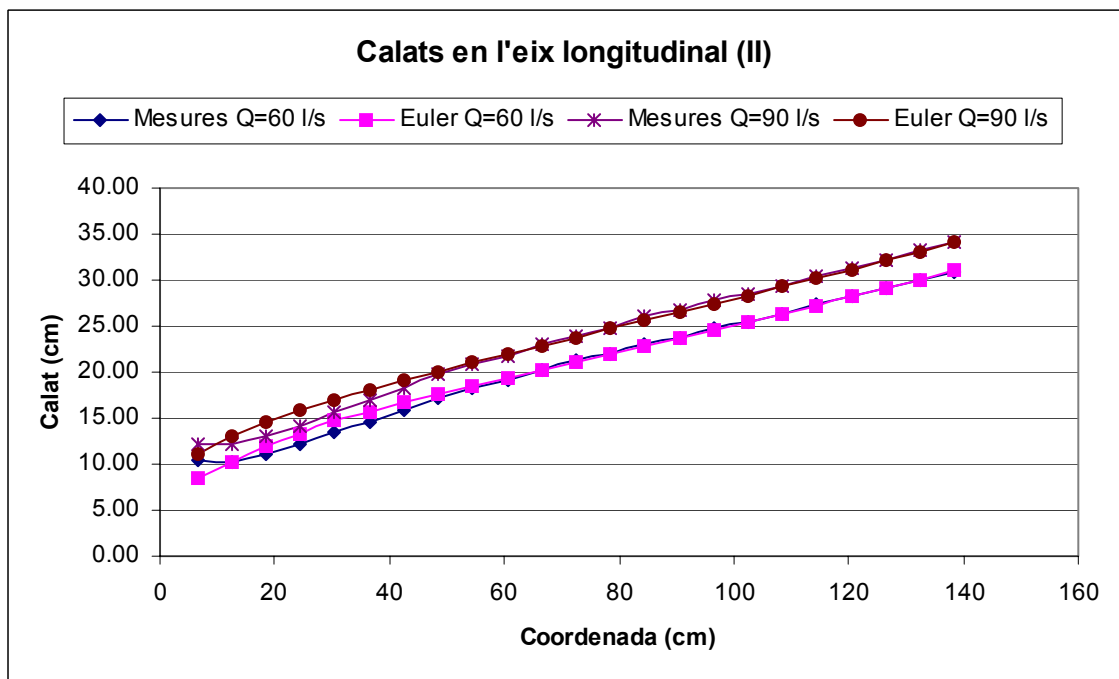
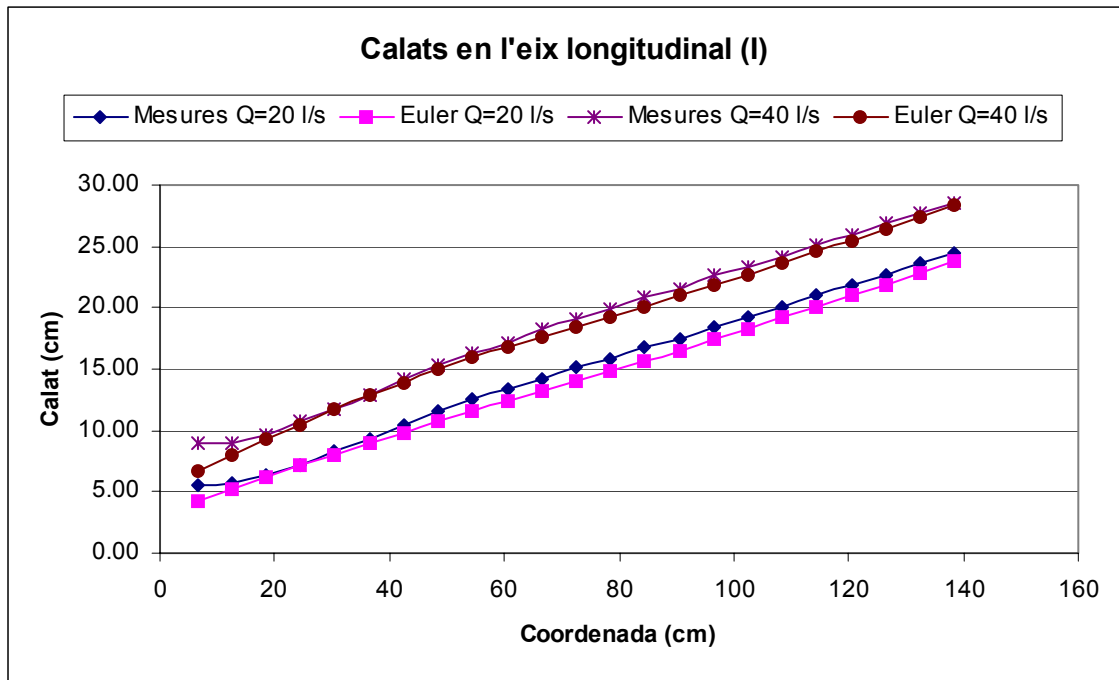
En la següent figura es representa el mateix gràfic comparatiu però utilitzant la corba obtinguda a l'unir les dues branques dels dos programes. A aquesta corba se l'anomena *Mixed*.



**Figura 7.3.5.** Cotes d'aigua en l'extrem aigües amunt del model segons l'anomenada solució *Mixed* i segons les mesures efectuades al laboratori.

En les dues següents gràfiques es comparen els calats d'aigua al llarg de tot l'eix longitudinal del model segons les mesures efectuades i segons els resultats proporcionats pel programa *Euler*. Tal i com s'acaba d'explicar els resultats milloren a mesura que el cabal augmenta. Malgrat tot, el programa tampoc és capaç de reproduir correctament la zona de caiguda. Com es pot observar en la figura 7.3.6. la corba experimental és pràcticament horitzontal en la zona de caiguda (valors de coordenada y petits), mentre que les corbes del programa *Euler* tenen aproximadament el mateix pendent en tot el domini.

Cal recordar que l'eix y té el seu origen en la zona de caiguda i adopta valors positius cap aigües amunt tal i com s'explica en el capítol 2.



Figures 7.3.6. Calats mesurats i calculats proporcionats pel programa Euler per diversos cabals.

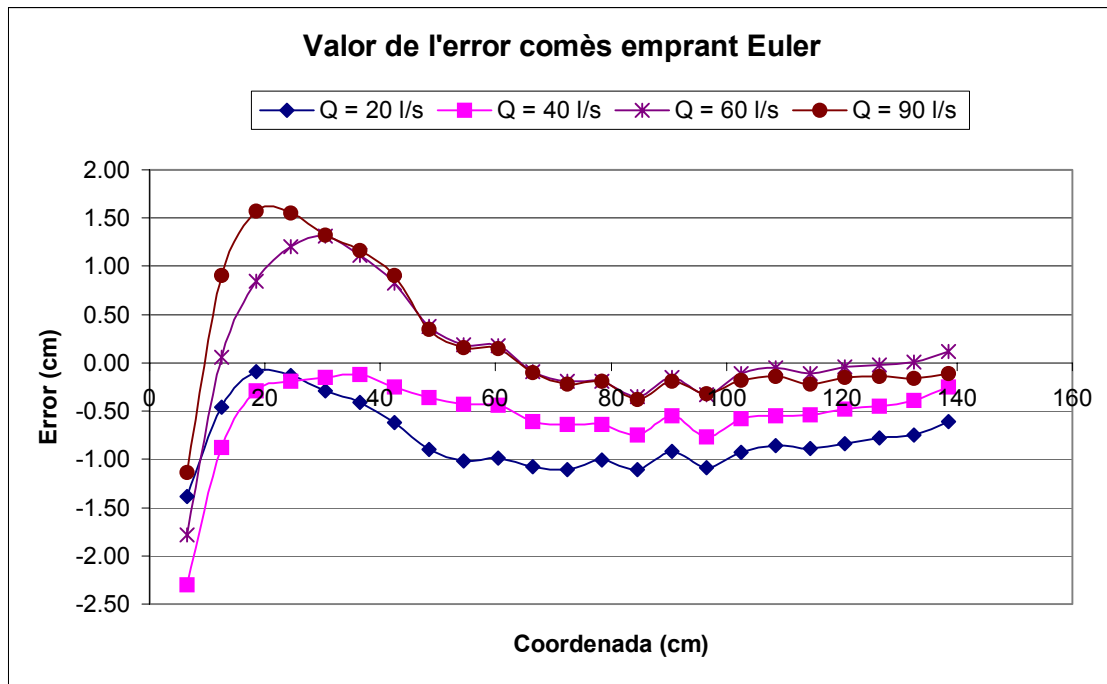


Figura 7.3.7. Error comès al calcular els calats d'aigua amb el programa Euler. S'aprecia clarament com l'error augmenta en la zona de la caiguda.

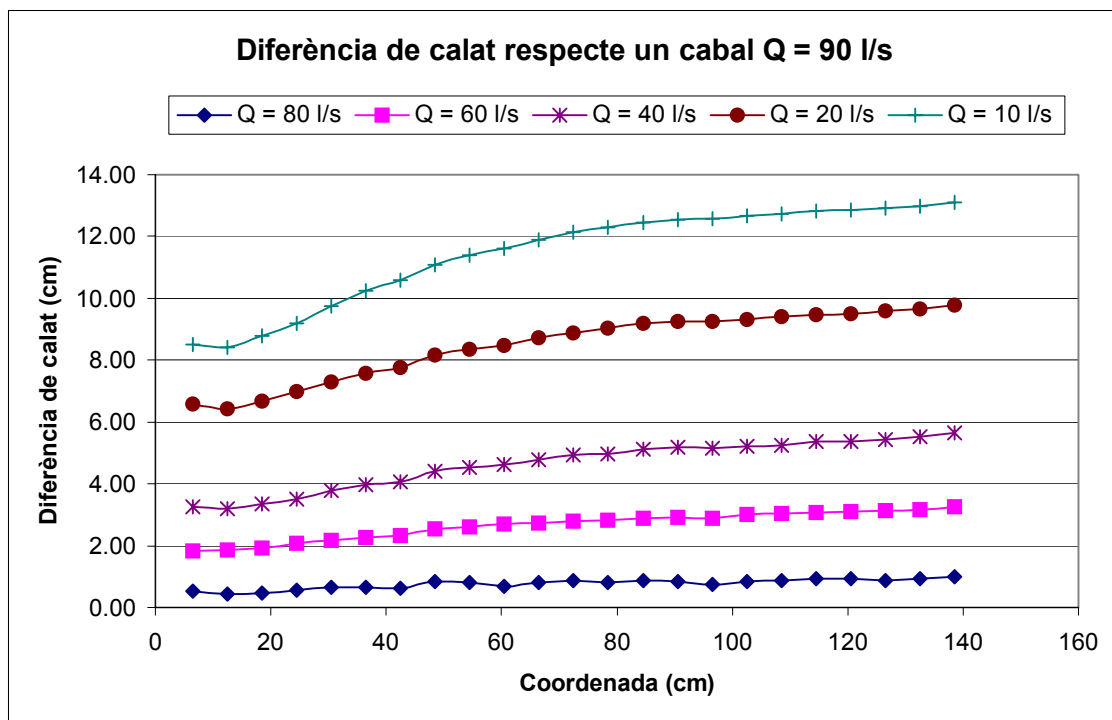


Figura 7.3.8. Diferències de calats mesurats per diferents cabals respecte un cabal de 90 l/s.

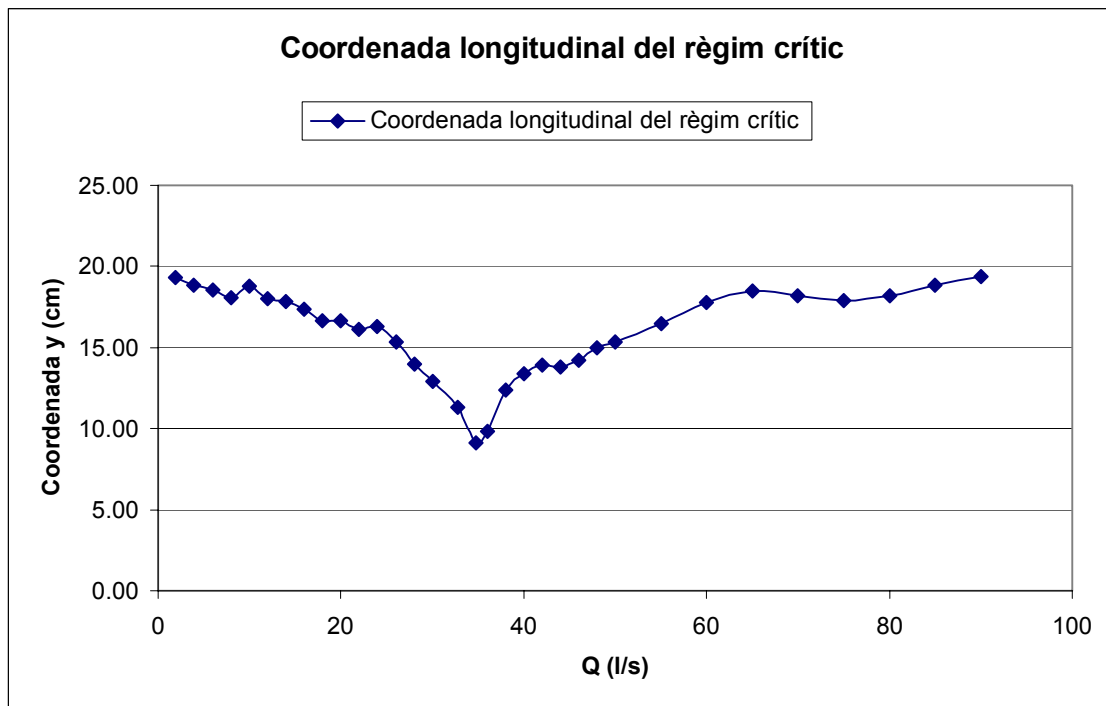


### **3.4. DETERMINACIÓ DEL RÈGIM CRÍTIC**

Com s'ha plantejat en el capítol anterior, la posició de la secció on es produeix el règim crític en funció del cabal circulant és una qüestió de gran complexitat en qualsevol sistema d'aforador. En la zona corresponent a la caiguda d'aigua les línies de corrent adopten corbatures molt brusques i això fa que les pressions siguin desconegudes. D'aquesta manera, si bé es considera la hipòtesi que el crític es forma en la secció de caiguda, aquesta simplificació no s'ajusta a la realitat.

Per tal de conèixer amb detall aquest fenomen en l'aforador estudiat s'han aprofitat les dades experimentals i els resultats numèrics. Com s'acaba de veure els calats proporcionats pel programa *Euler* no són prou bons en la zona propera al crític, mentre que la corba crítica que s'observa a la figura 7.3.3. sí que s'accepta. Com es disposa d'un gran nombre de corbes de rabeig obtingudes de forma experimental, s'han trobat les interseccions d'aquestes corbes de rabeig amb les corbes crítiques corresponents de forma numèrica, obtenint així la posició del calat crític per un gran rang de cabals.

En la següent figura es poden observar els resultats obtinguts. Fins als 34.77 l/s la posició del règim crític avança cap a aigües avall uns 10 centímetres. A partir d'aleshores un augment en el cabal suposa que el crític retrocedeixi cap aigües amunt. Curiosament pel cabal màxim estudiat (90 l/s) el crític es troba a 0.7 mil·límetres del crític corresponent al cabal mínim analitzat (1.861 l/s). Tot i aquesta tendència general la corba presenta diverses fluctuacions difícils de preveure, que permeten entendre la gran complexitat del fenomen estudiat.



**Figura 7.3.9.** Posició de la secció on es forma el règim crític en el model reduït pel rang de cabals estudiat.

#### **4. CONCLUSIONS DE L'ESTUDI UNIDIMENSIONAL**

Un cop efectuat l'estudi unidimensional del fluxe utilitzant els programes *Aguapucha* i *Euler* i havent valorat els seus rangs de validesa respectivament, ja es disposa d'arguments suficients per valorar si aquestes eines informàtiques poden ser útils o no.

Bàsicament es poden extreure 3 conclusions clares:

- En un domini suficientment allunyat del règim crític el programa *Aguapucha* proporciona uns valors de calat molt bons per cabals reduïts, de fins a 40 l/s. Per cabals superiors aquesta bondat d'ajust es perd de forma considerable i es rebutgen els resultats. El motiu d'aquesta pèrdua de precisió podria ser que el programa no valora prou la fricció amb les parets laterals. Per contra, el programa *Euler* facilita resultats millors a partir d'aquests 40 l/s, possiblement perquè per cabals petits la interacció amb el fons és major i el programa no és capaç de reproduir-la correctament. Aquest problema desapareix amb cabals més grans.
- Pels seus dominis d'acceptació es considera que els dos programes són **complementaris**, és a dir, cadascun és vàlid per un rang de valors però no per l'altre. Cal recordar que aquests rangs de validesa quant a cabals només són certs en una zona suficientment allunyada del règim crític. L'anàlisi de les dades obtingudes permet valorar que aquesta zona correspon als **100 primers centímetres del model**. D'aquesta manera per un cabal qualsevol i per una secció pertanyent a aquest domini un dels dos programes proporciona de manera directa una velocitat mitja de la secció que s'accepta com a bona sense necessitat de recórrer a les mesures efectuades al laboratori.
- La zona corresponent a la caiguda del fluxe no és reproduïda correctament per cap dels dos programes utilitzats. Les components verticals del fluxe adopten una gran rellevància degut als forts pendents del model: el fluxe s'accelera gràcies a l'efecte de la gravetat, la qual cosa dificulta l'anàlisi numèrica del problema.. Aquesta dificultat en la predicció es veu accentuada per la singularitat de les formes estudiades. Així doncs, la zona en que es passa ràpidament de règim subcrític a supercrític només pot ser estudiada a partir de les mesures efectuades al laboratori.

#### **5. ESTUDI TRIDIMENSIONAL.**

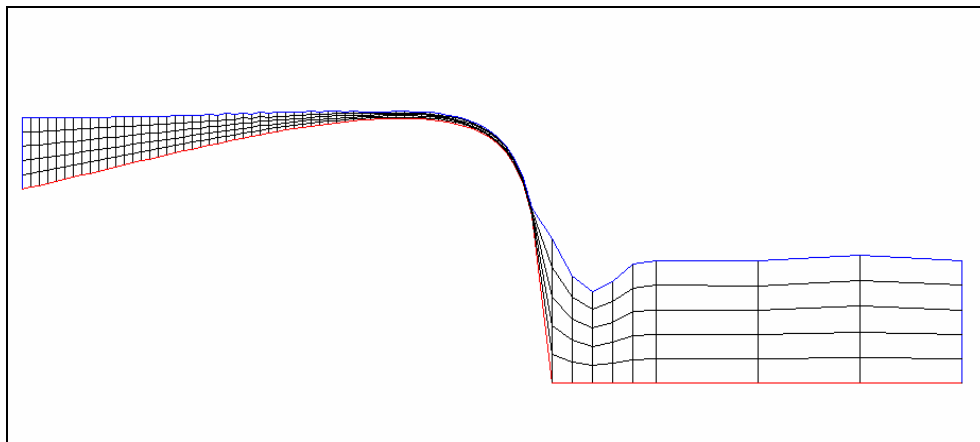
La gran influència de l'acceleració de la gravetat en aquest model fruit dels forts pendents existents en la zona de caiguda explica la necessitat de realitzar un estudi tridimensional del fluxe.

A fi de realitzar aquest estudi inicialment s'ha utilitzat el programa SSIIM en la seva primera versió (**S**imulation of **S**ediment **M**ovement **I**n **W**ater **I**ntakes with

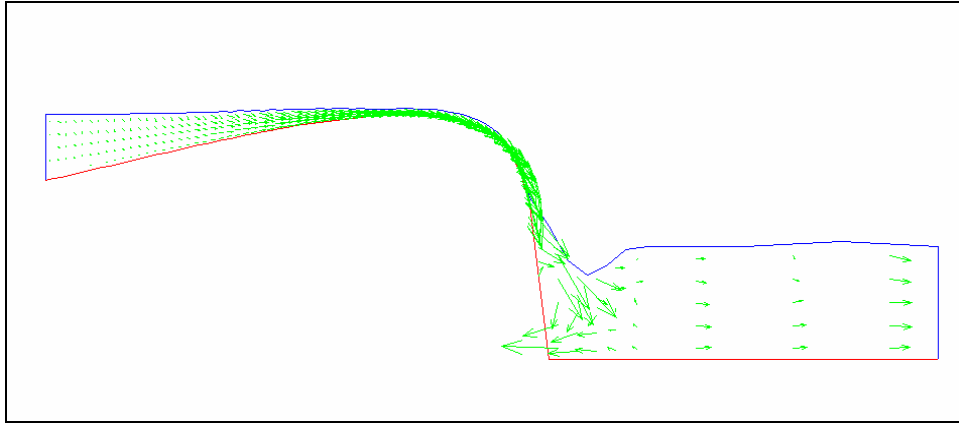
Multiblock option). Aquest programa és un dels més emprats en Mecànica de Fluïds, i ha pogut ser utilitzat gràcies al manual d'ús proporcionat pel propi autor [5]. Pel fet que aquest fluxe estigui marcadament influenciat per *fenòmens turbulents* és necessari utilitzar les equacions de *Reynolds* enlloc de les de *Navier-Stokes* per tal d'integrar els camps de velocitat i pressions, i això és justament el que fa aquest programa. Per tal d'integrar aquestes equacions SSIIM utilitza un *model  $\kappa$ - $\epsilon$* . A mode de resum, es podria dir que la consideració de turbulència suposa la introducció de més incògnites. A fi de plantejar un sistema d'equacions resoluble s'introdueixen les equacions de difusió d'energia cinètica ( $\kappa$ ) i de difusió de dissipació viscosa ( $\epsilon$ ), les quals, juntament amb les equacions de Reynolds donen lloc a un sistema de 6 equacions i 6 incògnites (les tres components de la velocitat, el camp de pressions, l'energia cinètica  $\kappa$  i la dissipació viscosa  $\epsilon$ ).

### 5.1. SSIIM 1

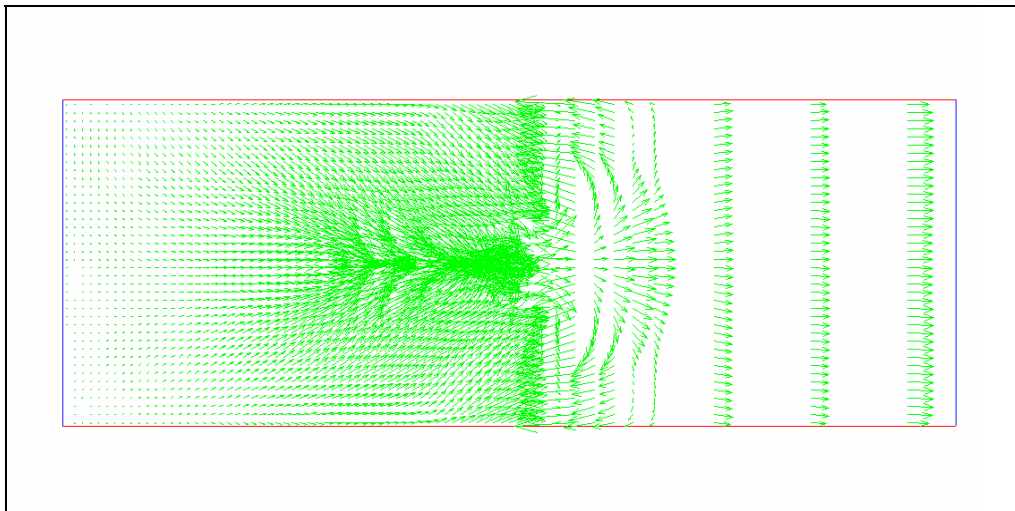
A partir de les condicions inicials introduïdes el programa modifica iterativament el valor dels 6 camps a resoldre en cadascun dels volums infinitessimals en que es divideix el domini procurant arribar a la convergència de les equacions en totes aquestes cel·les. Malauradament el programa no ha arribat a convergir tot i les nombroses modificacions realitzades. Tot i així, abans que el programa divergís definitivament s'han extret els gràfics proporcionats per un cabal de 30 l/s.



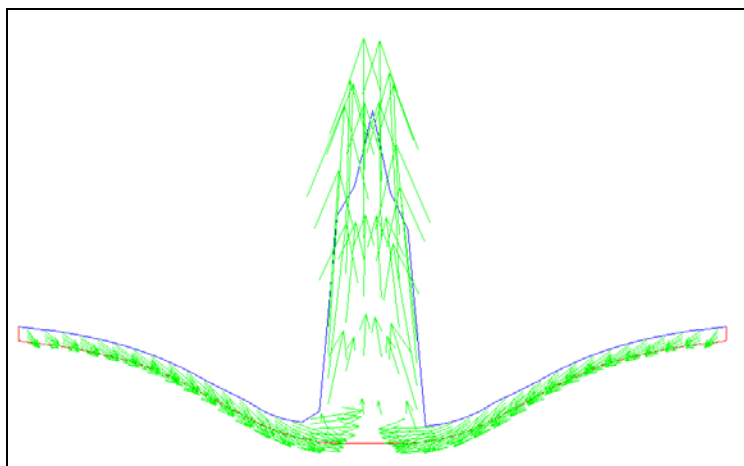
**Figura 7.5.1.** Malla vertical utilitzada pel programa SSIIM 1.



**Figura 7.5.2.** Visualització del camp de velocitats proporcionats pel programa SSIIM 1 en el perfil central just abans d'assolir la divergència numèrica.



**Figura 7.5.3.** Visualització del camp de velocitats proporcionats pel programa SSIIM 1 en planta just abans d'assolir la divergència numèrica.



**Figura 7.5.4.** Visualització d'una secció transversal proporcionada pel programa SSIIM 1 en la zona de caiguda.

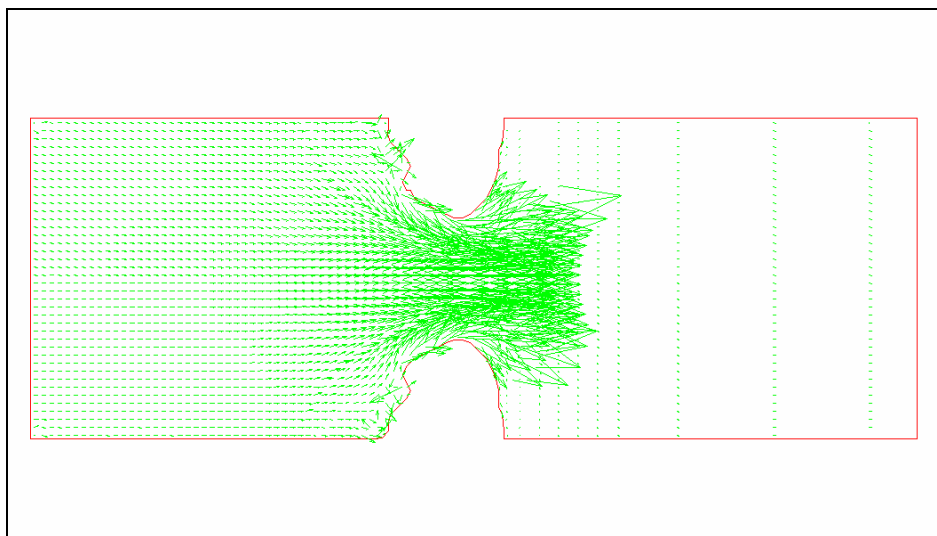
Si bé és cert que els resultats obtinguts són prou interessants, presenten una deficiència greu que obliga a descartar-los. En primer lloc tant la forma de la corba de rabeig com la planta de velocitats mostrades en les figures 7.5.2. i 7.5.3. respectivament, reproduïxen bé la convergència que el fluxe experimenta en la caiguda degut a la seva peculiar morfologia.

Tot i això, els resultats obtinguts experimentalment indiquen que per aquest cabal existeix una zona del model completament seca, i el programa no és capaç de reproduir-la. Per il·lustrar aquesta deficiència s'ha inclòs la figura 7.5.4 corresponent a una secció en la zona de caiguda. En la part central els resultats són prou bons ja que qualitativament reproduïxen els calats mesurats al laboratori. En canvi, la part que hauria d'estar completament seca està coberta per una pel·lícula d'aigua de pocs centímetres. Això és així perquè el programa SSIIM 1 no disposa d'un algoritme de secat de cel·les adient.

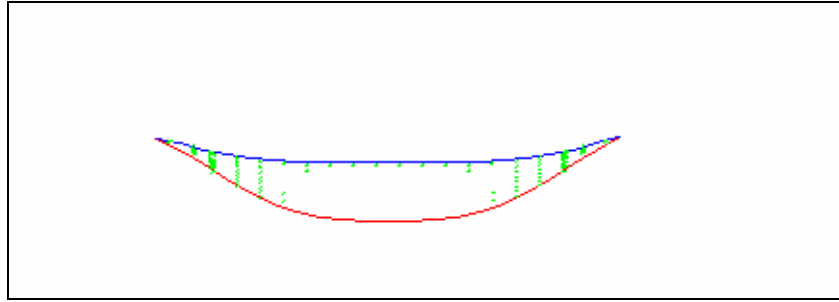
Per aquest motiu s'ha descartat l'ús del programa SSIIM 1, senzillament perquè el no secat de les cel·les es considera una deficiència greu per aquest problema concret. Per tal de resoldre aquesta mancança es va decidir treballar amb la segona versió d'aquest mateix programa, el SSIIM 2 que permet implementar de forma més eficient el secat de les cel·les.

## **5.2. SSIIM 2**

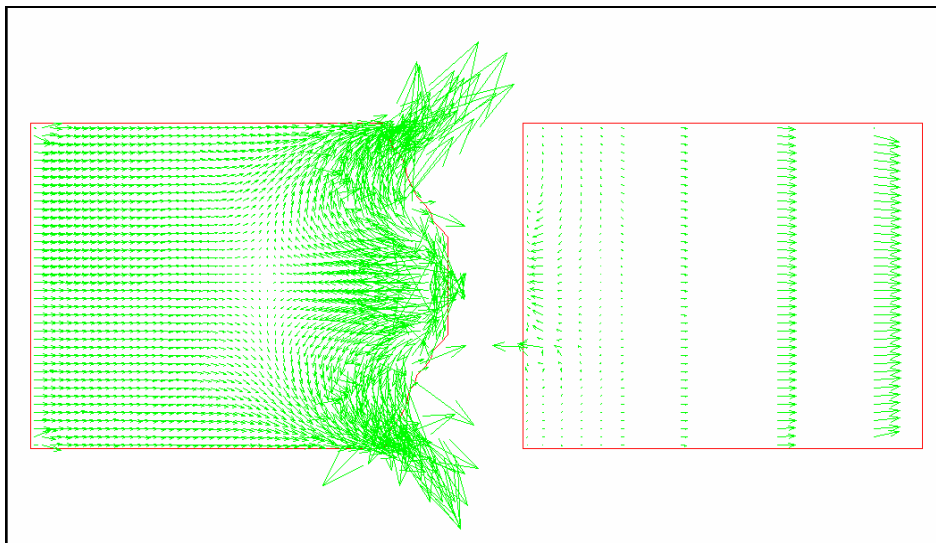
El principi de funcionament d'aquesta versió del programa és molt similar a l'anterior. La diferència essencial és que cal implementar l'algoritme de secat de cel·les. Malauradament, tot i aquesta millora del programa l'algoritme de càlcul és menys potent que l'anterior amb la qual cosa tampoc ha estat possible arribar a la convergència numèrica del problema. Tot seguit es mostren diverses figures obtingudes novament per un cabal de 30 l/s.



**Figura 7.5.5.** Visualització del camp de velocitats proporcionats pel programa SSIIM 2 en planta just abans d'assolir la divergència.



**Figura 7.5.6.** Visualització d'una secció transversal proporcionada pel programa SSIIM 2 en la zona de caiguda.



**Figura 7.5.7.** Visualització del camp de velocitats proporcionats pel programa SSIIM 2 en planta un cop el programa divergeix.

En la figura 7.5.5. es pot observar com el programa és capaç de distingir perfectament el domini sec del mollat. A més la convergència física del fluxe qualitativament és prou bona i el domini sec té una extensió molt similar a la que s'ha observat al laboratori. Aquesta capacitat de secat que té el programa també s'aprecia en la figura 7.5.6. on es pot distingir amb claretat on s'acaba la secció mollada.

Tot i aquestes millores tan importants introduïdes el programa no és capaç d'arribar a la convergència numèrica trencant-se la continuïtat del fluxe. Aquest fenomen es posa de manifest en la figura 7.5.7.

### **5.3. CONCLUSIONS**

La impossibilitat d'assolir convergència numèrica emprant el programa SSIIM per la gran complexitat que presenta aquest fluxe implica que l'anàlisi unidimensional proporcioni resultats més útils que el tridimensional. És previsible que amb l'avanç dels mètodes numèrics aplicats a l'Enginyeria Hidràulica la situació es reverteixi, és a dir, que els fluxes tridimensionals puguin ser reproduïts correctament de forma numèrica.