

## 6. COMPROVACIONS NUMÈRIQUES

### 6.1. Introducció

En aquest capítol es compararan els resultats obtinguts experimentalment, i el patró de repartiment extret d'aquests, amb resultats obtinguts mitjançant la simulació amb dos models numèrics. En la primera part s'ha treballat amb un model unidimensional en permanent que calcula la distribució de cabals en un encreuament mitjançant el principi de conservació de l'energia, similar als emprats per resoldre nusos de canals. S'han comparat els resultats amb el patró de repartiment obtingut dels resultats experimentals, i es proposen les mesures correctores necessàries per adaptar el model.

En la segona part s'han comparat alguns casos significatius amb els resultats obtinguts de la simulació amb un model 2-D, anomenat CARPA, desenvolupat per Ernest Bladé en la seva tesi doctoral. En aquest cas l'objectiu ha estat analitzar si els resultats són semblants, i també entendre millor alguns fenòmens que s'observaren al dispositiu experimental com ara la recirculació de flux als canals de sortida.

### 6.2. Ajust del model basat en la conservació de l'energia als resultats obtinguts

#### 6.2.1. Descripció de la metodologia emprada

El codi ha estat programat en FORTRAN, i reproduïx el dispositiu experimental, amb dos carrers d'entrada de 2 metres de longitud i 1.5 metres d'amplada, dos de sortida de 5 metres de longitud i igual ample i un nus o encreuament. Es tracta d'un model en permanent i unidimensional, de tal manera que per a cada secció es considera un sol punt representatiu. Per al càlcul del flux als carrers, tant d'entrada com de sortida, es suposa moviment permanent gradualment variat, i es resol l'equació de Saint-Venant simplificada, coneguda com a equació de les corbes de rabeig (equació 6-1). És cert que el que s'observa a la realitzat dista molt d'acomplir les hipòtesis de Saint-Venant, sobretot pel que fa a uniformitat de velocitats, però al tractar-se de carrers de petites longituds l'error comès no és significatiu.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{i - I}{1 - Fr^2} \quad (6-1)$$

Aquesta equació s'ha resolt mitjançant el mètode de Rungge-Kutta de quart ordre. És un mètode d'integració directa la formulació del qual es descriu a continuació. Disposem d'una equació a resoldre i d'una condició de contorn:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y); y(x_0) = y_0 \quad (6-2)$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0} = f(x_0, y_0)$$

Aleshores, donada una discretització del domini  $x$  en intervals  $\Delta x$ , es descriuen les següents variables instrumentals:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= f(x_i, y_i) \\
 K_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_1\Delta x\right) \\
 K_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_2\Delta x\right) \\
 K_4 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_3\Delta x\right)
 \end{aligned}
 \tag{6-3}$$

Amb aquestes variables es pot aproximar el valor del calat,  $y$ , al següent punt de la malla segons l'equació:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)\Delta x \tag{6-4}$$

Així, a partir d'una condició de contorn aigües avall (donat que es tracta de flux en règim subcrític), es poden anar calculant els calats en successius punts fins arribar al l'entrada del carrer. La condició de contorn aigües avall pot ser de molts tipus: calat, vessador, número de Froude, etc. En aquest cas s'ha treballat amb números de Froude donat que a l'anàlisi experimental de l'apartat 5.4 s'ha conclòs que aquesta és la variable aigües avall que millor determinava la distribució de cabals.

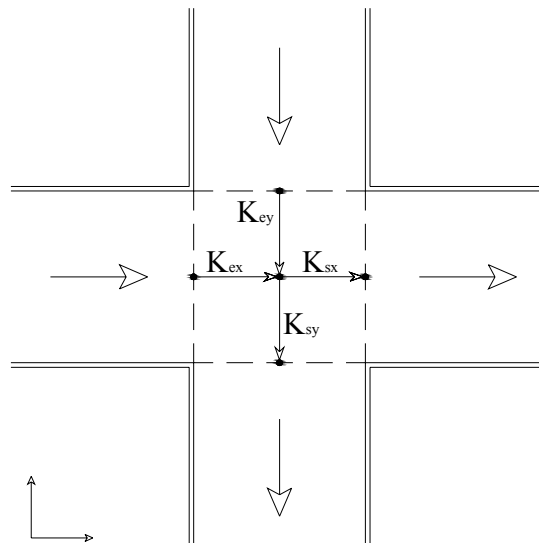
El tractament del nus s'ha abordat d'una manera similar a la proposada per Chaudhry (1993), explicada a l'apartat 2.4. Coneguda la condició de contorn aigües avall a cadascun dels dos carrers de sortida, en forma de calats o números de Froude al darrer punt de la discretització, i les condicions de contorn aigües amunt als canals d'entrada, en forma de cabals, es suposa una distribució de cabals als carrers de sortida, de tal manera que són coneguts els cabals a tots els punts del sistema. Amb aquests cabals i la condició aigües avall s'integra la corba de rabeig a cadascun dels carrers de sortida, obtenint els calats, i en conseqüència l'energia total, a la primera secció d'aquests carrers. Es considera un nivell d'energia fictici al centre del nus, i unes pèrdues de càrrega localitzades (definides per uns coeficients  $K_x$ ,  $K_y$ ) des d'aquest punt fins a l'inici de cadascun dels carrers (figura 6-1).

Aleshores, coneixent les energies totals i les velocitats a la primera secció dels carrers de sortida, i suposats uns coeficients de pèrdua de càrrega, es determinen dos nivells d'energia al centre del nus, corresponents a les dues direccions:

$$\begin{aligned}
 H_{nx} &= y_{sx} + \frac{v_{sx}^2}{2g}(1 + K_x) \\
 H_{ny} &= y_{sy} + \frac{v_{sy}^2}{2g}(1 + K_y)
 \end{aligned}
 \tag{6-5}$$

Segons el principi de conservació de l'energia aquest dos valors han de ser iguals; si no ho són, es proposa una nova distribució de cabals als carrers de sortida i es repeteix el procediment. La distribució de cabals correcta serà aquella que iguali els dos nivells d'energia. Conegut el nivell d'energia al nus, i suposant unes pèrdues de càrrega a l'entrada d'aquest ( $K_{ex}$  i  $K_{ey}$ ), es pot determinar el calat a la darrera secció dels carrers d'aproximació. Integrant les

corbes de rabeig als quatre carrers (donat que els cabals circulants i els calats a la darrera secció de cadascun són coneguts) es poden trobar les condicions del flux a tots els punts de la malla.



**Figura 6-1.** Esquema detallat de l'encreuament, amb els corresponents coeficients de pèrdua de càrrega.

### 6.2.2. Comparativa dels resultats obtinguts

Per tal de comprovar fins a quin punt s'ajusten els resultats obtinguts mitjançant l'aplicació d'aquest model al patró determinat durant l'anàlisi experimental, s'han executat en primer lloc alguns casos significatius de la campanya experimental. S'han escollit casos amb cabals als carrers d'entrada equilibrats (assaigs 6, 12 i 17), casos amb porcions de cabal d'entrada en direcció  $x$  molt alts (assaigs 13, 29 i 30), i, en contraposició, casos on la majoria del flux entra per la direcció  $y$  (casos 21, 22 i 23). Tots els casos s'han executat suposant les pèrdues de càrrega al nus nul·les en ambdues direccions, tant a l'entrada com a la sortida de l'encreuaments ( $K_{ex}=K_{ey}=K_{sx}=K_{sy}=0$ ).

A la taula següent es mostren els cabals de sortida obtinguts mitjançant el model unidimensional i segons el patró de repartiment descrit a l'apartat 5.4.6:

NUM	Q <sub>ex</sub> l/s	Q <sub>ey</sub> l/s	F <sub>rsx</sub>	F <sub>rsy</sub>	MODEL 1-D		PATRÓ		Error Q <sub>sx</sub> l/s
					Q <sub>sx</sub> l/s	Q <sub>sy</sub> l/s	Q <sub>sx</sub> l/s	Q <sub>sy</sub> l/s	
6	23,98	25,21	0,136	0,115	26,65	22,54	26,31	22,88	0,34
	23,98	25,21	0,073	0,275	10,85	38,34	12,48	36,71	-1,63
	23,98	25,21	0,248	0,197	27,18	22,01	26,93	22,25	0,25
	23,98	25,21	0,209	0,351	19,28	29,91	19,28	29,90	0,00
	23,98	25,21	0,368	0,304	26,41	22,78	26,50	22,68	-0,09
	23,98	25,21	0,037	0,438	4,55	44,64	7,04	42,15	-2,49
12	12,30	12,16	0,139	0,074	15,91	8,55	15,41	9,06	0,50
	12,30	12,16	0,105	0,151	10,06	14,40	10,36	14,11	-0,30
	12,30	12,16	0,181	0,112	14,97	9,49	14,66	9,81	0,31
	12,30	12,16	0,142	0,254	9,03	15,43	9,31	15,16	-0,28
	12,30	12,16	0,301	0,203	14,29	10,17	14,27	10,20	0,02

	12,30	12,16	0,067	0,293	4,87	19,59	5,75	18,72	-0,88
17	50,08	51,41	0,212	0,182	54,41	47,08	53,98	47,51	0,43
	50,08	51,41	0,161	0,373	32,79	68,7	33,73	67,77	-0,94
	50,08	51,41	0,394	0,294	56,61	44,88	56,89	44,60	-0,28
	50,08	51,41	0,370	0,452	47,19	54,3	46,43	55,06	0,76
	50,08	51,41	0,533	0,440	53,63	47,86	54,76	46,73	-1,13
	50,08	51,41	0,142	0,542	25,22	76,27	25,63	75,87	-0,41
13	50,08	5,57	0,221	0,148	32,94	22,71	34,86	20,79	-1,92
	50,08	5,57	0,199	0,238	25,53	30,12	28,15	27,51	-2,62
	50,08	5,57	0,291	0,192	32,88	22,77	35,04	20,62	-2,16
	50,08	5,57	0,261	0,351	24,48	31,17	26,83	28,82	-2,35
	50,08	5,57	0,450	0,292	32,23	23,42	35,27	20,38	-3,04
	50,08	5,57	0,172	0,400	18,18	37,47	20,88	34,78	-2,70
29	74,63	19,07	0,207	0,166	51,79	41,95	54,30	39,40	-2,51
	74,63	19,07	0,163	0,349	31,57	62,17	35,54	58,16	-3,97
	74,63	19,07	0,377	0,269	53,32	40,42	56,53	37,17	-3,21
	74,63	19,07	0,358	0,424	44	49,74	46,58	47,12	-2,58
	74,63	19,07	0,566	0,387	52,3	41,44	57,34	36,36	-5,04
	74,63	19,07	0,142	0,523	23,65	70,09	27,23	66,47	-3,58
30	75,05	8,26	0,194	0,154	46,19	37,12	49,36	33,95	-3,17
	75,05	8,26	0,154	0,328	28,02	55,29	32,67	50,64	-4,65
	75,05	8,26	0,369	0,225	50,25	33,06	53,85	29,46	-3,60
	75,05	8,26	0,349	0,383	40,19	43,12	43,69	39,62	-3,50
	75,05	8,26	0,555	0,335	48,48	34,83	54,01	29,30	-5,53
	75,05	8,26	0,155	0,487	23,15	60,16	27,16	56,15	-4,01
21	5,88	49,80	0,209	0,167	30,75	24,93	28,05	27,63	2,70
	5,88	49,80	0,175	0,252	23,23	32,45	21,19	34,49	2,04
	5,88	49,80	0,264	0,224	29,83	25,85	27,32	28,36	2,51
	5,88	49,80	0,216	0,385	21,27	34,41	18,82	36,86	2,45
	5,88	49,80	0,402	0,356	29,06	26,62	26,86	28,82	2,20
	5,88	49,80	0,133	0,412	15,07	40,61	13,38	42,30	1,69
22	8,42	74,75	0,183	0,182	41,72	41,45	38,07	45,10	3,65
	8,42	74,75	0,122	0,352	23,00	60,17	20,95	62,22	2,05
	8,42	74,75	0,330	0,289	43,86	39,31	40,26	42,91	3,60
	8,42	74,75	0,299	0,454	35,17	48,00	30,75	52,42	4,42
	8,42	74,75	0,484	0,432	43,07	40,10	39,95	43,22	3,12
	8,42	74,75	0,088	0,522			12,98	70,19	
23	18,80	73,92	0,205	0,170	50,38	42,34	46,94	45,78	3,44
	18,80	73,92	0,171	0,344	32,4	60,32	30,20	62,52	2,20
	18,80	73,92	0,359	0,299	49,79	42,93	46,92	45,81	2,87
	18,80	73,92	0,321	0,469	40	52,72	35,99	56,73	4,01
	18,80	73,92	0,524	0,449	48,46	44,26	46,34	46,38	2,12
	18,80	73,92	0,109	0,530			17,60	75,12	

**Taula 6-1.** Cabals de sortida segons els model unidimensional basat en la conservació de l'energia, per als assaigs 6, 12, 17, 3, 29, 30, 21, 22 i 23.

Es pot apreciar que en els casos en què els cabals d'entrada són semblants en les dues direccions, el model unidimensional basat en la conservació de l'energia dona uns resultats raonablement semblants als obtinguts aplicant el patró observat. S'obtenen uns errors absoluts d'entre -1 i 1 litres per segon en els cabals de sortida en direcció x, la qual cosa indica

que l'ajust és prou bo. Per tant, es pot afirmar que en aquells casos en què hi ha equilibri en els cabals d'entrada la formulació basada en la conservació de l'energia és aplicable al càlcul de la distribució de cabals en encreuaments de carrers.

Per contra, si ens fixem en el segon grup de casos, veiem que l'ajust és molt pitjor. S'obtenen uns errors en els cabals de sortida en la direcció  $x$  d'entre  $-2$  i  $-6$  l/s. El signe negatiu denota que el model numèric infravalora els cabals de sortida en la direcció  $x$ . És a dir: els cabals en aquesta direcció obtinguts mitjançant el model són inferiors als predits pel patró establert. Això es pot entendre en el sentit que el model unidimensional, com que es basa en la conservació de l'energia, no té en compte els fenòmens que es produeixen al nus i que influeixen en la distribució de cabals. De fet, el model només considera les condicions de contorn aigües avall: donat un cabal total, donarà els mateixos cabals de sortida sigui quina sigui la distribució dels d'entrada. Segons s'ha comentat durant l'anàlisi dels resultats experimentals, un major cabal d'entrada en una determinada direcció afavoreix la sortida de cabal en aquesta mateixa direcció. Com que en aquests casos la majoria del flux entra en direcció  $x$ , el patró prediu un major cabal de sortida en aquesta direcció que el model.

Anàlogament, en el tercer grup de casos executats, s'observa el comportament oposat. Els errors són sempre positius i es mouen en valors entre 2 i 5 l/s. Com que en aquest cas els cabals d'entrada en la direcció  $x$  són molt inferiors als de la direcció ortogonal, el programa dona resultats en quant a cabals de sortida en la direcció  $x$  superiors als del patró.

Així doncs, el model unidimensional basat en la conservació de l'energia s'ajusta prou bé al patró de repartiment obtingut en aquells casos en què existeix equilibri en els cabals d'entrada, o, el que és el mateix, quan la variable  $Q_{ex}/Q_T$  pren valors pròxims a 0.5. En canvi, quan existeix una direcció dominant pel que fa als cabals d'entrada, l'ajust deixa de ser tant bo, i pitjor és com més s'allunya  $Q_{ex}/Q_T$  de 0.5. De tota manera, ja s'ha comentat durant l'anàlisi de resultats que el factor més influent en la distribució de cabals són les condicions de contorn aigües avall. Per aquest motiu els errors comesos al emprar el model no són mai excessivament elevats.

En el càlcul de canals, on les relacions d'aspecte són un ordre de magnitud inferiors que en el cas d'escolament superficial per carrers, el nus actua com un dipòsit i per tant l'ús de la formulació basada en la conservació de l'energia dona uns resultats bons. Però en el cas d'encreuaments de carrers, les altes relacions d'aspecte fan que el flux al nus sigui més irregular, i apareixen alguns fenòmens que modifiquen el repartiment. Si els dos cabals d'entrada són similars, aquests fenòmens es contrarresten i per tant la formulació basada en la conservació de l'energia és vàlida, però a mesura que augmenta el desequilibri la seva influència creix i el model perd validesa.

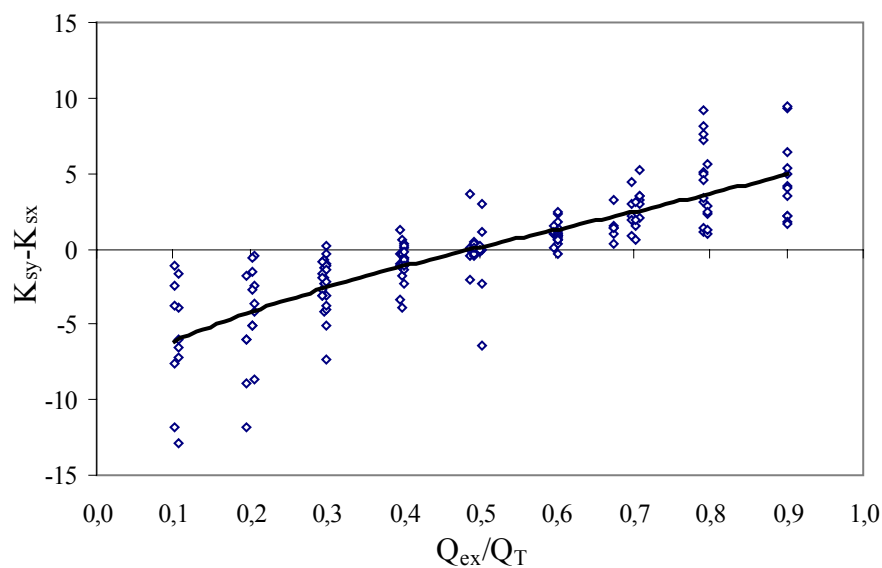
Partint d'aquestes conclusions, en endavant es modificarà el model, introduint unes pèrdues de càrrega localitzades al nus, de tal manera que el model s'ajusti el millor possible al patró establert. D'una banda, aquest estudi servirà per acabar d'entendre fins a quin punt influeixen les condicions de contorn aigües amunt, i de l'altra, per donar una alternativa per al càlcul del repartiment de cabals en encreuaments de carrers en aquells casos en què es treballi amb una formulació basada en la conservació de l'energia.

### 6.2.3. Ajust de les pèrdues localitzades de càrrega

Per tal d'incloure la influència de les condicions del flux aigües amunt -o, el que és el mateix, de la distribució de cabals d'entrada- en el comportament de la massa d'aigua al nus, s'introduirà un coeficient de pèrdues de càrrega a l'entrada del carrer pertinent,  $K_x$  o  $K_y$ , mantenint l'altre nul. L'objectiu és trobar una relació entre el coeficient necessari per que el repartiment de cabals sigui l'establert pel patró i algunes variables del flux. Per fer-ho, el primer serà calcular, per a tots els casos assajats, quin coeficient de pèrdua de càrrega i a quin dels dos carrers de sortida és necessari situar-lo per tal que el model doni una distribució de cabals de sortida igual a l'obtinguda mitjançant el patró. Aquest càlcul és fàcilment realitzable mitjançant un procés iteratiu sobre el model emprat a l'apartat anterior, i els resultats obtinguts es troben a l'Annex 2 per ser excessiva la seva extensió.

A primera vista, s'observa que, en general, el coeficient no nul es situa en la direcció en la qual el cabal d'entrada és menor, i creix a mesura que creix el desequilibri de cabals d'entrada. Aquest resultat és lògic tenint en compte tot l'explicat a l'apartat anterior. Per tal que el cabal de sortida en una direcció augmenti, cal que el coeficient de pèrdua de càrrega no nul es situï al carrer perpendicular. Com que en els casos amb desequilibri el model amb els dos coeficients nuls infravalora els cabals de sortida en la direcció de major cabal d'entrada, per ajustar els resultats al patró de repartiment cal situar pèrdues de càrrega en la direcció perpendicular, que d'ara en endavant anomenarem carrer secundari.

També s'aprecia que els coeficients prenen valors molt elevats, de fins a 13. Això es deu a les baixes velocitats del flux. Com ja s'ha comentat durant l'anàlisi del flux al dispositiu experimental, la major part de l'energia total es manifesta en forma d'energia de calat, essent molt inferior el terme corresponent a l'energia de velocitat. Com que el coeficient de pèrdua de càrrega afecta únicament a aquest darrer terme, per obtenir petits canvis en l'energia total són necessàries  $K$ 's elevades.



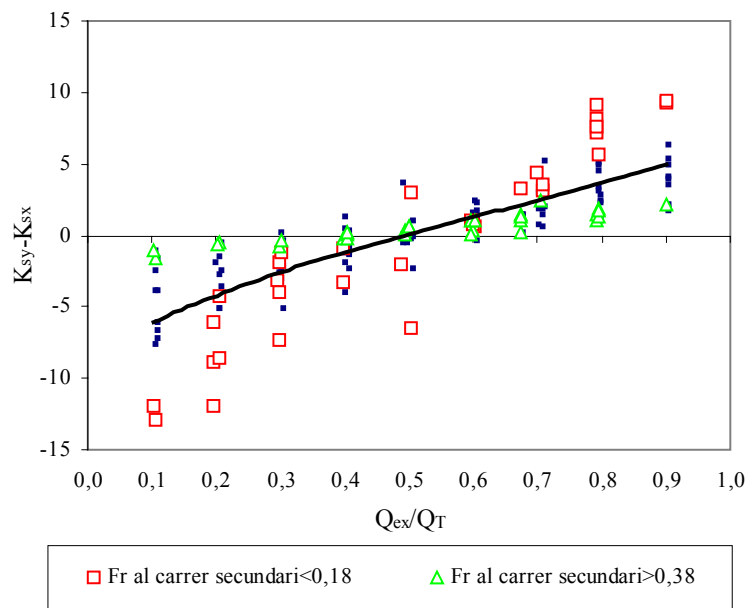
**Figura 6-2.** Relació entre els coeficient de pèrdua de càrrega i la porció de cabal d'entrada en direcció  $x$ .

Així, en una primera aproximació es relacionen els coeficient de pèrdua de càrrega amb els cabals d'entrada. Per tal de treballar amb una sola variable en comptes de dues ( $K_x$  i  $K_y$ ), es

considerarà la diferència entre els dos coeficients ( $K_y - K_x$ ). Valors positius d'aquesta variable signifiquen que el coeficient es situa en la direcció  $y$ , i valors negatius que corresponen a la direcció  $x$ . El valor del coeficient es correspon amb el valor absolut de la variable, donat que per definició un dels dos valors és sempre nul. A la figura 6-2 es representa gràficament la dispersió d'aquesta variable en funció de la porció de cabal d'entrada en direcció  $x$ :

S'aprecia que la tendència comentada es compleix, sobretot des del punt de vista de la ubicació dels coeficients al carrer secundari. De tota manera, per a una mateixa  $Q_{ex}/Q_T$ , hi ha un rang molt ampli de coeficients de pèrdua de càrrega, la qual cosa indica que aquesta variable no és suficientment explicativa. Caldrà doncs buscar si existeix alguna altra variable que influeixi en els valors que prenen les  $K$ 's.

Observant les dades s'aprecia que, per a una mateixa distribució de cabals d'entrada (és a dir, per a un mateix assaig però amb diferents condicions aigües avall), el coeficient de pèrdua de càrrega és major quan menor és el número de Froude a la darrera secció del carrer secundari. És a dir, com més pròxim a zero sigui el número de Froude, major serà el coeficient. Aquest resultat també és lògic, ja que un menor Froude indica una menor velocitat, i per tant una menor energia de velocitat, la qual cosa significa que cal un coeficient més gran per augmentar l'energia total. Aquest comportament es pot apreciar a la figura 6-3, on es marquen els casos amb Froude més elevat i més baix al carrer secundari sobre totes les dades i la línia de tendència corresponent.

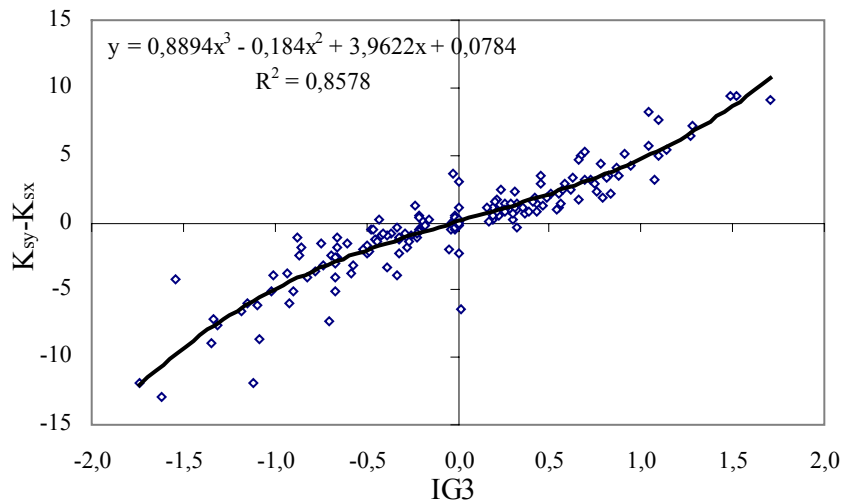


**Figura 6-3.** Relació entre els coeficients de pèrdua de càrrega i la porció de cabal d'entrada en direcció  $x$ , per a casos amb números de Froude al carrer secundari extrems.

Per tal de considerar aquesta tendència de comportament, es considera una nova variable, anomenada Índex Global 3, que inclou tant la porció de cabal d'entrada com el número de Froude al carrer secundari (on es situa la  $K$ ), i que queda definida segons:

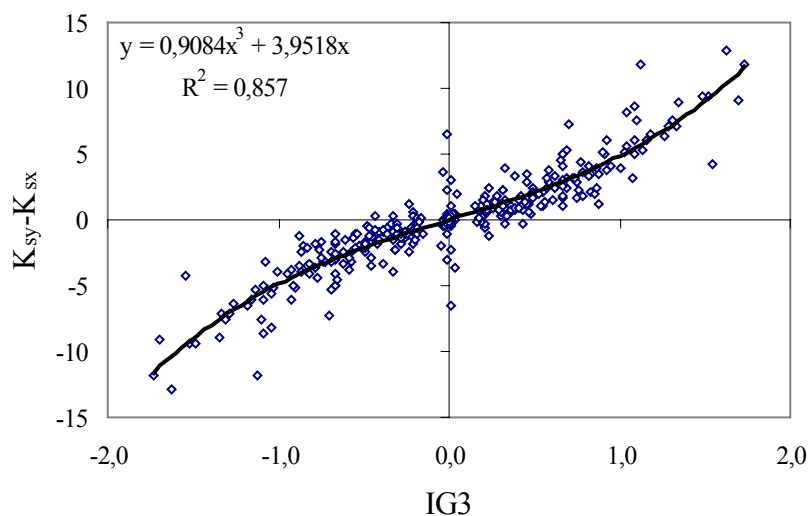
$$IG3 = \left( \frac{Q_{ex}}{Q_t} - 0.5 \right) Fr_{sec}^{-\beta} \quad (6-6)$$

On  $\beta$  és altre cop una constant que cal calibrar per obtenir el millor ajust. Aquesta variable és simètrica respecte el zero (que segons està definida indica equilibri entre cabals d'entrada). Aleshores, relacionant aquesta variable amb la diferència de coeficients de pèrdua de càrrega, i per a un  $\beta=0.70$ , obtenim la figura 6-4.



**Figura 6-4.** Relació entre els coeficients de pèrdua de càrrega i l'Índex Global 3.

La correlació entre les dues variables és prou bona, essent el coeficient de 0.8578. La funció que millor defineix la relació entre les variables és una cúbica la fórmula de la qual s'aprecia al gràfic. Aquesta funció hauria de ser simètrica i passar pel (0,0), però es pot comprovar que no ho fa. En aquest cas això no és degut a errors durant la campanya experimental, donat que els resultats que s'han pres com a referència no són els mesurats sinó els calculats mitjançant el patró de repartiment, i aquests últims sí que presenten simetria. El que origina aquesta manca de simetria és simplement el fet que les dades introduïdes (en quant a cabals i números de Froude) no són simètriques, i per tant els punts en què es basa la correlació tampoc ho són. Per solucionar aquest problema només cal duplicar les dades intercanviant-ne les direccions, aprofitant la simetria de totes les variables incloses.



**Figura 6-5.** Relació entre els coeficients de pèrdua de càrrega i l'Índex Global 3, amb dades simètriques.

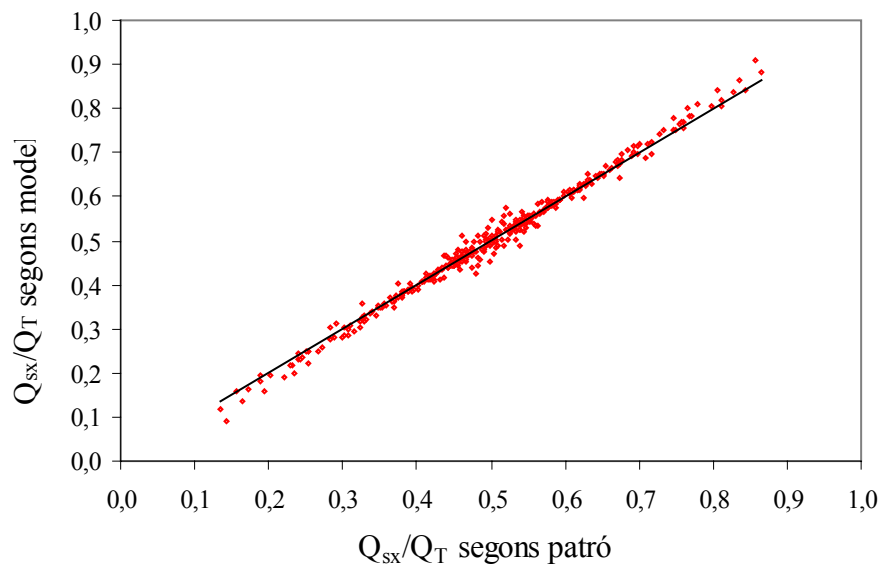


En aquest cas la correlació es manté en uns valors similars al cas anterior, i s'aconsegueix simetria i que la funció passi pel (0,0). La funció obtinguda és una cúbica (si bé el coeficient quadràtic i el terme independent són nuls), la fórmula de la qual és:

$$K_y - K_x = 0.9084 \cdot IG3^3 + 3.9518 \cdot IG3 \quad (6-7)$$

Mitjançant aquesta equació és possible determinar quin coeficient de pèrdua de càrrega és necessari i a quin carrer cal situar-lo per tal que el model unidimensional basat en la conservació de l'energia tracti la distribució de cabals a l'encreuament de la manera més semblant al patró de repartiment anteriorment establert possible. Lògicament, en la majoria de casos serà més fàcil l'aplicació de la funció obtinguda dels resultats experimentals que l'ús del model en permanent, però en els casos en què ja es treballi amb aquest és d'utilitat conèixer aquesta relació.

Finalment, i per tal de comprovar la bondat d'aquesta metodologia, s'executarà el model per a cadascun dels casos assajats amb el coeficient de càrrega calculat segons l'equació 6-7. Els resultats obtinguts s'adjunten a l'Annex 3; s'hi indiquen la distribució de cabals segons el patró de repartiment, les  $K$ 's obtingudes i la distribució calculada mitjançant el model, així com els errors absolut i relatiu en cada cas. A la figura 6-6 es representa el valor de  $Q_{sx}/Q_T$  calculat mitjançant el model enfront del calculat usant el patró de repartiment. S'hi observa una gran semblança entre ambdós, si bé es cert que per als valors extrems (amb més desequilibri de cabals de sortida) l'ajust és pitjor. De tota manera l'error relatiu mai és superior a un 5% per a aquest casos més desfavorables, i l'error relatiu mig de tots els casos executats és de l'1.2%.



**Figura 6-6.** Comparativa entre els valors obtinguts mitjançant el patró de repartiment i emprant el model numèric 1-D.

Per tant, es conclou que podem usar un model unidimensional basat en la conservació de l'energia, introduint unes pèrdues de càrrega localitzades al nus en el sentit del carrer que presenti un menor cabal d'entrada, per al càlcul de la distribució de cabals en un encreuament de carrers.

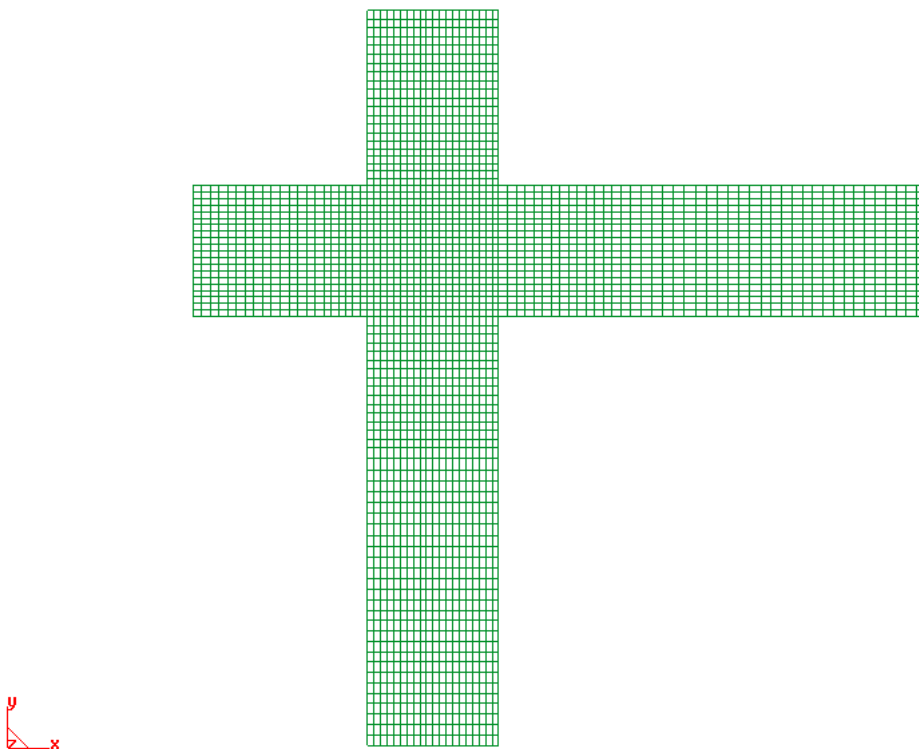
### 6.3. Comparació dels resultats experimentals amb el model 2-D

#### 6.3.1. Breu descripció del model emprat

En aquest apartat s'ha treballat amb el model numèric bidimensional anomenat CARPA, desenvolupat per Ernest Bladé en la seva tesi doctoral. Aquest model resol les equacions de Saint-Venant completes per mitjà de la tècnica dels volums finits.

A priori es desconeix si els fenòmens que es desenvolupen a l'encreuament són bi o tridimensionals, i per tant si l'ús d'un model únicament bidimensional per al càlcul és adequat. De tota manera, tenint en compte les altes relacions d'aspecte -i per tant els baixos calats- amb què s'ha treballat en aquest estudi, és molt probable que el model bidimensional expliqui prou bé el comportament del flux.

El model discretitza l'espai en una malla definida mitjançant nodes, i en cadascun dels nodes calcula calats i cabals, podent obtenir d'aquesta manera la situació del flux en cada punt. Lògicament, la geometria introduïda al programa ha estat la del dispositiu experimental, amb carrers d'1.5 metres d'ample, de 2 metres de longitud els d'entrada i 5 els de sortida, i amb tots els pendents horitzontals. La malla amb què s'ha treballat es mostra a la figura 6-7.



**Figura 6-7.** Esquema de la geometria introduïda.

Pel que fa a les condicions de contorn, s'ha mantingut el mateix criteri que en el cas de la simulació mitjançant el model unidimensional. Per tant, aigües amunt s'ha imposat un cabal específic (igual al quocient entre el cabal d'entrada i l'ample del carrer) a cadascun dels punts pertanyents a l'inici dels canals d'entrada, i aigües avall un número de Froude local determinat a tots els punts corresponents a la secció final dels carrers de sortida.

### 6.3.2. Comparativa dels resultats obtinguts

S'han executat quatre casos de diferents característiques, tant pel que fa als cabals d'entrada com als números de Froude als carrers de sortida, obtenint una determinada distribució de cabals en cada cas. Aquesta s'ha comparat amb la que proporciona l'ús del patró de repartiment establert. A la taula 6-2 s'indiquen els valors obtinguts.

NUM	Q <sub>ex</sub> 1/s	Q <sub>ey</sub> 1/s	F <sub>rx</sub> 1/s	F <sub>ry</sub> 1/s	PATRÓ		MODEL 2-D		Error Q <sub>sx</sub> 1/s
					Q <sub>sx</sub> 1/s	Q <sub>sy</sub> 1/s	Q <sub>sx</sub> 1/s	Q <sub>sy</sub> 1/s	
6	23,98	25,21	0,2092	0,3507	19,28	29,90	19,34	29,84	-0,06
22	8,42	74,75	0,1832	0,1819	38,08	45,09	40,39	42,78	-2,31
14	49,80	13,11	0,0709	0,4713	13,87	49,04	10,44	52,47	3,43
3	25,24	16,74	0,2075	0,3179	17,73	24,24	17,49	24,49	0,24

Taula 6-2. Resultats obtinguts emprant el patró i el model.

Els resultats obtinguts amb el model numèric s'ajusten prou bé als que proporciona el patró de repartiment, sobretot en aquells casos on no existeixen grans desequilibris pel que fa als cabals d'entrada, és a dir els corresponents als assaigs 6 i 3. En els altres dos casos existeix una direcció on el cabal d'aproximació és clarament diferent en les dues direccions, i sembla ser que això provoca més error. De tota manera, l'error per al cas més desfavorable (assaig 14) no arriba a 4 litres per segon.

Qualitativament tots els resultats són coherents amb les tendències de comportament observades durant l'anàlisi de les dades experimentals i que han servit per establir el patró de repartiment. En el primer cas, els cabals d'entrada són similars, i per tant la distribució de cabals dependrà únicament de les condicions de contorn aigües avall: efectivament, segons els valors obtinguts amb el model la majoria de cabal circula pel carrer amb un número de Froude més elevat. Per contra, en el segon cas, les condicions de contorn aigües avall són semblants, però hi ha molt desequilibri en els cabals d'entrada, essent la direcció dominant la *x*. Això s'hauria de traduir en un major cabal de sortida en aquesta direcció, i aquest comportament també s'observa als resultats que dona el model. En els dos casos restants són diferents tant les condicions de contorn aigües amunt com aigües avall, i per tant no és evident establir qualitativament els resultats esperats, però comparant-los amb els calculats mitjançant el patró s'observa que la direcció de sortida dominant és la mateixa.

En definitiva, es pot afirmar que els resultats obtinguts mitjançant els dos mètodes són molt semblants, la qual cosa significa que el model es pot utilitzar per calcular la distribució de cabals en un encreuament de carrers i, a la vegada, reafirma la validesa del patró de repartiment establert.

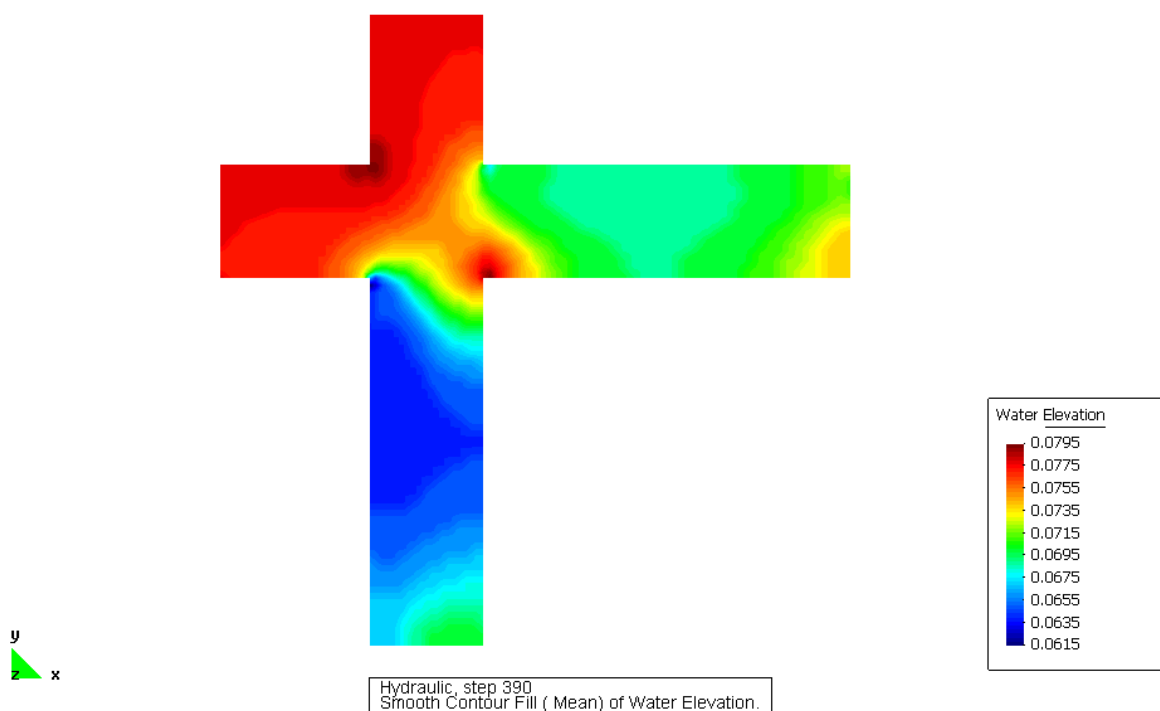
### 6.3.3. Anàlisi del flux

Un cop comprovat que el model numèric reproduïx d'una manera prou ajustada el repartiment de cabals, és lògic pensar que també descriu raonablement bé el comportament del flux al dispositiu experimental. Per tant, s'empraran els resultats obtinguts en l'execució dels casos de l'apartat anterior per entendre i comprovar l'existència d'alguns dels patrons de

flux que s'han observat durant la campanya experimental, i que ja han estat explicats a l'apartat 4.3.

### Calats

Durant l'anàlisi de les dades experimentals s'ha treballat constantment amb números de Froude, deixant de banda l'estudi dels calats, al considerar que els primers eren més representatius i generaven menys problemàtica. De tota manera, observant la distribució de calats al llarg del dispositiu experimental es poden treure algunes conclusions interessants. A les figures 6-8 i 6-9 es representen les distribucions de calats en dos dels casos executats segons el model.



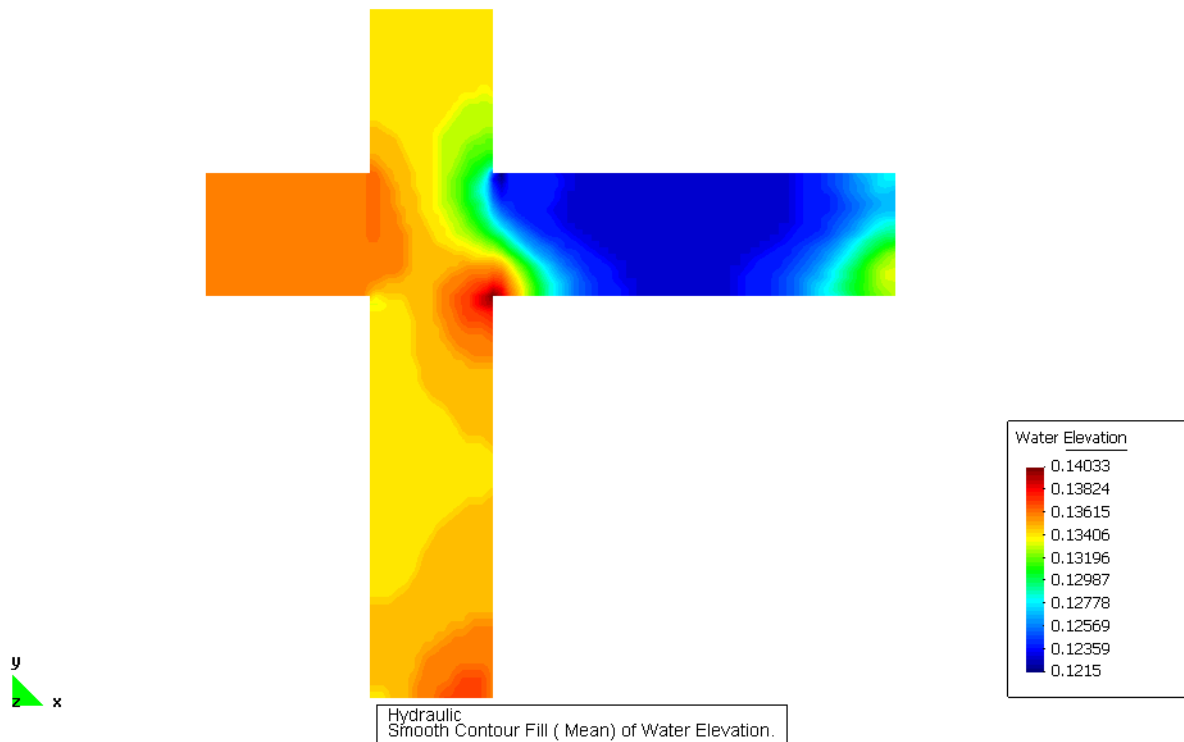
**Figura 6-8.** Distribució de calats per a l'assaig 6.

D'entrada s'observa que, efectivament, als dos carrers d'entrada el calat és molt similar. En el primer cas (figura 6-8), els dos cabals d'entrada són iguals, i per tant els calats també ho són. En canvi, en el segon cas els cabals als carrers d'entrada són molt diferents (74,75 l/s en direcció  $x$  i només 8,42 en direcció  $y$ ), però els calats es segueixen mantenint molt similars (13.65 cm. en direcció  $x$  i 13.40 en la direcció  $y$ ). Per tant, es pot donar per bona la hipòtesis de que als carrers d'entrada els calats són bastant similars. De fet, en general no s'observa una gran variació de calats en tot el model: en tots dos casos el rang en el qual es mouen els valors d'aquest és inferior als dos centímetres.

Pel que fa al nus, s'observa que existeix una zona de partició del flux que surt de les dues cantonades exteriors, podent ser aquesta més o menys marcada en funció dels cabals que circulen pels carrers. De tota manera, aquesta partició mai arriba a ser tant marcada com en

els casos en condicions de règim ràpid estudiats per Nanía Escobar (1999). També s'aprecia una sobreelevació a la zona pròxima a la cantonada de partició del flux.

Als carrers de sortida veiem que la secció just després del nus és la que presenta una menor uniformitat en els calats, a conseqüència de la zona de partició esmentada anteriorment. Aquest aspecte ja es va observar durant la campanya experimental, i de fet va ser un dels elements que van desaconsellar l'ús de les dades obtingudes a aquesta secció a l'hora d'establir el patró de repartiment.

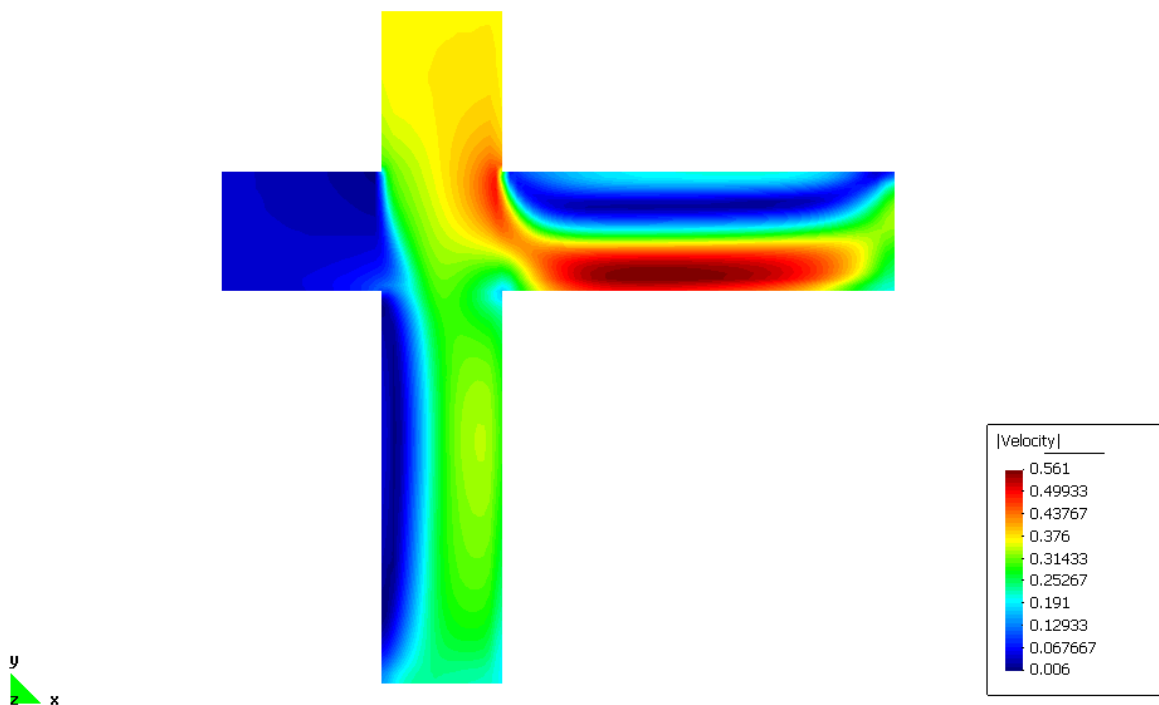


**Figura 6-9.** Distribució de calats per a l'assaig 22.

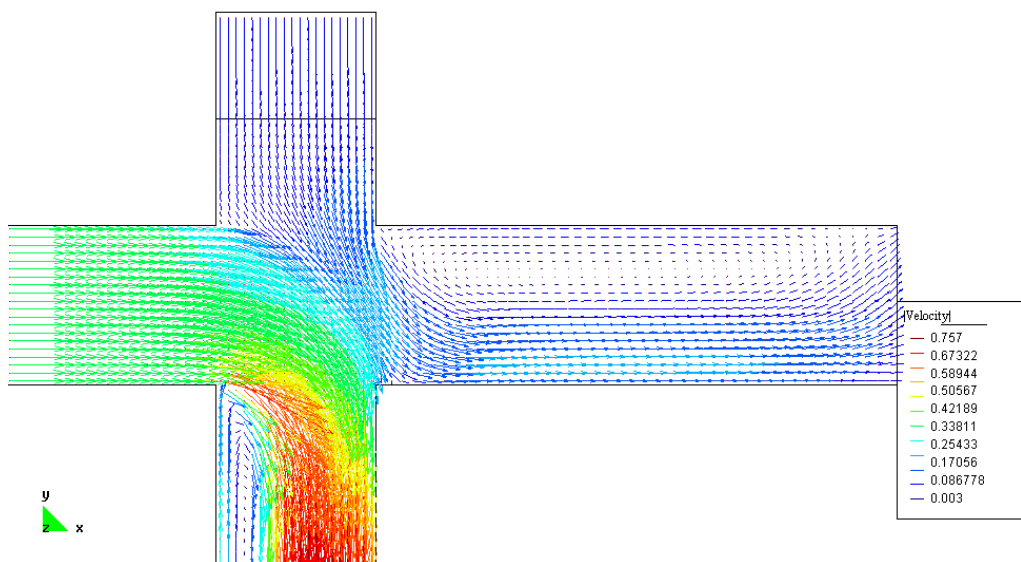
### *Velocitats*

L'estudi de les velocitats als diferents punts del dispositiu serà interessant per entendre fins a quin punt no existeix uniformitat als carrers de sortida, i també per comprovar l'existència de la zona de recirculació que s'observà durant la campanya experimental i estudiar la disposició espacial d'aquesta. Al la figura 6-10 es mostra la distribució del mòdul de la velocitat per a l'assaig 22, mentre que a la figura 6-11 s'hi representa el vector de velocitat en cada punt, per a l'assaig 3.

Es pot observar que als carrers d'entrada les velocitats són, en general, bastant uniformes per a una mateixa secció, mentre que als carrers de sortida això no és així. Com s'esperava, a la secció inicial i a la central dels carrers de sortida el rang de velocitats és molt ampli, com a conseqüència de la zona de separació i reflux. Per contra, a la zona final la uniformitat és major, la qual cosa reforça la idea que la darrera secció del carrer és la millor per definir les condicions aigües avall.



**Figura 6-10.** Distribució de velocitats per a l'assaig 22.



**Figura 6-11.** Detall de la distribució de vectors de velocitat per a l'assaig 3, al nus i al carrer de sortida en direcció  $x$ .

Al gràfic vectorial s'aprecia que als canals de sortida existeixen zones on la velocitat és negativa, de tal manera que queda confirmada l'existència d'una zona de recirculació del flux. Aquesta té un ample que, en aquest cas, arriba fins a gairebé  $1/2$  de l'ample del carrer en direcció  $x$  i aproximadament  $1/3$  en direcció  $y$ . Per la forma que adopta la zona de recirculació, es dedueix que es veu tallada per la presència del final del carrer, de tal manera que si els carrers de sortida tinguessin una major longitud s'estendria més enllà. De fet, i com

ja es comenta a l'apartat 2.2.2, segons Weber, Schumate i Mawer (2001) aquesta zona de recirculació, per a un cas d'unió de canals, s'allarga fins a aproximadament 6 cops l'ample del canal, la qual cosa equivaldria a uns 9 metres. Tenint en compte aquests resultats, hagués estat millor realitzar les experiències en un dispositiu on els carrers de sortida fossin més llargs, tant pel que fa a una millor observació de la zona de separació i recirculació com per a l'obtenció d'un patró de repartiment més natural, ja que les condicions de contorn aigües avall es podrien considerar a una secció on la uniformitat no fos forçada. L'ús d'un dispositiu ja existent i construït pensant bàsicament en l'estudi del problema en condicions de flux supercrític va impossibilitar aquesta opció.

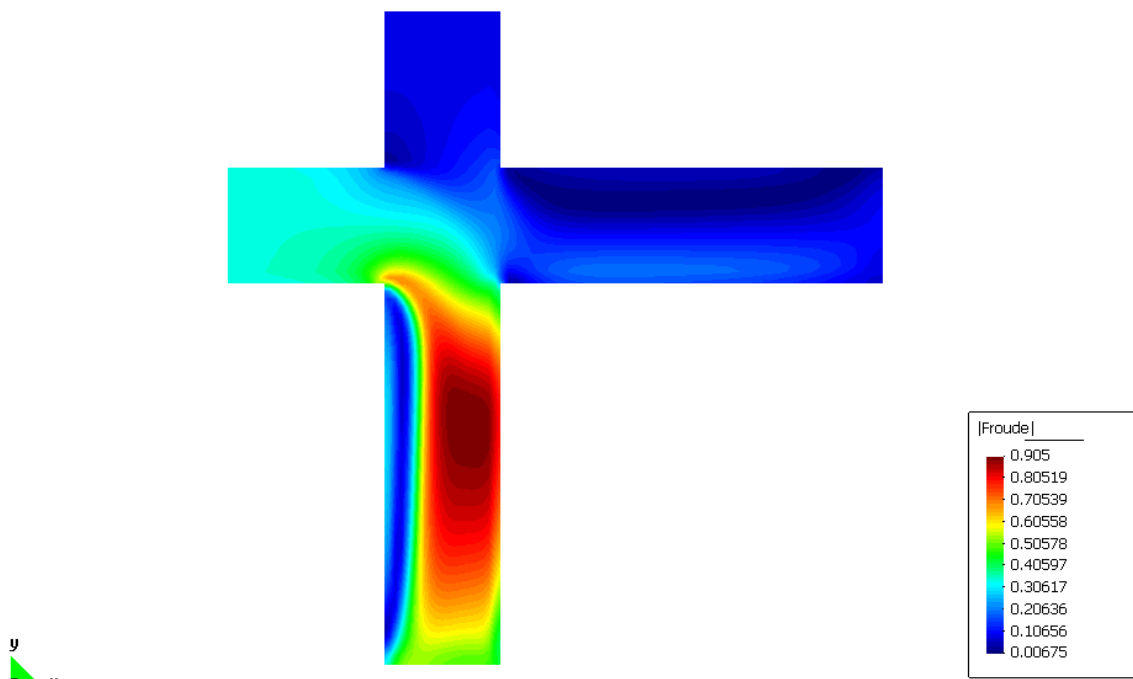
També al gràfic vectorial es pot apreciar la línia de corrent que actua com a divisòria del flux al nus. Aquesta surt de la cantonada que formen els dos canals d'aproximació, i s'introdueix a un dels dos canals de sortida, depenent de la distribució de cabals. S'observa que aquesta línia és aproximadament recta a una certa distància de la cantonada on neix.

### Númers de Froude locals

Coneixent les velocitats i calats a cada punt es pot definir el número de Froude local com:

$$Fr = \frac{(v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (6-8)$$

D'aquest manera es pot conèixer el caràcter del flux a cada punt, la qual cosa dóna una idea molt més concreta del funcionament del sistema, en front de l'assumpció d'un número de Froude generalitzat que s'havia emprat fins ara. A la figura 6-12 es mostra la distribució de números de Froude locals per a l'assaig 14.



**Figura 6-12.** Distribució de números de Froude locals per a l'assaig 14.

Primerament cal destacar que en tots els punts el número de Froude local és inferior a la unitat, per tant en tots els punts el flux es troba en condicions de règim subcrític. De tota manera, en alguns punts, concretament al canal de sortida en direcció  $x$ , s'assoleixen valors de fins a 0.905. Això és degut a que, en el cas escollit, la majoria de cabal surt en aquesta direcció, la qual cosa suposa velocitats altes. L'existència de la zona de separació i recirculació fa que el Froude generalitzat en la secció corresponent no sigui superior a 0.5, però al disminuir l'ample efectiu i augmentar el cabal que hi ha de passar, les velocitats creixen molt. Si bé aquest és un dels casos més desfavorables en quant a la possibilitat de Froude locals alts (al presentar un valor elevat de  $Q_{sx}/Q_T$ ), l'elevat valor màxim obtingut fa que no es pugui descartar que en algun dels assaigs realitzats existissin punts on el Froude local fos major que 1. De tota manera, tampoc s'ha de donar una fiabilitat absoluta als resultats obtinguts mitjançant aquest model, de tal manera que no s'abundarà més en aquest aspecte.