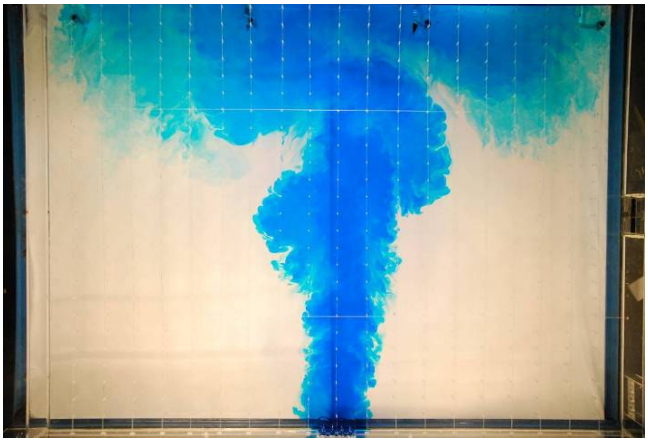
7. PRESENTACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

7.1. TRACTAMENT DE LA IMATGE

El tractament que es faci de les imatges emmagatzemades és clau per a la interpretació dels resultats. Igual que amb la construcció del model, un tractament erroni pot portar a una interpretació equivocada del fenomen estudiat. En aquest apartat es detalla el procés de tractament de la imatge i les discussions a l'hora d'escollir una opció o una altra.

Les imatges enregistrades s'emmagatzemen directament en format *jpg*. Es decideix utilitzar, d'entrada, aquest format degut al pes de cada imatge en format *bmp* i als problemes de velocitat de transmissió de la informació de la càmera a l'ordenador, que aquest últim format suposa. Tot i això, cada imatge pesa 1 Mb aproximadament, i té unes dimensions de 2896x1944 píxels.

Per al processat d'imatges s'utilitza el programa MATLAB v7.1 i el *toolbox* de tractament d'imatges que aquest inclou.



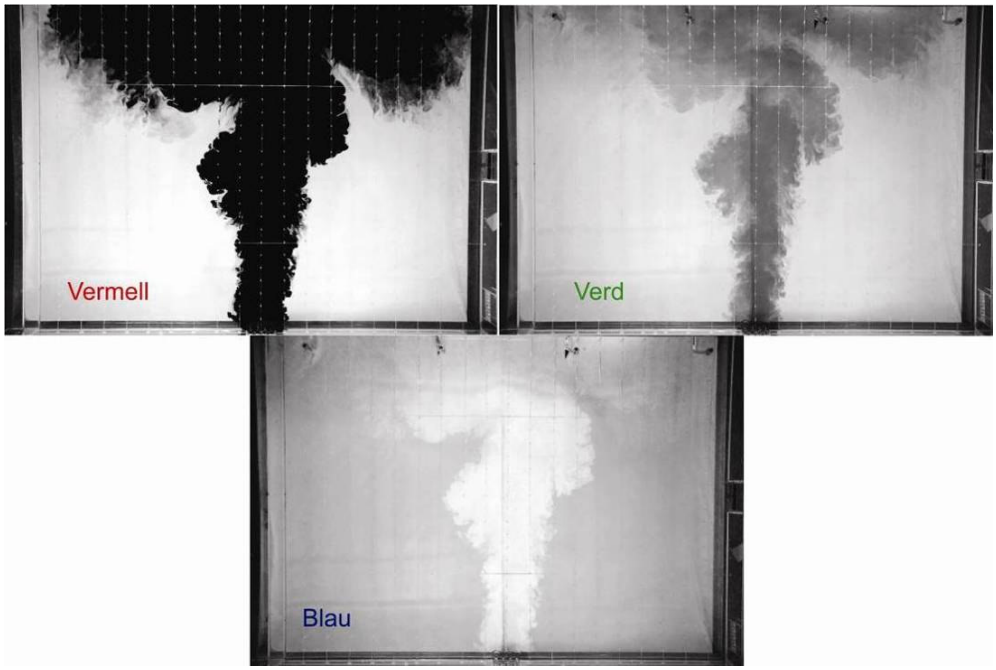
Imatge 7-1 Assaig 1A_0100

La Imatge 7-1 és un exemple d'imatge enregistrada. L'objectiu és mesurar l'evolució de la part tacada de blau i per tant cal veure quines eines permeten calcular de manera eficaç i eficient l'àrea de la taca en cada fotograma. És important reduir les distorsions que fa la iluminació i el soroll d'objectes externs al líquid.

7.1.1. FILTRAT

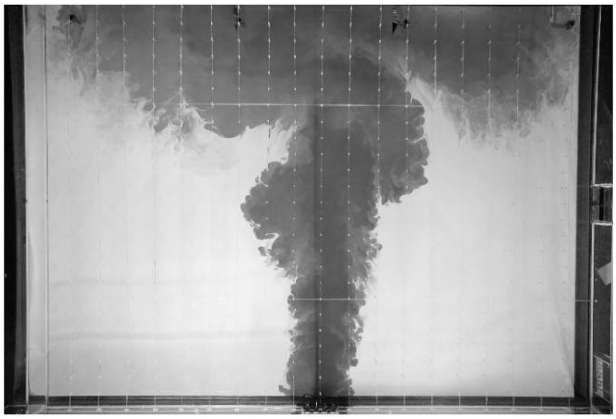
Per mesurar l'àrea de la taca blava es defineix el valor límit de píxel en el qual es considera que l'aigua ja està tacada. Aquest límit és el filtre que s'aplicarà a tots els fotogrames i és important la seva precisió per a la futura interpretació dels resultats.

Les imatges són enregistrades en color i Matlab ho llegeix, per defecte, com una imatge RGB. Cada imatge està definida per tres matrius, i cadascuna d'elles emmagatzema les característiques d'un dels tres colors bàsics que conformen la fotografia -Imatge 7-2-, amb valors inclosos dins l'interval [0,255]. Això crea problemes perquè caldria definir tres filtres, un per cada color. Per això d'ara en endavant la discussió que es genera vol concloure amb la reducció de la informació de la imatge a una sola matriu.



Imatge 7-2 Combinació RGB

Transformar la imatge a una de tipus indexat en blanc i negre, permet reduir-ne la informació a una matriu amb valors compresos en l'interval [0,255] (0 per al negre, 255 per al blanc). Però com demostra la Imatge 7-3 no aconsegueix eliminar el soroll que produeix la llum externa i els valors en la zona que no està tacada no són uniformes degut a la influència de la il·luminació.

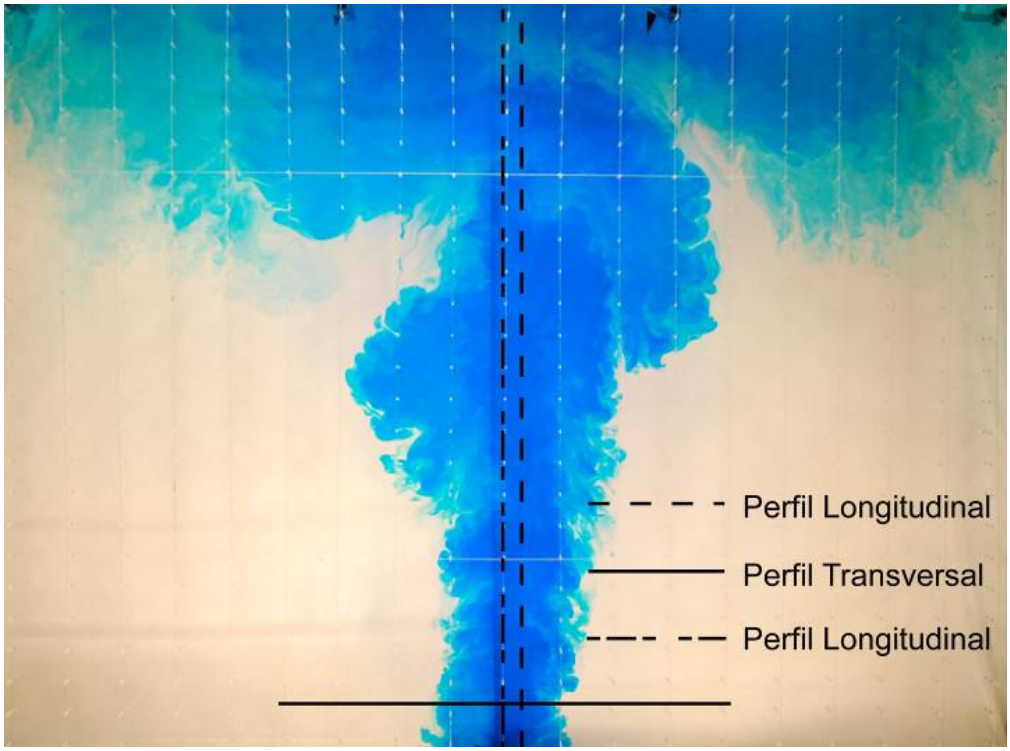


Imatge 7-3 Blanc i negre de la Imatge 7-1

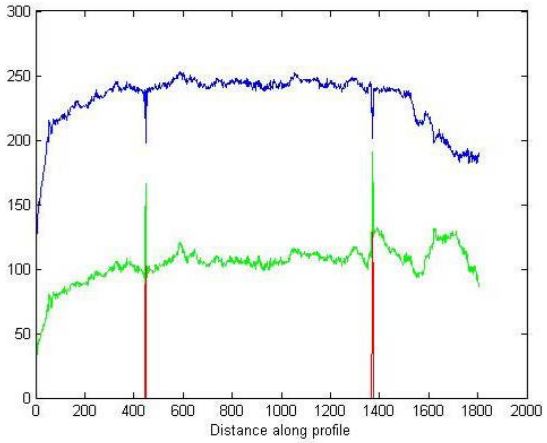
COMBINACIÓ RGB

Per aconseguir una imatge que reprodueixi amb fidelitat la taca i que elimini el soroll del qual es parla en l'anterior paràgraf, es proposa diferents operacions entre les tres matrius que conformen la imatge en RGB.

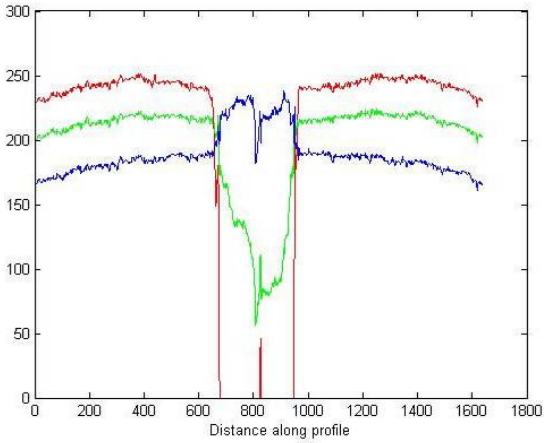
En la Imatge 7-5 es pot veure l'evolució de cadascun dels colors en diferents talls realitzat a la Imatge 7-4



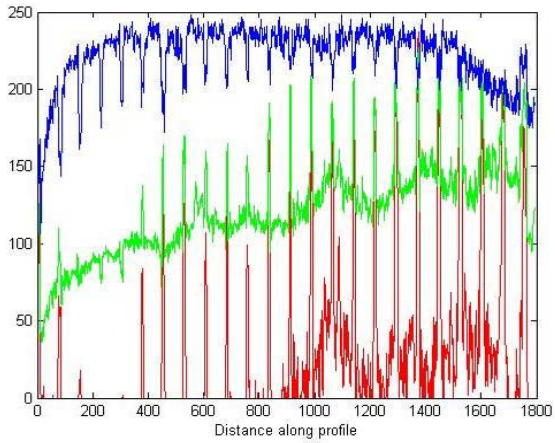
Imatge 7-4 Perfils de RGB



Imatge 7-5a Perfil Longintudinal



Imatge 7-5b Perfil Transversal



Imatge 7-5c Perfil Longitudinal amb columnes

Com és d'esperar, el blau és el color dominant per sobre del verd i el vermell. En els punts on la taca encara no ha arribat (Imatge 7-5b) o en llocs on hi ha columnes (Imatge 7-5c), domina el color vermell fruit de l'efecte directe de la il·luminació. Per tant, farà falta jugar amb els tres colors eliminant el vermell i combinant encertadament el blau i el verd.

Blau – Vermell: De restar la intensitat de vermell a la intensitat de blau resulta la Imatge 7-6, on es pot veure que els extrems de la taca no es representen adequadament degut a l'elevada intensitat de vermell en aquests punts, que pot superar la intensitat de blau. A més la no existència del verd fa que la imatge quedi molt cremada al centre de la taca.

Imatge 7-6 Combinació de Blau-Vermell

En conseqüència aquesta combinació fa perdre resolució en els punts amb menys concentració i per tant en l'anàlisi a realitzar.

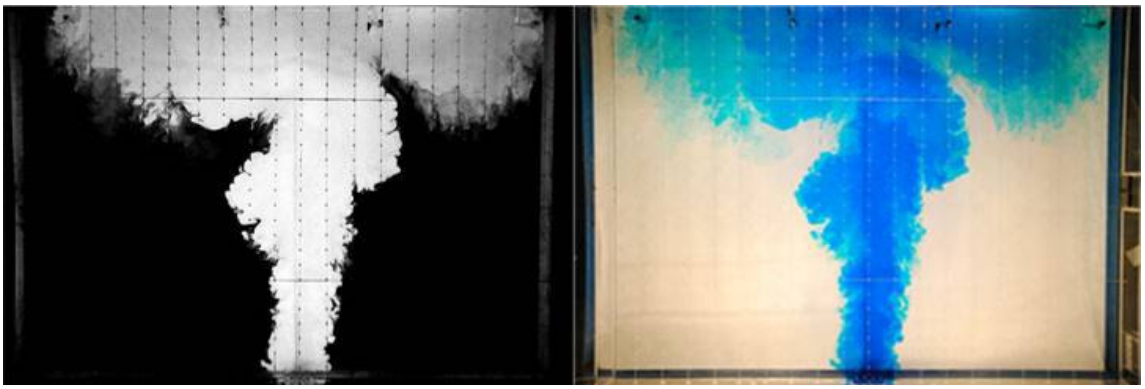
[0.7∗Blau+0.3∗Verd]-Vermell: La Imatge 7-7 mostra els resultats d'aquesta nova combinació en la qual s'introdueix l'efecte del verd que ajuda a augmentar la semblança entre la imatge retocada i la imatge original -Imatge 7-1 -.

És important afegir que, tot i fer operacions en les quals hi hauria d'haver valors negatius, el Matlab per defecte, posa un zero en aquells píxels on el valor resultant és negatiu.

Imatge 7-7 Combinació [0.7·Blau+0.3·Verd]-Vermell

En els punts amb menor concentració de blau és el verd qui pren més importància, com es pot veure en la Imatge 7-5b. Per tant, una nova combinació per potenciar aquestes zones és aconsellable.

Maxim [Blau, Verd] – Vermell: Per solucionar els problemes apareguts en les anteriors combinacions, sobretot en zones amb baixa intensitat de blau, es potencia el verd. En aquestes zones, la intensitat de blau és més petita que la de verd i agafant el màxim es mitiga la pèrdua de resolució.



Imatge 7-8 Combinació Màxim[Blau, Verd]-Vermell

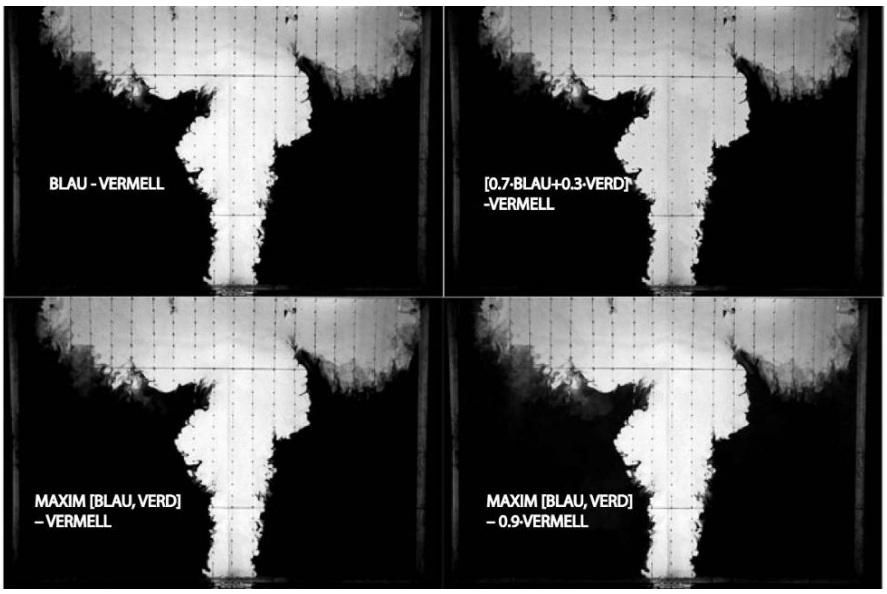
Amb aquesta combinació es manté la problemàtica anterior, tot i que es millora la definició de la taca -Imatge 7-8 -.

Maxim [Blau, Verd] – 0.9∗Vermell: Aquesta darrera operació pretén afinar la definició de la taca blava en zones amb baixes concentracions de blau traient el 90% del valor de la intensitat del vermell.

Imatge 7-9 Combinació Màxim[Blau, Verd]-0.9·Vermell

Tot i que aquesta última opció aproxima millor la forma de la taca, apareix una zona amb soroll a la part inferior dreta de la imatge retocada -Imatge 7-9-. Això pot presentar problemes a l'hora de marcar el filtre.

Així doncs, la millor opció és la tercera en la qual es combina les tres matrius de blau-verd-vermell (RGB) de la següent manera: **màxim [blau, verd] – vermell**.



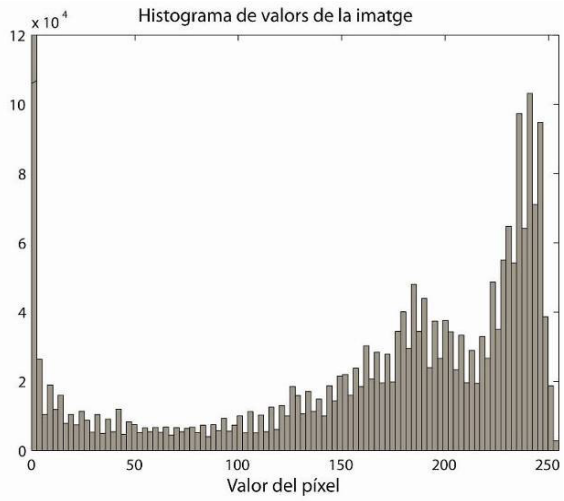
Imatge 7-10 Comparació de les combinacions proposades

VALOR DEL FILTRE

La decisió del valor que se li dóna al filtre és clau en l'estudi. Aquest número aglutina la definició que es fa de "taca", entesa com la concentració de blau a partir de la qual es considera que ja ha començat la mescla en una zona –ocupada en aquest cas per un píxel.

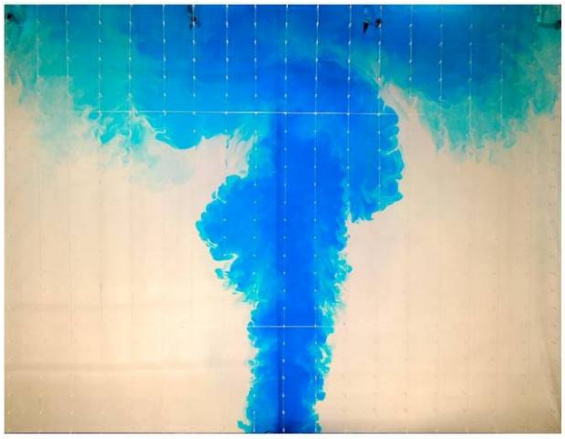
Un cop decidit el valor de tall, la imatge serà convertida a una imatge de tipus binari (amb valors de 0 i 1) i és aquesta última la que finalment s'utilitza per a fer el càlcul de l'àrea de la taca. Per tant, com s'ha dit en el paràgraf anterior, és important la decisió presa ja que és la que defineix la taca.

Abans cal veure quin és l'interval base que s'utilitza per a una primera aproximació del valor del filtre. Per a fer això l'histograma -Imatge 7-11- mostra la quantitat de píxels per cada valor comprés entre [0,255]. Serà un valor grisós fosc el que definirà la taca ja que les zones que no estan tacades són les que prenen com a valor el 0. De la Imatge 7-11 es dedueix que l'interval base per començar a iterar és el que compren la major gamma de gris-fosc, és a dir de [20,100].

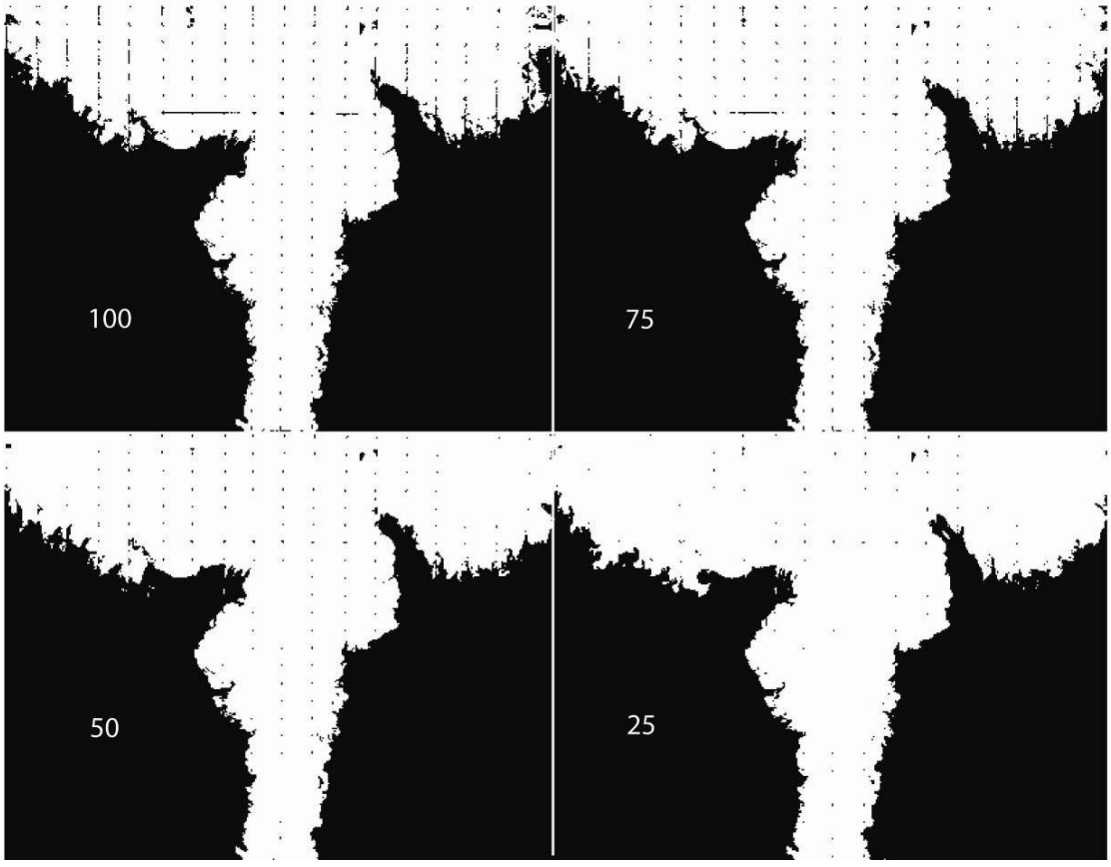


Imatge 7-11 Histograma de valors de píxel de la Imatge 7-1

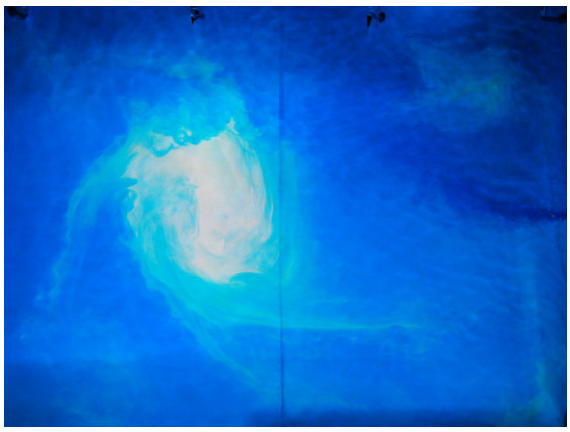
Són dues les imatges que s'analitzen en aquest cas, per no generar dubtes de cara a resultats futurs; una corresponent a un assaig amb columnes, Imatge 7-12, i l'altra a un assaig sense columnes Imatge 7-14.



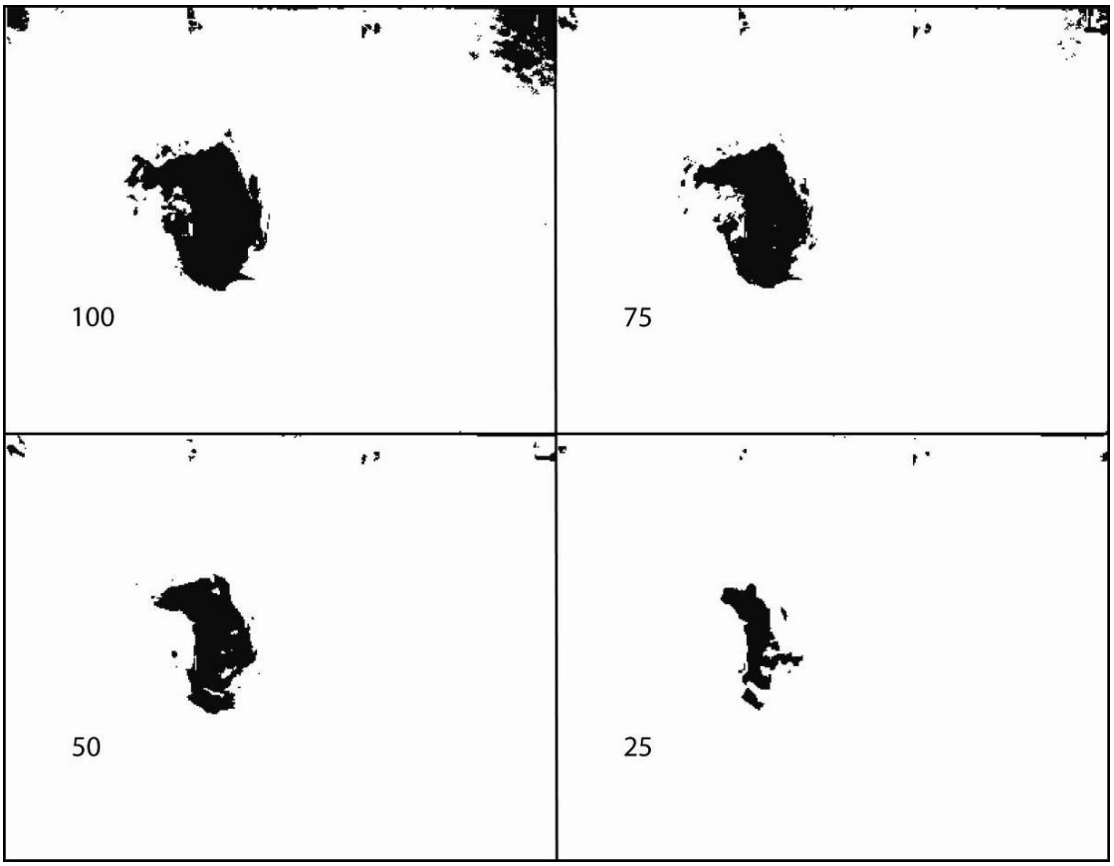
Imatge 7-12 1A-014_100



Imatge 7-13 Filtres aplicats a la Imatge 7-12



Imatge 7-14 2C-sc-026_400



Imatge 7-15 Filtres aplicats a la Imatge 7-14

Les diferències més grans entre els diferents valors utilitzats es marquen en la segona imatge analitzada. El valor de 100 queda directament descartat per l'efecte del retoc RGB de la imatge (concentració alta de vermella la cantonada superior dreta) que es fa patent amb aquest filtre. El valor de 75, tot i mantenir cert error en aquest aspecte, és el que s'agafa com a filtre definitiu ja que es considera que defineix el límit d'un blau prou intens com per dir que s'ha iniciat la mescla.

Així doncs, el valor que s'utilitzarà en l'anàlisi dels resultats és **75**. En el següent apartat, es grafica la incidència d'un filtre o un altre -Gràfic 7-2

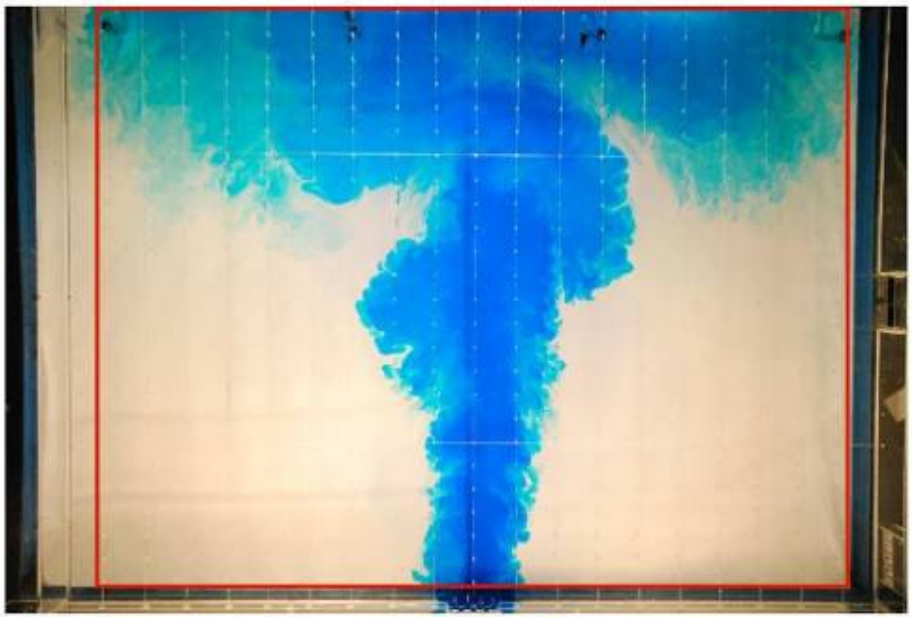
7.1.2. PROGRAMA

El programa ha estat realitzat mitjançant el llenguatge i la programació de Matlab v.7.1, utilitzant la barra d'eines de Tractament d'Imatge que aquest inclou (*Processing Image Toolbox*).

L'objectiu és **calcular el percentatge de píxels blancs respecte al total de píxels de la imatge ja retocada i filtrada –en format binari**-. Per al càlcul de l'àrea s'utilitza l'eina *bwarea*() que ja inclou la barra d'eines.

L'anàlisi es fa seguint el sistema eulerià, és a dir, fixant un punt es va veient l'evolució de la taca en aquest punt.

Especificant l'exercici que fa el programa en una sola imatge, i extrapolant-ho a un bucle que ho faci per cadascuna de les imatges que formen cada assaig, es comença per llegir la imatge. A continuació se li aplica la combinació RGB i es retalla el marc que no s'analitzarà. En aquest cas s'ha agafat el marc que mostra la Imatge 7-16 corresponent a 10:1861, 301:2702[1], que abarca l'àrea marcada per les quatre columnes extremes. Un cop fet el marc s'aplica el filtre decidit i es passa a fer el càlcul de l'àrea i el percentatge.



Imatge 7-16 Marc aplicat –línia en vermell-

En el moment de donar l'ordre de fer-ho a totes les imatges de l'assaig, apareix una nova discussió: acumular o no els valors de la imatge anterior.

[1] Matlab numera els píxels començant per la part superior dreta.

ACUMULAR VALORS DE LA IMATGE ANTERIOR

Suposant que es tracta d'un fenomen en dues dimensions, el percentatge d'àrea tacada en la imatge *i* mai podrà ser inferior al percentatge de la imatge *i+1*. A més, en general, també es pot dir que un píxel que queda tacat en l'instant *j* continuarà tacat en l'instant *j+1*.

Així s'aconsegueix una gràfica del percentatge en funció del temps, monòtona creixent.

NO ACUMULAR VALORS DE LES IMATGES ANTERIORS

En aquest cas es tracta cada imatge de manera individual, sense lligar-ne els resultats als obtinguts en la imatge anterior. Així, es tenen en compte els processos de mescla tridimensionals i també l'efecte de *cua de gos,* que tenen les entrades d'aigua al dipòsit.

L'efecte *cua de gos* consisteix en que els vórtexs que es formen a la interfase entre el líquid entrant i el líquid ambient segueixen l'esquema asimètric en el temps de les Esteles de Von Kárman. Tal com indica la Figura 7-1, el vórtex que es forma primer a la dreta, un instant més tard es forma a l'esquerra i tot seguit torna a formar-se a la dreta. Això implica l'entrada de fluid ambient en el flux entrant, i augmenta la mescla.

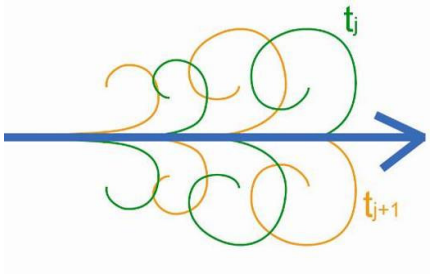
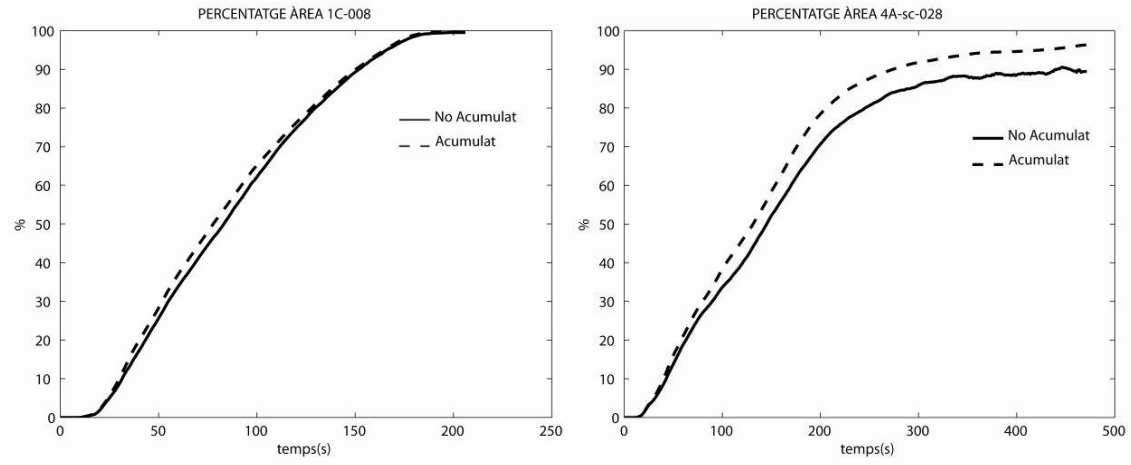


Figura 7-1 Efecte de *cua de gos*

Un altre fenomen observat que també té les mateixes característiques es dóna en els assajos sense columnes. La cel·la que es genera va variant la forma amb el temps i zones que en un instant de temps estan tacades, més endavant deixen d'estar-ho -Imatge 7-17

Imatge 7-17 Evolució de la taca en assajos sense columnes

El Gràfic 7-1 mostra les diferències entre la primera opció i la segona.

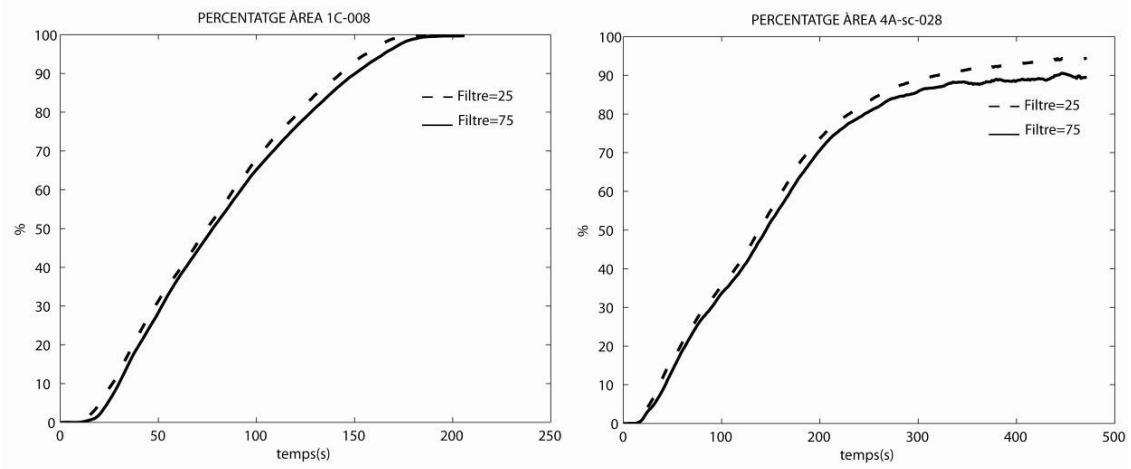


Gràfic 7-1 Diferència entre programa acumulat i programa no acumulat

En el gràfic de l'esquerra, la diferència entre un programa i l'altre no és especialment significativa, com si que ho és en el gràfic dret. Igualment, en general, es pot dir que el programa que no acumula resultats, també obté gràfiques amb tendència monòtona creixent.

Les experiències en el laboratori, també porten a pensar que el procés que s'estudia no és exclusivament un fenomen en dues dimensions. Per aquest motiu, s'adopta el programa que no acumula resultats d'una imatge a la següent.

Finalment al Gràfic 7-2 es pot veure, un cop fet el programa, quina és la incidència de la decisió d'agafar un filtre de 25 o un filtre de 75. Si prenem com a valor de referència una evolució de la taca del 85% , les diferències entre un filtre i l'altre són del 4%



Gràfic 7-2 Diferències entre aplicacions amb diferents valors de filtre

7.2. COMPARACIÓ ENTRE ENTRADES

La quantitat de fotogrames analitzats no correspon a tot l'assaig sinó al moment en el qual al dipòsit no hi queda cap zona en blanc.

El fet d'escollir com a número de Reynolds aquell que marca el límit de l'autosemblança i que a més és proper a la divisió entre moviment laminar i moviment turbulent, fa que en el model hi hagi zones on el flux passa a ser laminar. Degut a això el resultat sobre el moment de mescla superficial pot relentir-se i és necessari fixar un percentatge de mescla prou significatiu. Els gràfics anteriors ens serveixen d'orientació per escollir aquest valor; en l'assaig 4A-sc-028 la variació important de pendent de la gràfica es produeix a l'entorn del 85%, valor que s'escull per a comparar el temps que tarda l'aigua entrant en mesclar-se.

La Figura 7-2 és un recordatori de la nomenclatura utilitzada per a cadascuna de les entrades:

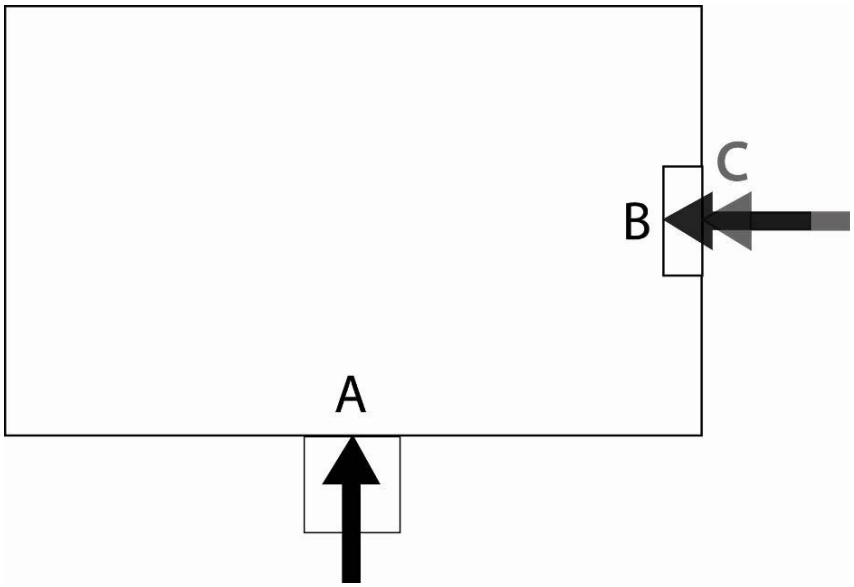
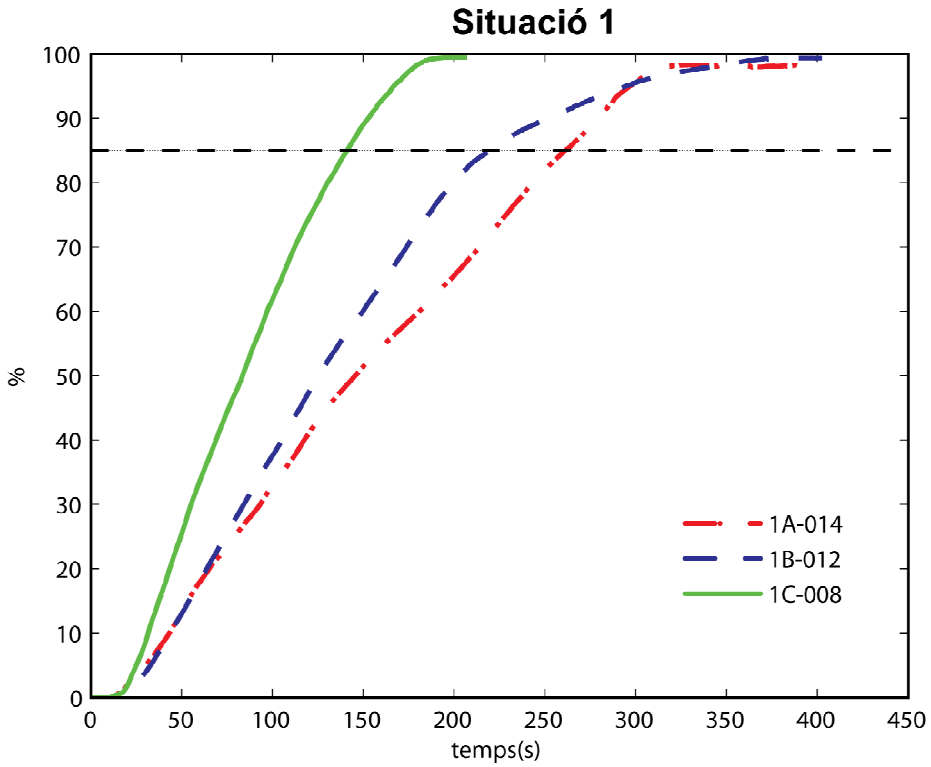


Figura 7-2 Entrades considerades en l'estudi

7.2.1. SITUACIÓ 1

Assaig no permanent. Entrant 15 litres/minut per l'entrada corresponent, i sense cabal de sortida. El nivell de la làmina lliure varia de 3.75 cm a 6.25 cm. L'assaig dura 7 minuts i 48 segons.

Escala temporal: 25.6.



Gràfic 7-3 Resultats Situació 1

L'entrada que aconsegueix una mescla més ràpida és l'Entrada C als 2 minuts i 22 segons, que correspon a menys d'una hora de mescla en el prototip. L'Entrada B ha mesclat el 85% del volum als 3 minuts i 40 segons, o el que és el mateix, al cap d'una hora i mitja en el prototip. Finalment, l'Entrada A és la més lenta mesclant el volum amb, gairebé, el doble de temps que l'entrada C; la Taula 7-1 mostra els resultats:

SITUACIÓ 1	**Escala temporal= 25.6**			
	T_m(s)	T_m	T_p(s)	T_p
A	260.5	4' 21"	6670	1h 51' 7"
B	219.3	3' 40"	5620	1h 33' 36"
C	131.3	2' 22"	3360	56' 2"

Taula 7-1 Resultats Situació 1

El raonament pel qual el jet funciona millor que les altres dues entrades no resulta trivial. Inicialment es pot pensar que l'aigua entra amb una quantitat de moviment molt superior en el cas de l'Entrada C. En aquesta entrada, els 5m^3/s es concentren en una canonada de dos metres de diàmetre, amb una quantitat de moviment igual a:

$$M_0 = \left(\frac{Q_0^2}{A_0} \right) = 8 m^4 / s^2 \qquad (7.1)$$

En les entrades A i B, el cabal de 5m^3/s té una caiguda lliure de 0.5. La velocitat d'arribada del raig a la làmina d'aigua correspon a la de Torricelli $v = \sqrt{2gh}$ =3.1 m/s.

Com que es produeix una caiguda lliure, es parteix d'un calat crític a l'extrem dels cargols. La secció de sortida està dividida en quatre sortides circulars –Figura 7-3- i cadascuna d'elles aboca el cabal amb un calat crític i una àrea crítica. Mitjançant el programa Aguapucha es calcula els valors d'aquestes dues variables obtenint el següent:

Δh_c=56 cm

A_c=0.62 m^2

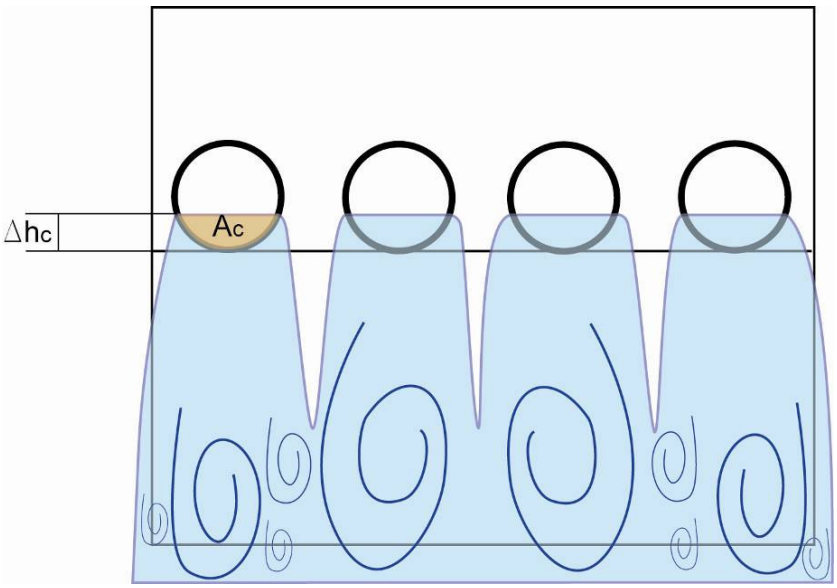


Figura 7-3 Caiguda lliure de l'aigua entrant per les entrades A i B.

Suposant que l'amplada del raig es aproximadament l'amplada de la secció quadrangular, de 14 metres, i menystenint les pèrdues, l'amplada amb la que arriba el raig a l'aigua és de:

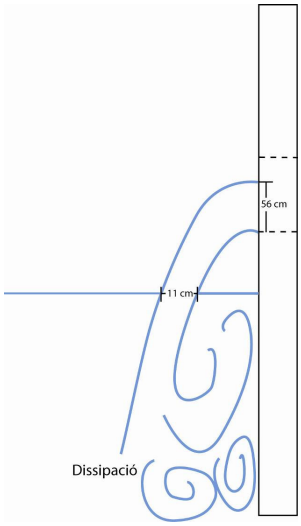
$$Q = v \cdot B \cdot l \rightarrow l = \frac{5\,m^3/s}{3.1\,m/s \cdot 14} = 11.5cm \qquad (7.2)$$

La velocitat crítica horitzontal amb la que el cabal inicia el descens és de 2 m/s. Amb això es pot calcular el momentum en la direcció horitzontal, comparable amb l'obtingut per l'Entrada C:

$$M_0 = \left(\frac{Q_0^2}{A_0} \right) = 9.92\,m^4/s^2 \qquad (7.3)$$

La quantitat de moviment d'entrada és lleugerament superior al valor del momentum horitzontal que proporciona l'Entrada C. Això suposaria que aquesta

última hauria de mesclar l'aigua de l'ambient de manera més eficient, cosa que no passa segons els resultats -Gràfic 7-3. El fenomen de dissipació en el moment del xoc amb la làmina d'aigua que es tradueix en una dissipació local per vórtexs d'eix paral·lel a la paret podria tenir-hi alguna cosa a veure –Figura 7-4-, però resulta que en aquest fenomen es dissipa, principalment, el momentum vertical. Per tant la disminució de quantitat de moviment horitzontal ve donada per un altre factor: la fricció entre rajos consecutius. Es pot veure com cauen totalment separats entre si, i un cop topen contra el terra del dipòsit s'ajunten per formar un sol front; en aquest punt es produeix la pèrdua de momentum en x per fricció entre els rajos –Figura 7-4-



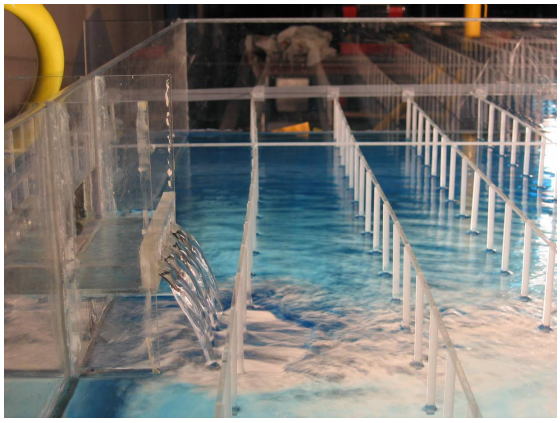
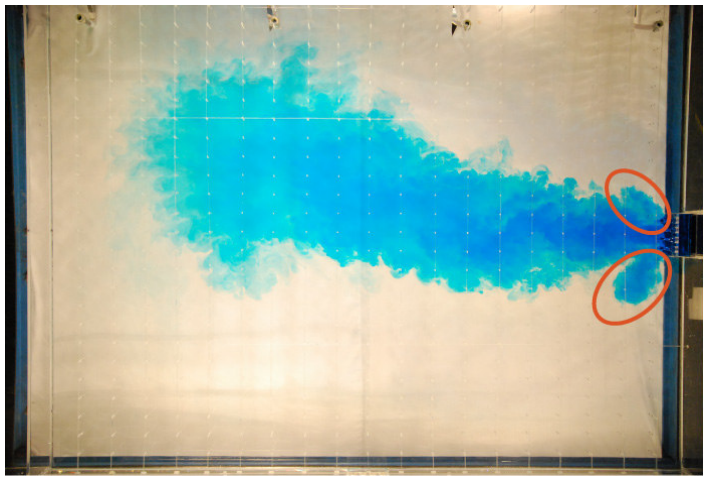


Figura 7-4 Dissipació vertical

Imatge 7-18 Fricció en la caiguda de A i B

Mereix una observació més detallada la comparació entre les entrades A i B, ja que durant els assajos l'Entrada B no manté la simetria que s'espera en la Situació 1. La Imatge 7-19 mostra aquesta manca de simetria:

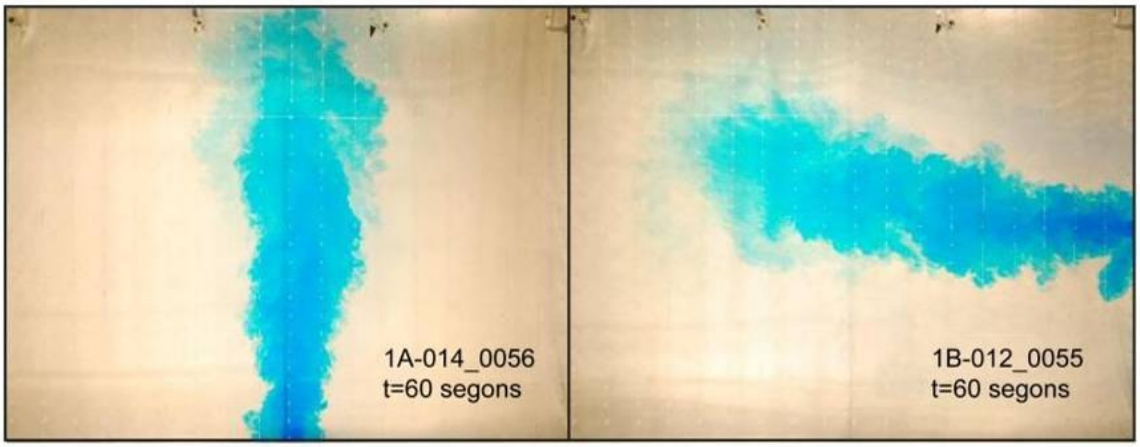


Imatge 7-19 1B-012_0066

És probable que l'asimetria d'aquesta entrada es degui a la situació dels cargols. En la Imatge, també es pot veure com immediatament després de la caiguda es produeixen dos vórtexs, un dels quals és molt més gran que l'altre, concretament el situat a la part dreta de l'entrada.

Teòricament, ambdues sortides haurien de tardar el mateix en mesclar, ja que el momentum inicial és el mateix i la quantitat de volum també. Malgrat això, el fet que el xoc contra la paret es produeixi més tard en el cas de l'aigua entrant per l'entrada B i la influència dels factors d'escala que s'ha esmentat abans, poden fer que la pendent de les corbes del Gràfic 7-3, corresponents a l'Entrada A i l'Entrada B siguin diferents. Així, la velocitat amb la que arriba l'aigua, entrant per l'Entrada A, a la paret que conté l'entrada, és superior a la velocitat en el mateix cas, però entrant per l'Entrada B.

En el Gràfic 7-3, els resultats de l'Entrada A i B, coincideixen fins als 60 segons amb un 18% del volum mesclat, moment a partir dels quals les gràfiques es separen. Com mostra la Imatge 7-20 als 60 segons l'aigua de l'entrada A és ja a la paret oposada i comença a mesclar-se per la paret; a més, en aquest punt, es comença a veure la no simetria de l'Entrada B.

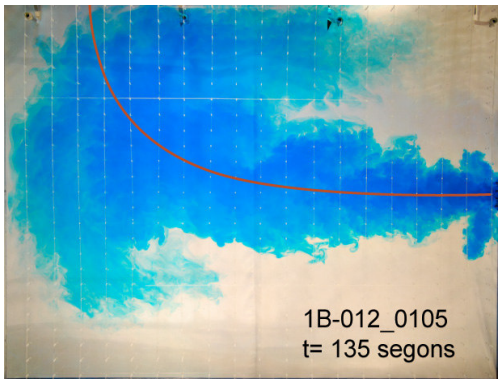


Imatge 7-20 Xoc de l'Entrada A contra la paret oposada.

En l'entrada B passa el mateix: als 135 segons, la gràfica canvia lleugerament la pendent; aquest moment coincideix amb el xoc del raig contra la paret superior de la fotografia -Imatge 7-21-.

Imatge 7-21 Xoc de l'entrada B contra la paret superior

L'efecte laminar produït al final de la mescla també és diferent en ambdues entrades. En l'Entrada A, l'aigua arriba a la paret oposada amb una velocitat major a la que ho fa quan entra per l'Entrada B, però les pèrdues són superiors en el cas de l'Entrada B ja que el raig recorre més longitud que en l'entrada A La variació de la pendent de les corbes en el Gràfic 7-3, corrobora aquesta afirmació, perquè en el cas de A, es produeix als 310 segons,



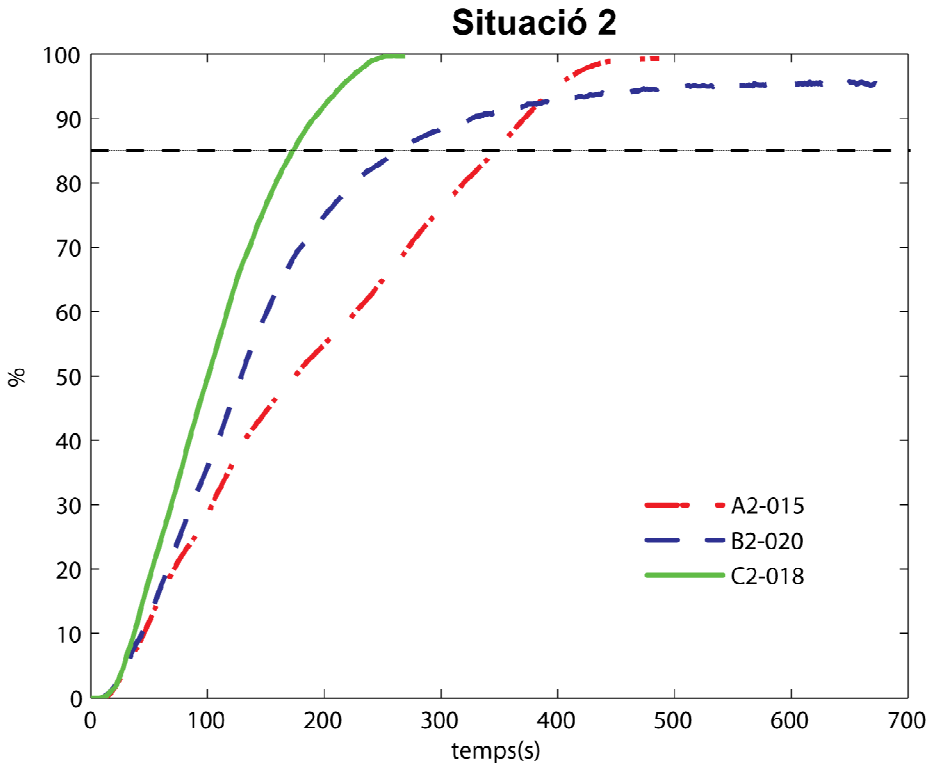
en canvi, en el cas de l'Entrada B es produeix als 224 segons, aproximadament.

Malgrat tot, cal repetir que els resultats de l'Entrada B cal analitzar-los amb cura pel fet que la mescla no resulta simètrica. Probablement, la simetria millori els resultats.

7.2.2. SITUACIÓ 2

Assaig no permanent. Entrant 15 litres/minut per l'entrada corresponent i sortint 25 litres/minut per les quatre sortides -6.25litres/minut/sortida-. El nivell de la làmina lliure varia de 6.25 cm a 3.875 cm teòrics. L'assaig dura 11 minuts i 15 segons.

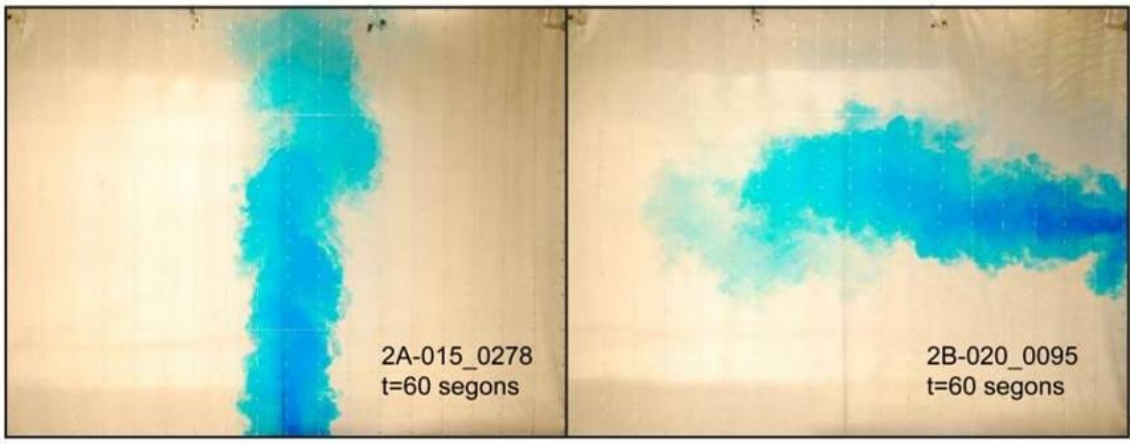
Escala temporal: 42.7.



Gràfic 7-4 Resultats Situació 2

L'entrada C és també la més ràpida en mesclar el 85% del volum seguida de l'Entrada B sent, finalment, l'Entrada A, la més lenta en mesclar.

De manera qualitativa, els resultats no disten massa de l'assaig anterior. Existeix un moment a partir del qual les gràfiques A i B se separen i coincideix també amb el moment en el qual l'aigua entrant per A topa amb la paret oposada. La separació es produeix als 60 segons amb un 16% del volum amb inici de mescla, però és important destacar que les escales temporals no són les mateixes entre un assaig i l'altre. La Imatge 7-22 mostra el moment a partir del qual les gràfiques es separen, i la Taula 7-2 dóna els resultats de mescla.

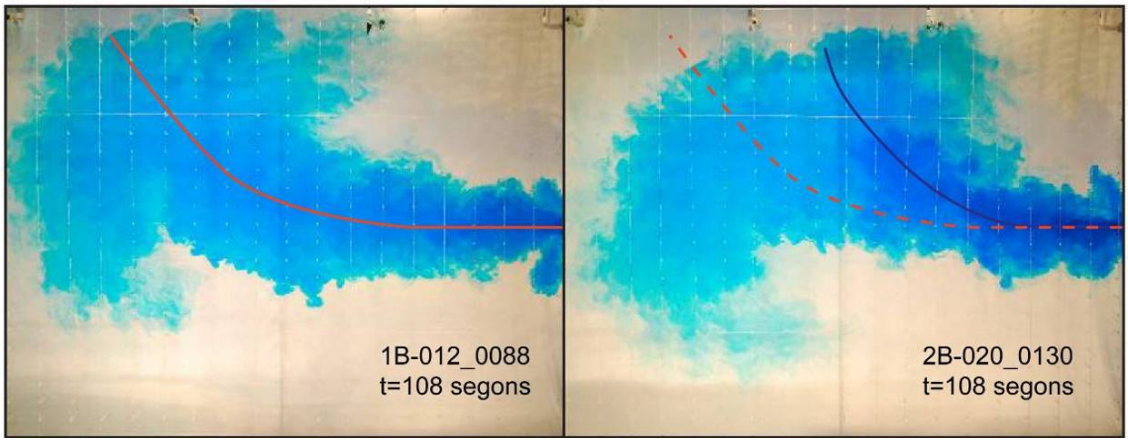


Imatge 7-22 Xoc de l'Entrada A contra la paret oposada

SITUACIÓ 2	Escala temporal= 42.7			
	T_m(s)	T_m	T_p(s)	T_p
A	347.8	5' 48"	14800	4h 7' 19"
B	264.9	4' 25"	11300	3h 8' 24"
C	173.2	2' 53"	7390	2h 3' 11"

Taula 7-2 Resultats Situació 2

Hi ha una hora de diferència entre les entrades consecutives, sent de dues hores la diferència entre A i C. La desviació de l'Entrada B de la qual es parla en la Situació 1 també cal tenir-la en compte ara.



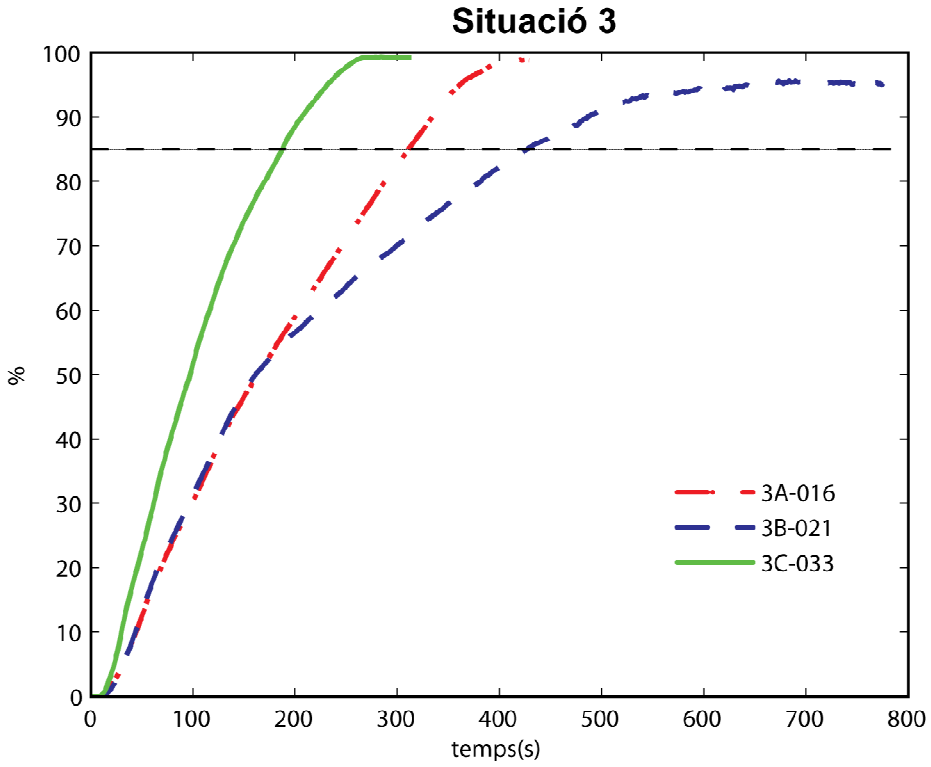
Imatge 7-23 Variació de la desviació de l'Entrada B, respecte la Situació 1

A la dreta de la Imatge 7-23 hi ha el fotograma l'assaig actual on es pot veure un augment de la desviació provocat per la influència de les sortides. Malgrat la desviació originària, els resultats continuen sent més favorables en el cas de l'Entrada B i com s'ha dit abans, es preveu una millora dels resultats d'aquesta entrada si s'aconsegueix la simetria en la Situació 1.

7.2.3. SITUACIÓ 3

Assaig permanent. Entrant 15 litres/minut per l'entrada corresponent i sortint-ne 15 litres/minut per les quatre sortides -3.75litres/minut/sortida-. El nivell de la làmina lliure es manté estable als 6 cm. L'assaig dura 19 minuts i 30 segons.

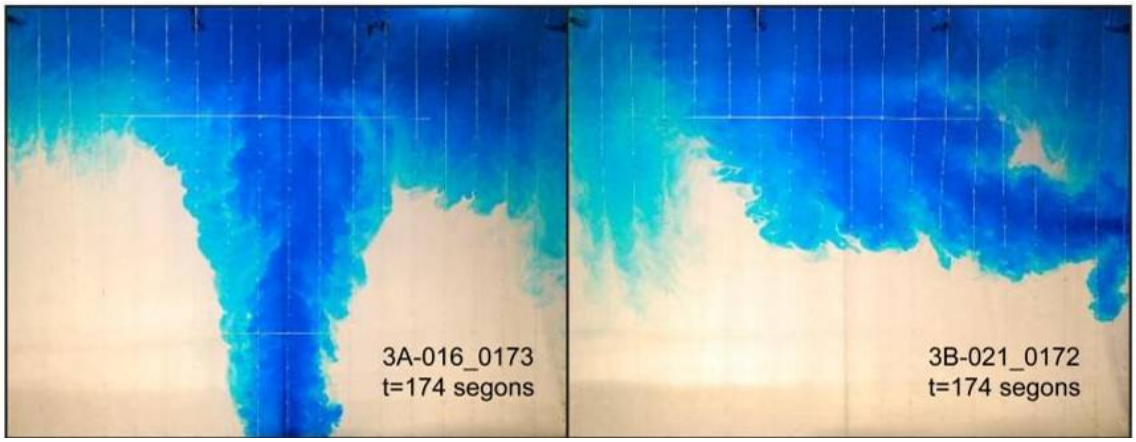
Escala temporal: 25.6.



Gràfic 7-5 Resultats Situació 3

En aquest assaig, l'Entrada C continua sent la més eficient amb diferència respecte les altres dues, però es canvien les tornes pel què fa a les entrades A i B. L'assaig permanent afavoreix la mescla de l'aigua entrant per A, la gràfica de la qual presenta un pendent constant i igual al de l'Entrada B fins al 52% del volum amb inici de mescla.

Als 174 segons la mescla de l'aigua entrant per A es comença a diferenciar de la mescla de l'aigua que entra per B. La fotografia de la dreta de la Imatge 7-24 dibuixa l'explicació d'aquesta similitud entre entrades: el raig que entra per B va a xocar contra la paret oposada a l'Entrada A, pràcticament al punt mig, i per tant el fenomen es similar en les dues entrades, fins que l'aigua que es desplaça cap a la dreta vorejant la paret forma la cel·la que hi ha a la fotografia dreta (el xoc es continua produint als 60 segons com en el cas de la situació 1, i el canvi de pendent en aquest punt també és apreciable al Gràfic 7-5). És quan xoca amb el mateix raig que entra per B que es comencen a produir les diferències entre una entrada i l'altra, ja que l'aigua fluint per la dreta de la paret no pot creuar el raig.



Imatge 7-24 Instant de canvi de pendent entre les corbes de l'Entrada A i B.

El fet que l'aigua s'acabi mesclant indica que, per continuïtat de massa, l'aigua clara que hi ha dins de la cel·la marxa deixant lloc a aigua nova i mesclant-se a la vegada. La Figura 7-5 mostra les línies de corrrent i la mescla de l'aigua.

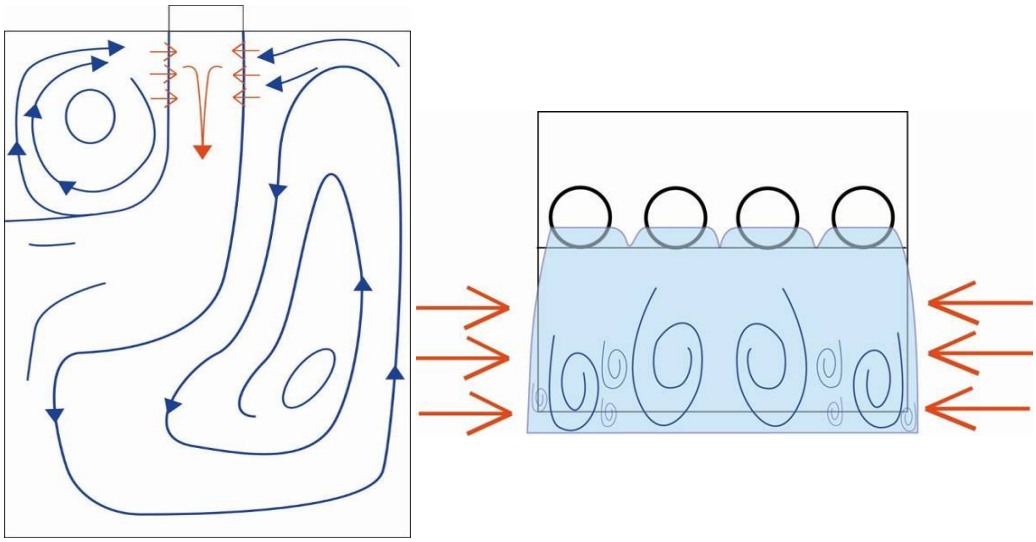


Figura 7-5 Línies de corrent de l'assaig 3B

La desviació del raig deguda a problemes constructius, en aquest cas podria millorar els resultats obtinguts per l'Entrada B, però no es pot afirmar que la millora superés l'eficiència de la mescla obtinguda per l'Entrada A.

A la Taula 7-3 es pot veure com les diferències entre una entrada i la resta són significatives:

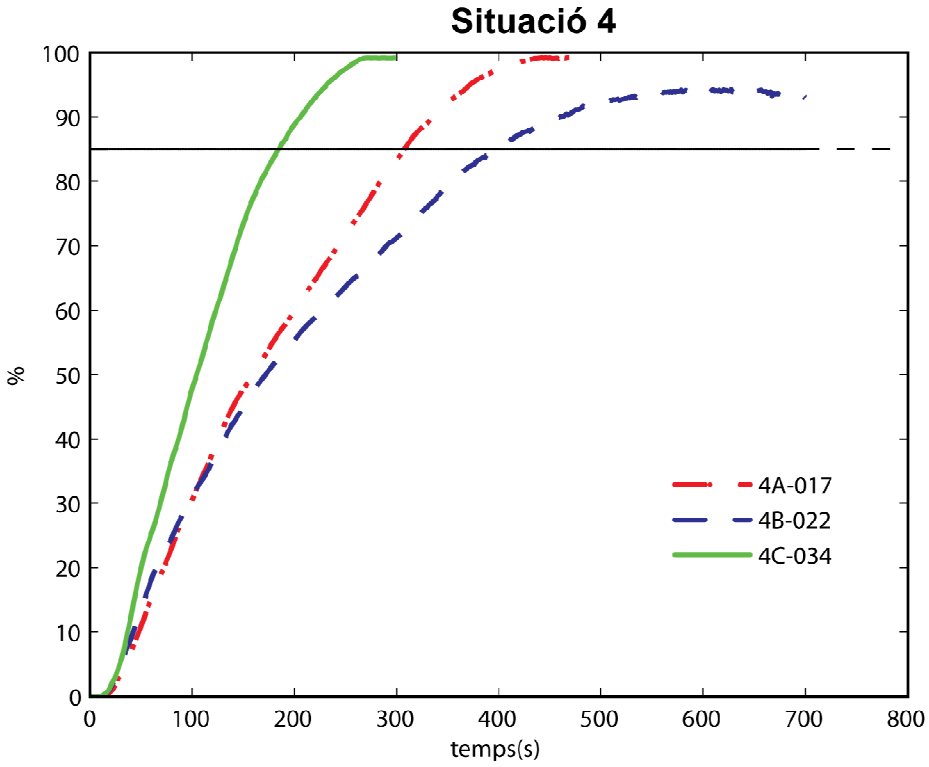
SITUACIÓ 3	**Escala temporal= 25.6**			
	T_m(s)	T_m	T_p(s)	T_p
A	312.3	5' 13"	7800	2h 13' 16"
B	219.3	7' 9"	11000	3h 3' 7"
C	188	3' 8"	4810	1h 20' 13"

Taula 7-3 Resultats Situació 3

7.2.4. SITUACIÓ 4

Assaig permanent. Entrant 15 litres/minut per l'entrada corresponent i sortint-ne 15 litres/minut per les sortides 3 i 4 -7.5litres/minut/sortida-. El nivell de la làmina lliure es manté estable als 6.76 cm. L'assaig dura 19 minuts i 30 segons.

Escala temporal: 25.6.



Imatge 7-25 Resultats Situació 4

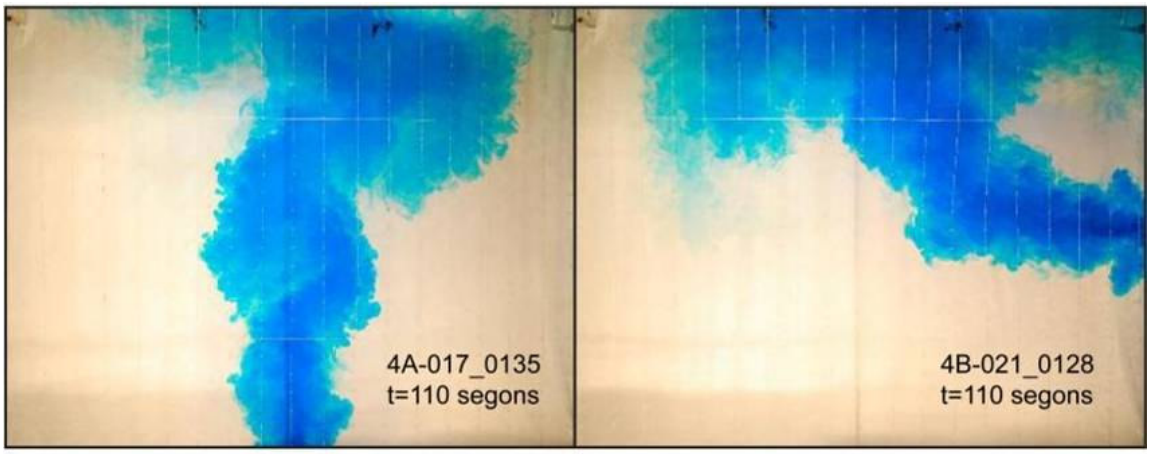
Seguint amb la tònica de la resta d'assajos l'Entrada C és, amb diferència, la que obté un millor resultat pel què fa a eficiència de la mescla. Com en el cas de l'assaig anterior, l'Entrada A millora respecte la B resultant ser més eficient. A la Taula 7-4 es poden veure els resultats numèrics.

SITUACIÓ 4	**Escala temporal= 25.6**			
	T_m(s)	T_m	T_p(s)	T_p
A	307.8	5' 8"	7880	2h 11' 20"
B	219.3	6' 38"	10200	2h 49' 52"
C	185	3' 5"	4740	1h 18' 58"

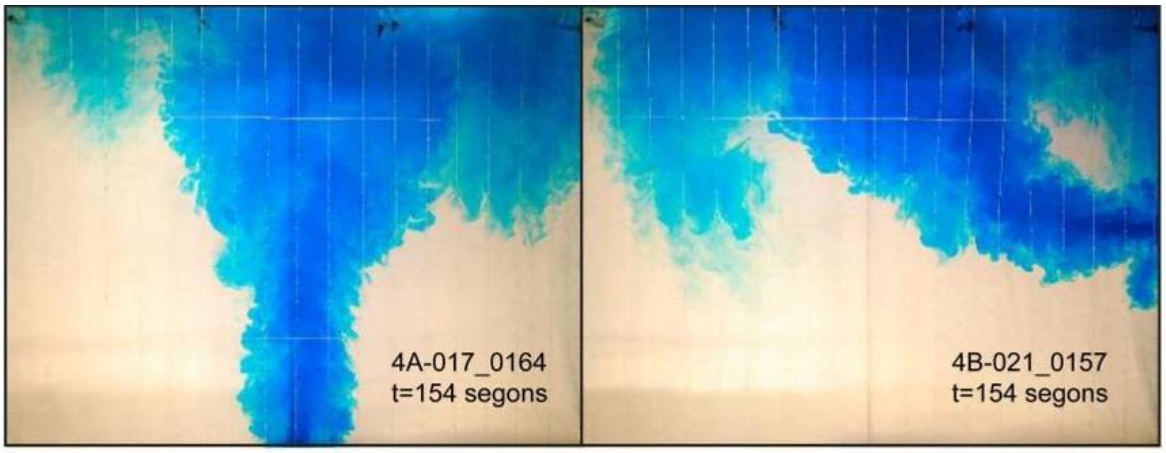
Taula 7-4 Resultats Situació 4

També com en la resta d'assajos, les diferències entre les entrades A i B es fan evidents a partir d'un punt en el temps, corresponent a un volum d'inici de mescla. En aquest cas es tracta del 34% de volum mesclat quan han passat 110 segons des

de l'inici de l'assaig. En aquest cas no correspon a un fotograma decisiu en cap de les dues entrades, com demostra la Imatge 7-26, però si es suposa que les dues corbes comencen a separar-se a partir del moment en el qual el 48% del volum ja ha començat el procés de mescla, els resultats obtinguts en fotogrames són els mateixos que en la Situació 3 –Imatge 7-27-



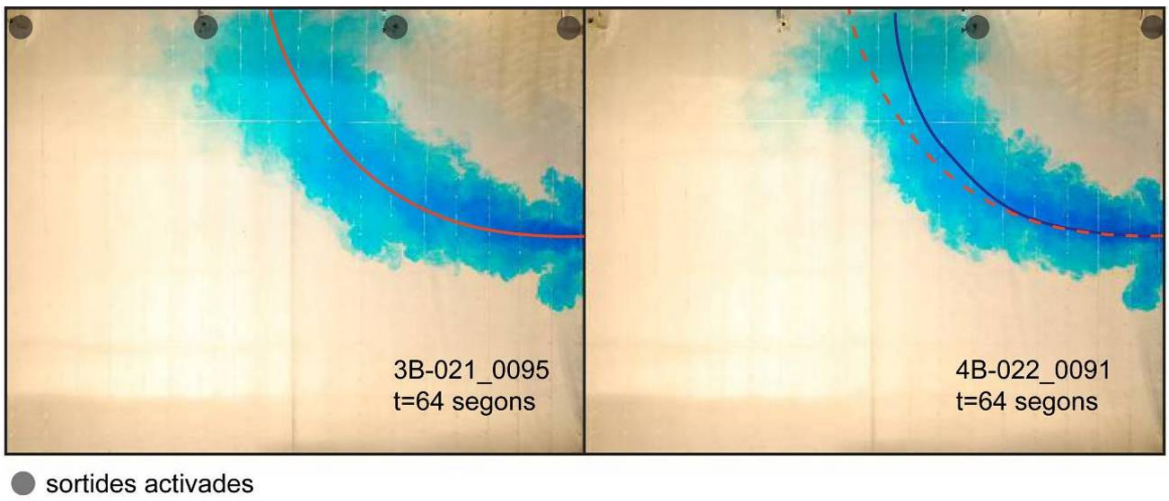
Imatge 7-26 34% de volum mesclat



Imatge 7-27 48% de volum mesclat

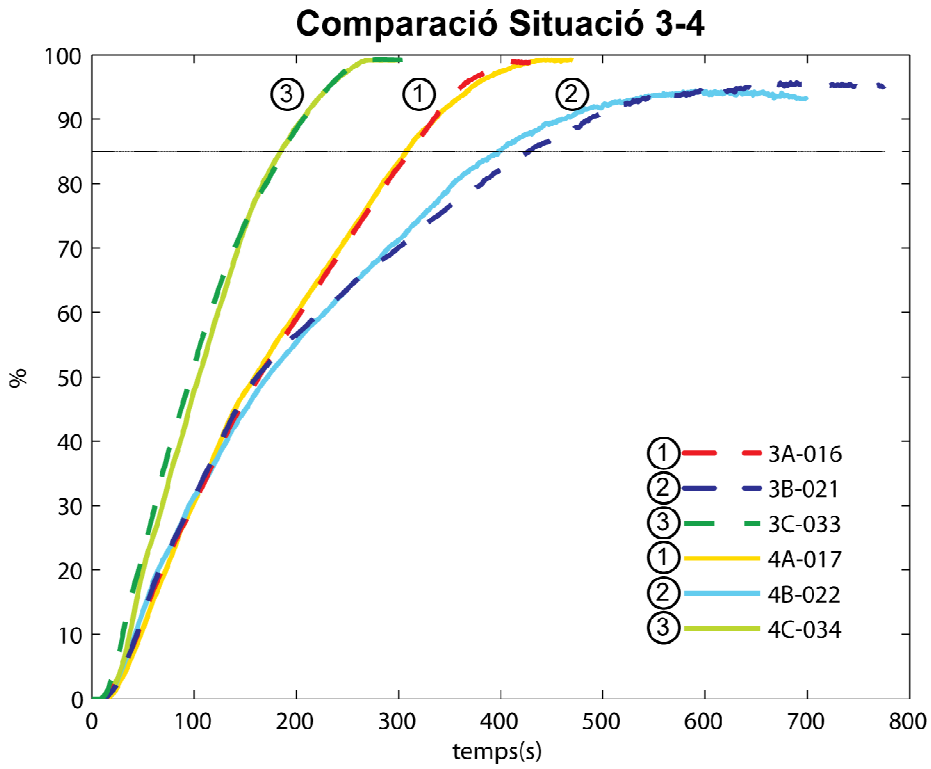
És important destacar, que el fet que les quatre sortides no estiguin obertes de manera simètrica influeix en el fet que les gràfiques es separen numèricament a partir del moment en el qual l'aigua que entra per A comença a desplaçar-se paral·lela a la meitat dreta de la paret oposada. Igualment, la separació més gran entre ambdues gràfiques es produeix quan la taca que s'ha desplaçat cap a la meitat esquerra de la paret oposada a A arriba a l'Entrada B en l'Assaig 4B-021.

La Imatge 7-28 dibuixa les diferències d'orientació en la direcció de la taca entre dos fotogrames corresponents a la Situació 3 i 4, indicant la influència de l'obertura de les dues sortides situades a la dreta, respecte a les quatre sortides alhora. Quan s'activen només les dues sortides el raig d'aigua nova es desvia més cap a la dreta de l'eix de simetria vertical.



Imatge 7-28 Variació d'orientació de l'Entrada B

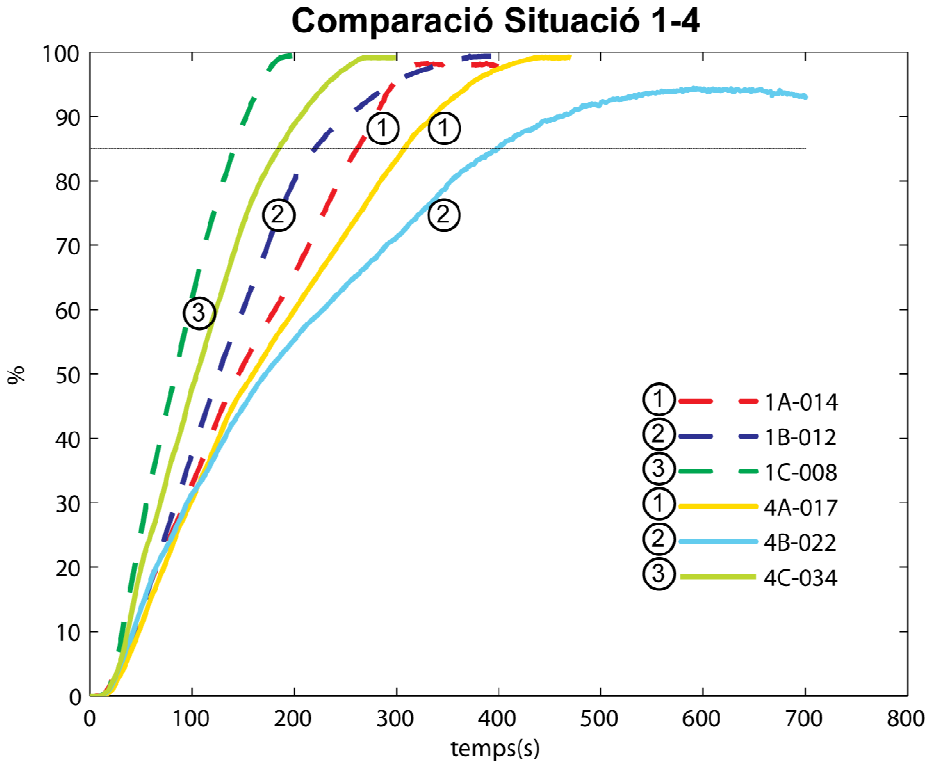
Comparant la Situació 3 amb la Situació 4 per veure la influència de les sortides en resulta el Gràfic 7-6:



Gràfic 7-6 Comparació Situació 3-4

Els resultats no disten massa entre un assaig i l'altre, confirmant el fet que les gràfiques corresponents a les entrades A i B comencen a divergir a partir del punt en el qual l'aigua entrant per B que xoca contra la paret oposada a l'Entrada A, forma la cel·la i arriba a l'Entrada B -Figura 7-5-

Així mateix, també es poden comparar els Assajos 3 i 4 amb la Situació 1, ja que l'escala temporal és la mateixa.



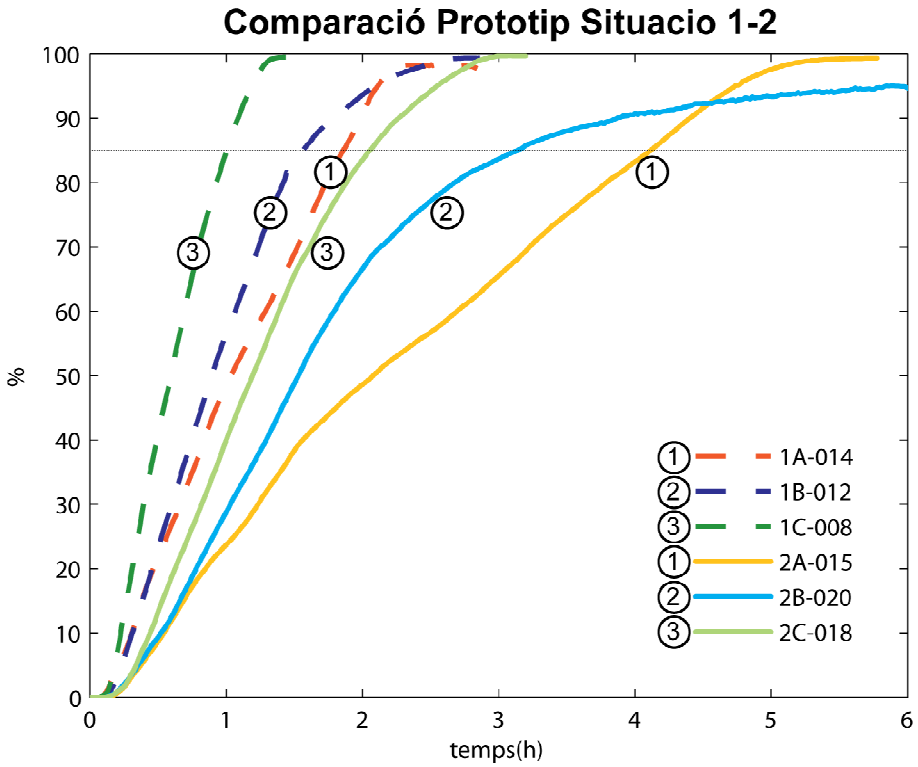
Gràfic 7-7 Comparació Situació 1-4

En el Gràfic 7-7 es pot veure com l'entrada C és la millor en qualsevol dels casos, essent més eficient la mescla en el cas de la Situació 1. Així mateix la mescla es barreja amb menys temps en la Situació 1 per les tres entrades i la pitjor situació es dóna en l'Entrada B i la Situació 3-4.

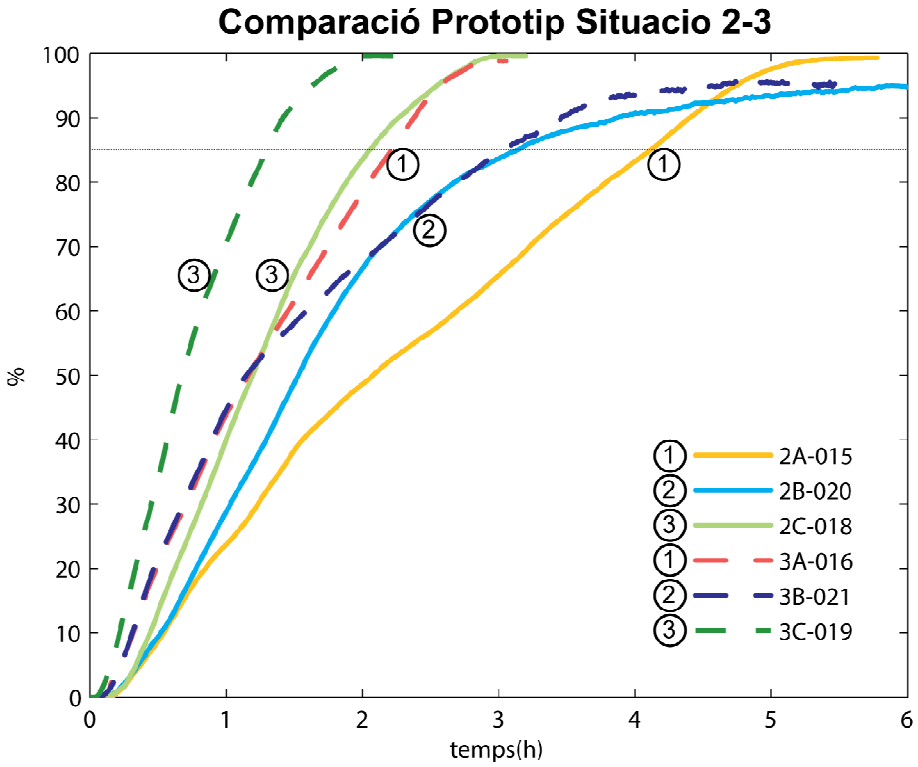
Retocar les escales temporals de l'eix d'abscisses permet fer una comparació en prototip de totes les situacions plantejades en els assajos anteriors, Gràfic 7-8 i Gràfic 7-9. El pitjor cas el planteja la segona situació –Assaig 2- per l'entrada A (Taula 7-5); en canvi l'Entrada C obté els resultats més ràpids en totes les situacions, sent la Situació 2 quan la mescla es barreja de manera més ineficient en aquesta entrada.

ENTRADA	SITUACIÓ 1	SITUACIÓ 2	SITUACIÓ 3	SITUACIÓ 4
A	1h 51' 7"	4h 7' 19"	2h 13' 16"	2h 11' 20"
B	1h 33' 36"	3h 8' 24"	3h 3' 7"	2h 49' 52"
C	56' 2"	2h 3' 11"	1h 20' 13"	1h 18' 58"

Taula 7-5 Resultats en el prototip



Gràfic 7-8 Comparació en prototip de les Situacions 1-2



Gràfic 7-9 Comparació en prototip de les Situacions 2-3

7.3. INFLUÈNCIA DE LES COLUMNES

El dipòsit d'abastament d'aigua en estudi està tapat per una llosa de formigó lleuger, suportada a través de 950 columnes aproximadament. Aquestes columnes influeixen en l'eficiència de la mescla frenant el flux i a la vegada dividint-lo afavorint-ne la mescla localment.

El model construït conté 475 columnes col·locades de manera equidistant entre elles –Figura 7-6-, aguantades amb llindes per la part superior per facilitar la seva extracció. El projecte inicial consta de les 950 columnes esmentades en el paràgraf anterior, però la modificació que presenta Rubau S.A. en aquest aspecte, considera només 450 columnes.

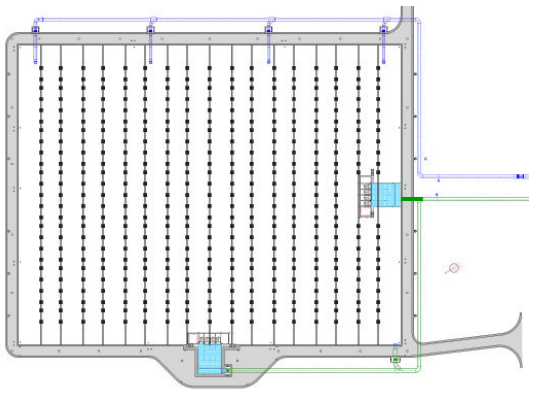


Figura 7-6 Columnes existents al model

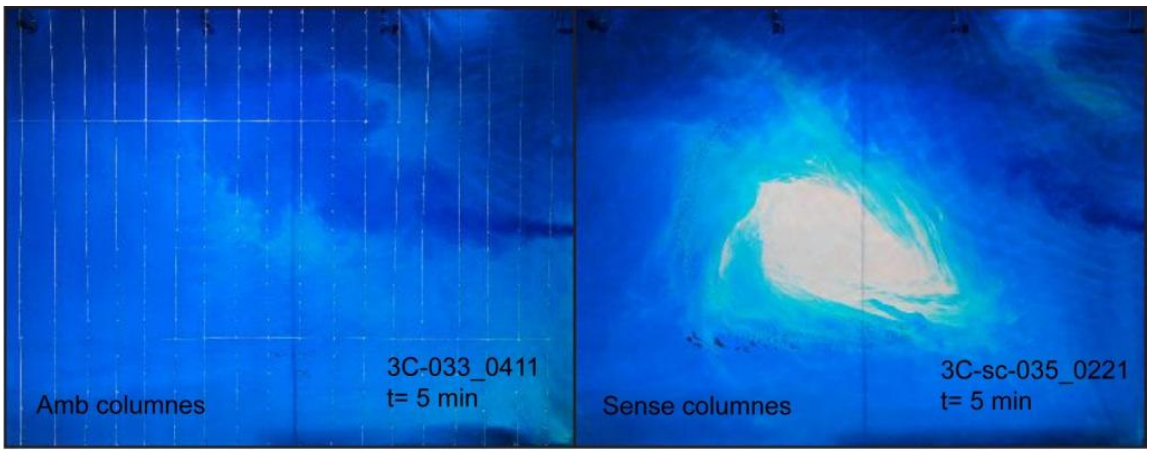
És interessant veure si hi ha un valor de columnes òptim per afavorir l'eficiència de la mescla, però aquest estudi es limita comparar l'evolució de l'aigua entrant amb totes les columnes i l'evolució de la mescla entrant a un dipòsit sense columnes.

Seguint amb la nomenclatura marcada al llarg de tota la tesina, sense columnes s'ha fet els següents assajos:

- 1B-sc-025
- 2C-sc-036
- 3C-sc-035
- 4A-sc-029

Els assajos sense columnes mostren una influència de l'efecte laminar al final de cadascun d'ells molt més important que als assajos amb columnes. Les cel·les que es formen tarden molt més a desaparèixer, tot i acabar fent-ho –algunes fora del temps de l'assaig-.

El càlcul aproximat de l'escala de Kolmogorov serveix per veure com el radi de les cel·les que es formen als assajos sense columnes anirà disminuint tot i estar en Reynolds molt baixos. L'escala de Kolmogorov és de l'ordre de 10^{-4} metres i per tant la cel·la que hi ha a la Imatge 7-29 i les de la Imatge 7-30 acabaran desapareixent.



Imatge 7-29 Comparació en el mateix instant d'un assaig amb columnes (esquerra) i un sense columnes (dreta)

La Imatge 7-29 i els Gràfic 7-10, Gràfic 7-101, Gràfic 7-12, Gràfic 7-123, argumenten la influència de l'efecte laminar. El canvi de pendent és produeix abans, i de manera molt més pronunciada, quan es tracta de mescla sense influència de columnes que amb aquestes obstaculitzant el fluid. Aquest canvi es produeix al voltant del 80% de volum mesclat quan la composició és pràcticament la mateixa en tots els assajos i, tret de l'Entrada A, el diàmetre de les cel·les convectives és el mateix –Imatge 7-29, Imatge 7-30-.

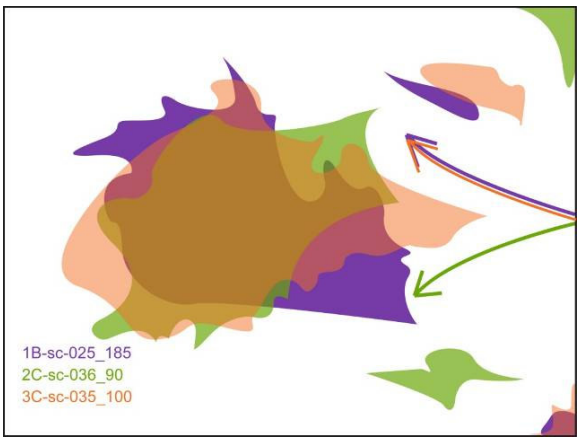
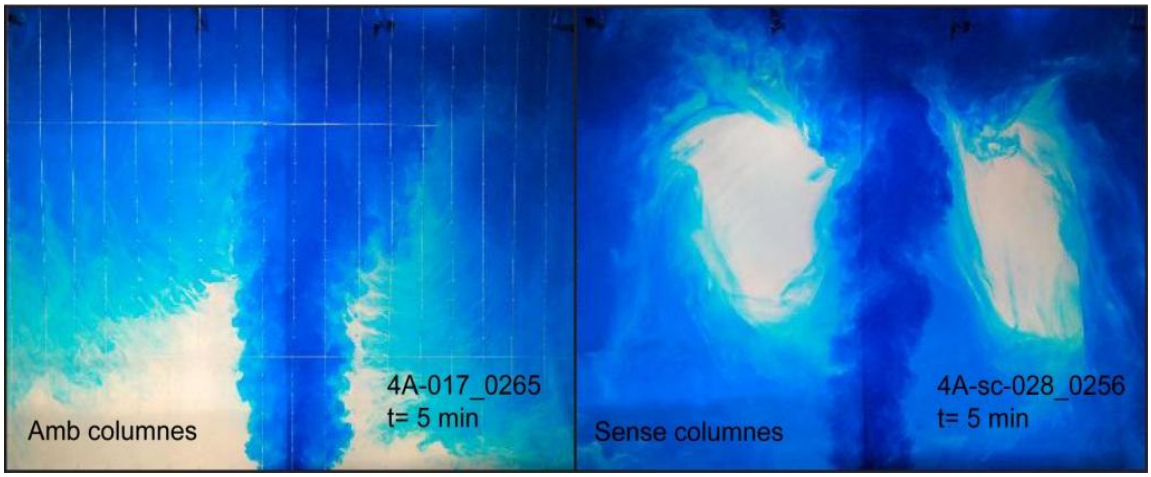


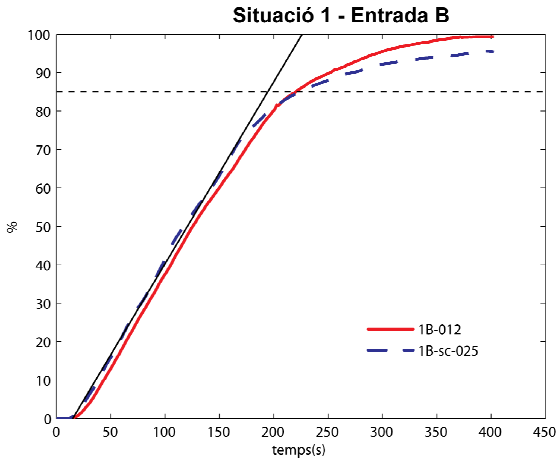
Figura 7-7 Zona blanca amb el 80% de volum mesclat.

La Figura 7-7 esquematitza la taca existent en els assajos de les entrades B i C sense columnes, que hi ha quan el volum mesclat és del 80% aproximadament el front de la mescla comença tenir un comportament laminar. Es pot veure com les taques tenen la mateixa composició en el cas dels assajos 1B i 3C i la situació és simètrica en l'assaig 2C –ja que el jet té una direcció simètrica respecte l'eix horitzontal.

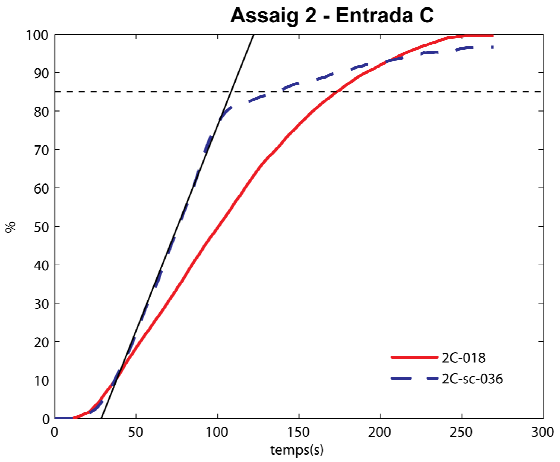
El cas de l'Entrada A és diferent ja que les dues cel·les convectives que es formen tenen, més o menys, la mateixa mida i un diàmetre més petit, però en cap cas comparable a la resta d'entrades pel què fa a dimensions de les cel·les i forma d'aquestes.



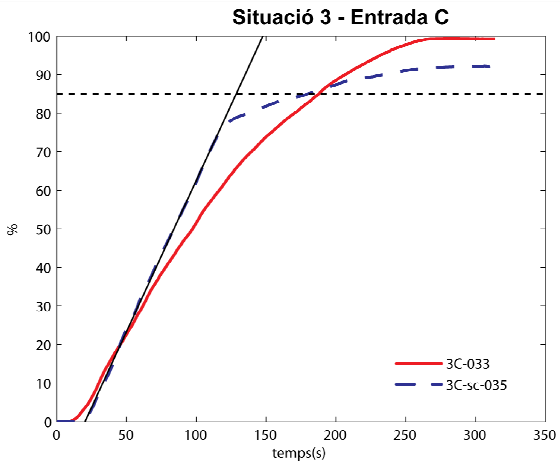
Imatge 7-30 Entrada A, comparació d'un assaig amb columnes (dreta) i un sense columnes (esquerra)



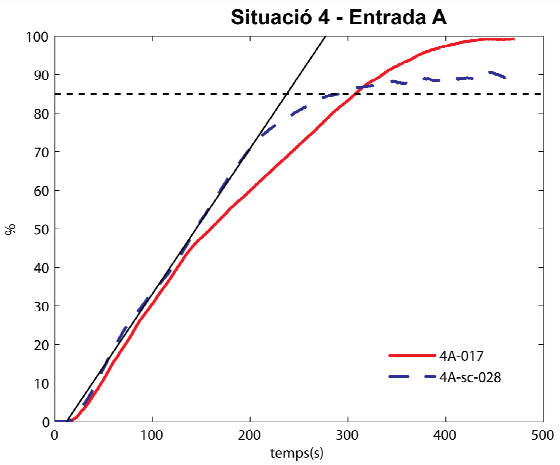
Gràfic 7-10 Situació 1-Entrada B



Gràfic 7-11 Situació 2-Entrada C



Gràfic 7-12 Situació 3-Entrada C



Gràfic 7-13 Situació 4-Entrada A

Les columnes frenen el flux i ralenteixen la mescla reduint-ne l'eficiència però, a la vegada, el divideixen evitant la formació de cel·les convectives. En aquest cas, un cop a topat contra la paret oposada a la sortida, el flux avança en pistó i en direcció

oposada a la d'entrada, amb turbulència puntual aigües avall de les columnes per l'aparició d'Esteles de Von Kárman.

En el prototip, els efectes d'escala és molt probable que no es produeixin, ja que la turbulència és molt superior ja, des de l'entrada.

Els resultats indiquen que les columnes produeixen un efecte negatiu en l'eficiència de la mescla, però amb molt poca diferència de temps en la majoria d'assajos comparatius degut als efectes que produeix el flux laminar al final dels assajos. De totes maneres, seguint amb els arguments exposats en l'apartat anterior, l'efecte laminar té molta més incidència en aquest tipus d'assajos i cal fer una aproximació lineal de la gràfica en el seu període turbulent per veure quin serà el resultat en la realitat. Es comprova com els resultats difereixen, a la Taula 7-6 on la diferència entre l'aproximació lineal i els resultats obtinguts arriba a ser de 20 minuts, però les diferències entre els assajos amb columnes i els assajos sense columens poden ser de 30 minuts.

ASSAIG	Amb columnes		Sense columnes			
			Resultat exacte		Aproximació lineal	
	T_m	T_p	T_m	T_p	T_m	T_p
1B	3' 40"	1h 34' 5"	3' 45"	1h 36'	3' 15"	1h 23' 22"
2C	2' 53"	2h 3' 1"'	2' 18"	1h 37' 51"	1' 48"	1h 16' 48"
3C	3' 8"	1h 20' 13"	3' 1"	1h 17' 3"	2' 9"	54' 75"
4A	5' 8"	2h 11' 20"	4' 52"	2h 4' 25"	3' 58"	1h 41' 41"

Taula 7-6 Resultats comparatius dels assajos sense columnes.

7.4. SOLUCIONS DE L'EQUACIÓ DE NAVIER-STOKES

Una de les sorpreses que han acompanyat els assajos és la direcció del jet format per l'Entrada C.

Tret de la situació en la qual el raig ha de ser simètric –cas de la Situació 1- el primer assaig en el qual es van activar les sortides va suposar una sorpresa ja que el jet es va dirigir en direcció oposada a aquestes –Imatge 7-31-.

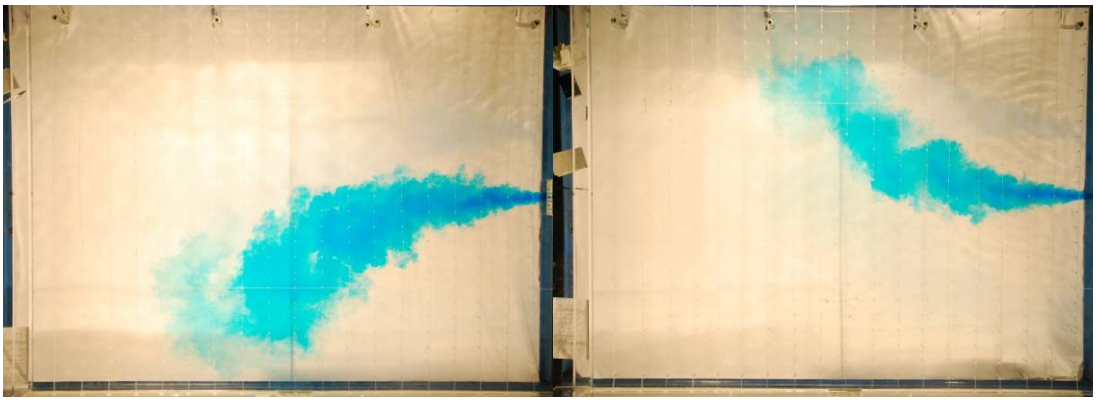
La resta d'assajos –tots realitzats amb columnes- van donar el mateix resultat ajudant a trobar una explicació pel fenomen existent. En el primer dels assajos en el qual es van treure les columnes, sorprenentment el jet es va torçar dirigint-se cap a les sortides –Imatge 7-31-. Un cop retocada la creu que eliminava la vorticitat –col·locada dins de la canonada- la direcció continuà sent la mateixa, dirigint el jet, de nou a les sortides.

Després d'un parell d'assajos d'aquest tipus, el jet es tornà a dirigir cap al costat oposat a les sortides i, a partir d'aquí, de manera alternativa va anar donant solucions cap a un costat i cap a l'altre.

Mirant el jet des d'aigües avall la nomenclatura utilitzada en endavant serà la següent:

- Esquerra: si es dirigeix cap a les sortides.

- Dreta: si es dirigeix cap a la paret oposada a les sortides.



Imatge 7-31 Assaig 3C-019_069

Imatge 7-32 Assaig 3C-033_0227

L'explicació d'aquesta aleatorietat rau en les solucions de l'Equació de Navier-Stokes. Com s'ha dit en la part teòrica no està demostrada l'existència de solució i la unicitat d'aquesta. De fet la no linealitat que li proporciona el terme convectiu pot provocar perfectament la situació presentada.

Pel què fa al jet que es dirigeix cap a la dreta, apareix la contradicció de la continuïtat de massa. Com es renova l'aigua de dins la cel·la? Es forma una cel·la de menor radi en aquesta zona, que acaba desapareixent, per tant, l'aigua que hi ha dins la ha de sortir-ne d'alguna manera per afavorir la mescla. La Figura 7-8 que hi ha a continuació, dibuixa l'existència de petits fenòmens locals que s'han observat durant els assajos:

La continuïtat de massa en la cel·la petita juntament amb la mescla total d'aquesta és possible gràcies a l'existència de petits fluxos verticals just a sobre del jet. L'aigua de la part esquerra arriba a creuar el jet, però es produeix un flux vertical que és atret pel mateix jet. L'aigua que està situada a l'alçada del jet, directament es mescla amb el raig entrant al dipòsit. A més, degut a l'existència de les sortides, hi ha també una petita diferència entre la làmina lliure de l'esquerra i la de la dreta que propicia aquesta incorporació de cabal de la dreta al jet.

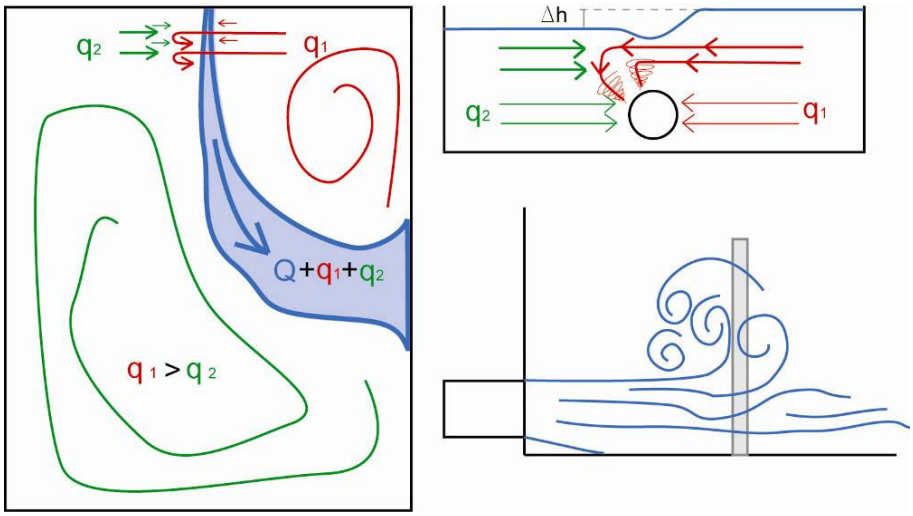
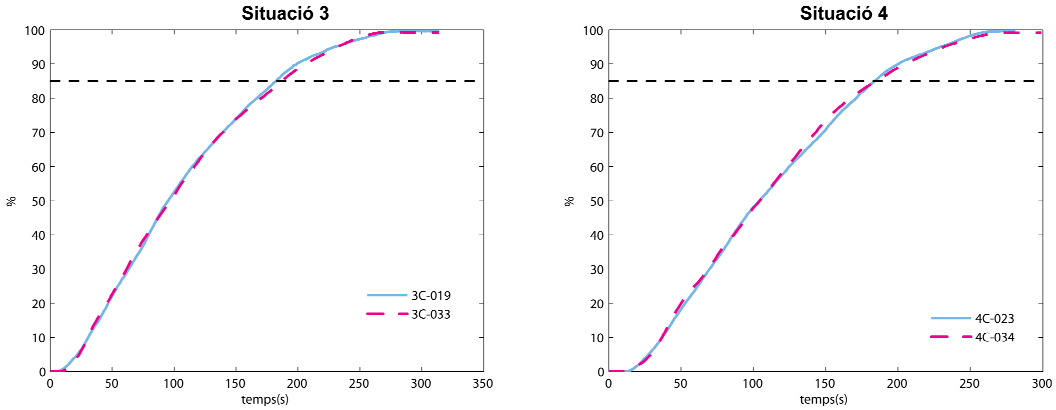


Figura 7-8 Croquis de les línies de corrent

Degut a la diferència d'alçada de la làmina d'aigua $q_1>q_2$, fet que força encara més al jet a mantenir-se en aquesta direcció.

En tots els casos l'aportació de cabal des del medi al jet es sustenta pel fet que la velocitat radial passa a ser negativa –és a dir, d'aportació externa- a partir de ¾ parts del radi del jet en cada instant, aproximadament –Figura 4.9-.

Pel què fa a la influència, de la direcció inicial que pren el jet, en l'eficiència de la mescla, els resultats confirmen que aquesta és independent de la direcció.



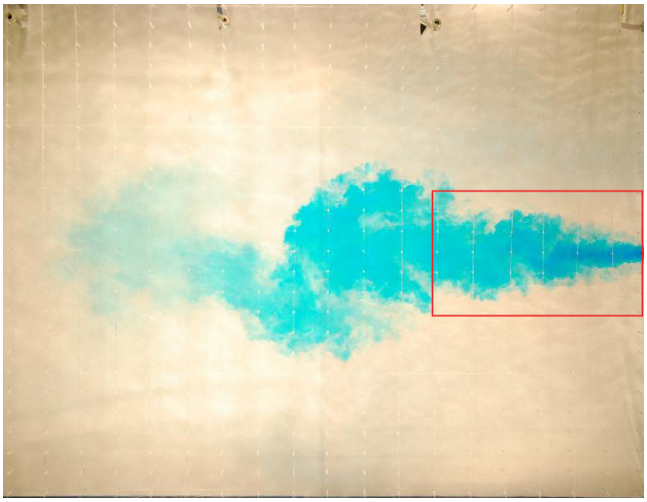
Gràfic 7-14 Situació 3 (esquerra), Situació 4 (dreta). Comparativa de les dues solucions físiques de l'Entrada C

Cal comentar la diferència durant la realització dels assajos: els assajos 3C-019 i 4C-023 es començaren a enregistrar abans d'acabar el transitori, a diferència dels assajos 3C-033 i 4C-034 en els quals hi hagué un temps d'espera de 30' fins aconseguir el règim permanent. És igualment sorprenent la coincidència de les gràfiques.

7.5. FRACTALITAT DEL JET

Utilitzant la tècnica de box-counting per veure quin és el valor de la dimensió fractal del jet a la sortida, l'avaluació es fa exclusivament de la zona de sortida del jet perquè és on la turbulència encara és prou elevada i per tant l'autosemblança es manté -Imatge 7-33-.

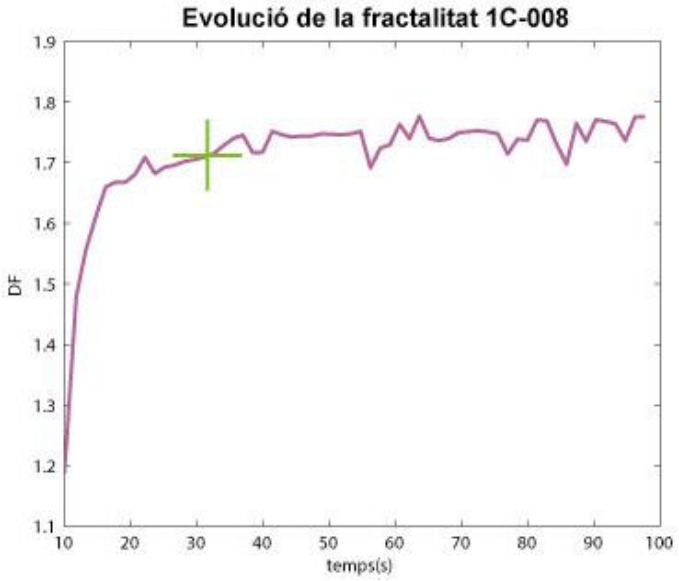
El tractament de la imatge fet per aquest anàlisi es limita exclusivament a la transformació en escala de grisos de les imatges enregistrades en RGB . Això es deu al fet que el postprocessat especificat anteriorment, modifica les línies d'igual concentració, sobretot en el moment en el qual s'agafa el màxim entre el blau i el verd.



Imatge 7-33 Marc utilitzat per la tècnica de box-counting

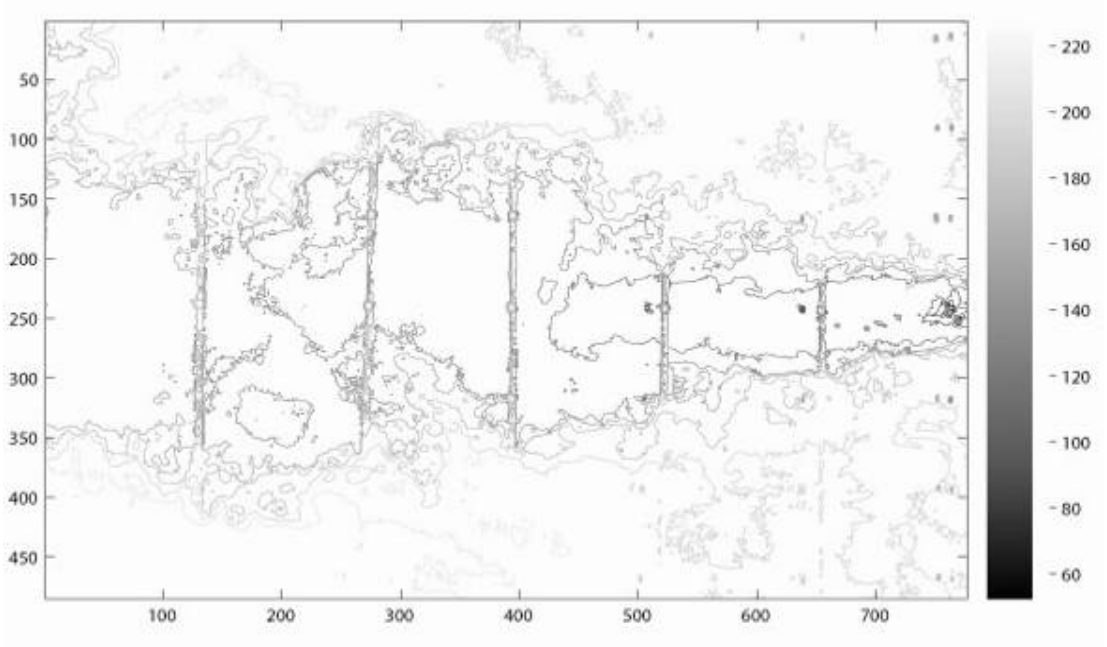
Mirant el contorn de la taca amb el filtre marcat anteriorment, tots els assajos proporcionen un valor de dimensió fractal d'entre 1.6 i 1.8, cosa que s'adiu amb Constantin i Procaccia (1992)[2]. Com a exemple hi ha l'evolució de la dimensió fractal en l'assaig 1C-008 –Gràfic 7-15-

[2] Constantin, P., Procaccia, I. "Fractal Geometry of Isoscalar Surfaces in Turbulence: Theory and Experiments". Miniwokshop on nonlinearity: Dynamics of surfaces in Nonlinear Phisics. 13-24 July 1992.

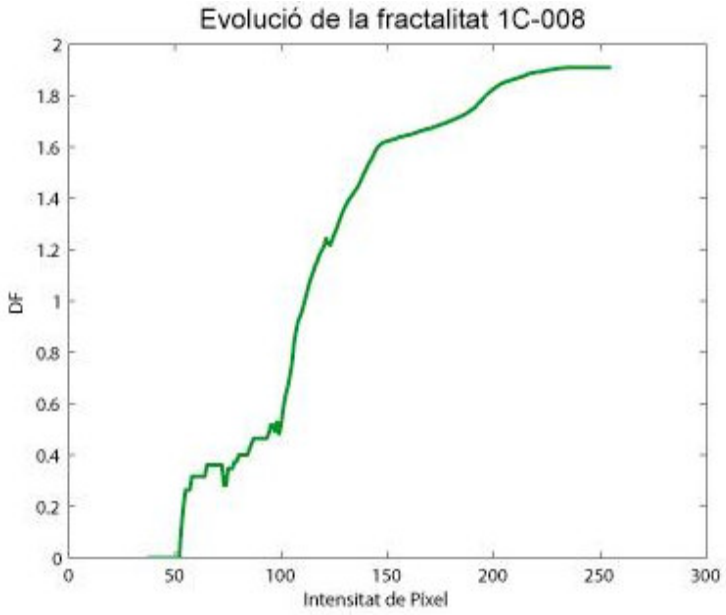


Gràfic 7-15 Evolució de la fractalitat 1C-008

Prenent un moment concret d'aquest mateix assaig (temps= 32.56 segons, D=1.714), i veient com evoluciona la fractalitat en funció de les concentracions de grisos –Imatge 7-34-, queda el Gràfic 7-16 on s'observa que les línies amb més concentració tenen una fractalitat més baixa.

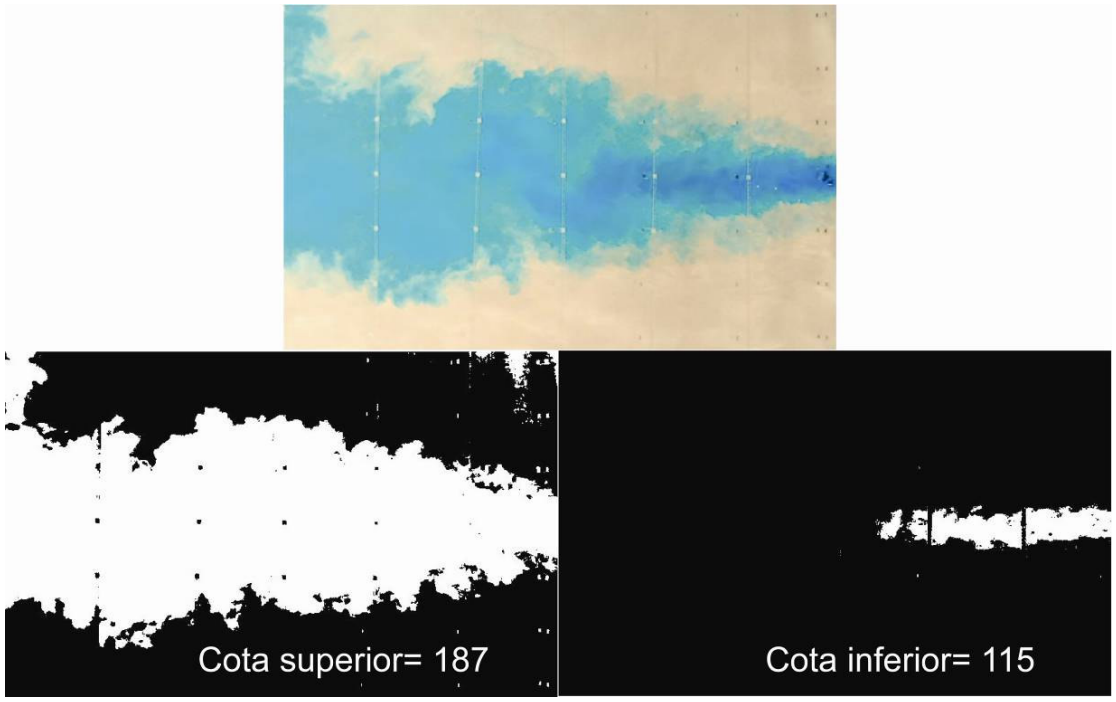


Imatge 7-34 Contorn d'intensitats de grisos



Gràfic 7-16 Evolució de la fractalitat segons la intensitat de píxel -1C-008-

És imprescindible marcar un interval de píxel amb cota superior i inferior per menystenir el soroll de la il·luminació i definir el valor de píxel que representa la concentració màxima –tot i no estar calibrada la camera amb les concentracions corresponents- Imatge 7-35.



Imatge 7-35 Cotes límit de les concentracions

La dimensió fractal corresponent a la concentració més diluïda ronda el valor de 1.7 –Gràfic 7-16-. Evidentment aquestes decisions poden ser més o menys discutibles pel fet de no estar calibrada la gradació de concentració amb la il·luminació dels assajos.

7.6. FORMACIÓ DE REMOLINS

Com s'ha comentat en l'apartat de teoria 4.9 és important saber si es formaran remolins a les sortides del dipòsit per preveure'n les conseqüències. Aquest no és un dels objectius de la tesina, però aprofitant les observacions al laboratori, els resultats obtinguts s'expressen a continuació.

Durant la realització dels diferents assaigs es va observar la formació de vórtexs, sobretot en les sortides 1 i 4. La Taula 7-7 següent mostra les condicions de formació dels vórtexs observats:

Model

Sortida	Nivell (cm)	Qe (l/min)	Qs (l/min)	Sortides activades	Qs/sortida (l/min)
1--4	4.13	15	25	1-2-3-4	6.25
1--4	6.25	12	12	1-2-3-4	3
1--4	5	0	15	1-2-3-4	3.75
4	6.4	12	24	1-2-3-4	6
1	6.25	12	12	1-4	6
1	6.5	12	12	1-4	6

Taula 7-7 Vórtexs observats

En la majoria de situacions, la simetria impera i es forma el remolí al mateix temps en la sortida 1 i la sortida 4.

Tot i estar dins del mateix model, l'escala que cal aplicar en aquest estudi és diferent ja que el fenomen a estudiar no es relaciona amb l'eficiència de la mescla. Hecker (1981) suggereix que la majoria de models que estudien la formació de remolins utilitzen la semblança de Froude:

Prototip

Sortida	Nivell (m)	Qe (m3/s)	Qs (m3/s)	Sortides activades	Qs/sortida (m3/s)
1--4	3.3	14.31	23.85	1-2-3-4	5.96
1--4	5	11.45	11.45	1-2-3-4	2.86
1--4	4	0.00	14.31	1-2-3-4	3.58
4	5.1	11.45	22.90	1-2-3-4	5.72
1	5	11.45	11.45	1-4	5.72
1	5.2	11.45	11.45	1-4	5.72

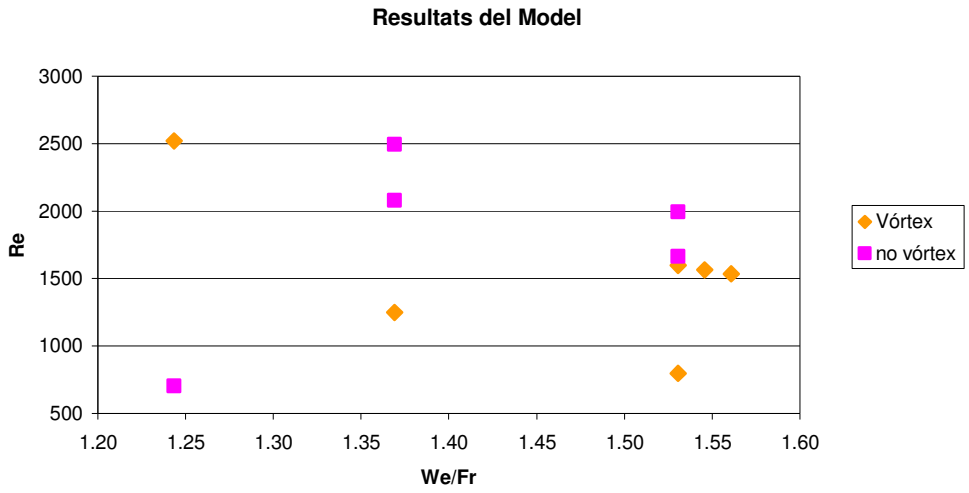
Taula 7-8 Vórtexs de possible formació al prototip

Seguint les indicacions establertes en el punt 4.9, la formació dels remolins està relacionada de manera directa amb els valors del número de Froude, Reynolds i Weber. Calculant aquests valors pels resultats obtinguts en el model i els suposats en el prototip, s'obtenen els següents resultats –Taula 7-9-.

	Model			Prototip		
Sortida	Fr	Re	We	Fr	Re	We
1--4	0.57	2520	0.71	0.57	1803317	0.71
1--4	0.22	798	0.34	0.22	571291	0.34
1--4	0.31	1248	0.43	0.31	892642	0.43
4	0.44	1565	0.69	0.44	1120178	0.69
1	0.45	1597	0.69	0.45	1142582	0.69
1	0.44	1535	0.69	0.44	1098636	0.69

Taula 7-9 Valors adimensionals en model i en prototip dels vórtexs observats en model

El número de Weber també es manté, indicant que l'escala de Froude serà sempre la mateixa que l'escala de Weber. Amb els resultats de la taula anterior, s'extreuen els gràfics corresponents:



Gràfic 7-17 Relació dels valors adimensionals en els vórtexs observats al model

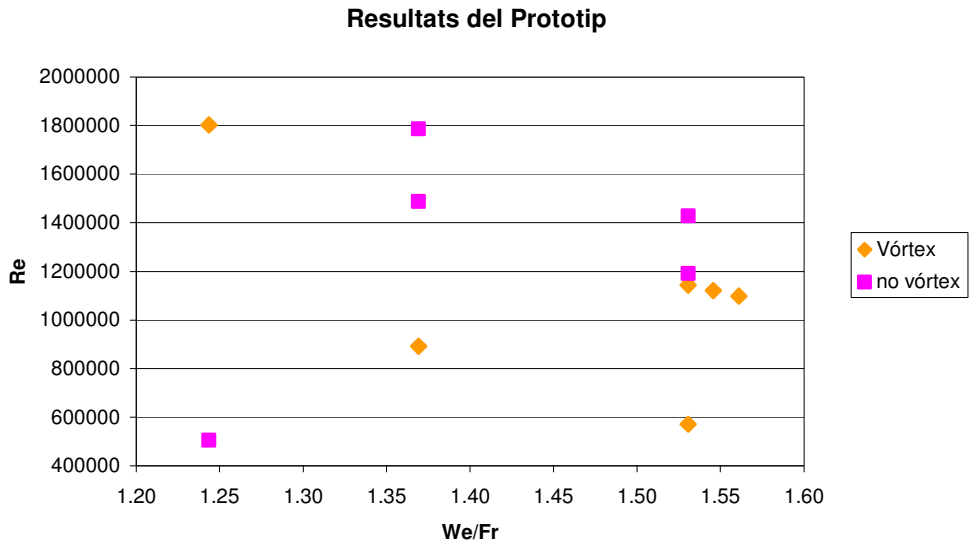
Els punts en els quals no s'ha format vórtex corresponen als de la Taula 7-10:

Model_ Punts sense existència de remolins

Sortida	Nivell (m)	Qe (l/min)	Qs (l/min)	Sortides activades	Qs/sortida (l/min)
1	5	15	25	1-2-3-4	6.25
1	4.13	0	7	1-2-3-4	1.75
1--4	6.25	15	15	1-4	7.5
1--4	5	15	15	1-4	7.5
1--4	6.25	15	25	1-2-3-4	6.25

Taula 7-10 Situacions observades sense vórtexs al model

La suposició feta partint de la base que els remolins que es formen en el model es formaran en el prototip un cop aplicada l'escala temporal implica que no es compliran tots els requisits que s'han donat en el model. Per exemple, els valors del número de Reynolds resulten ser molt superiors en els remolins del prototip.

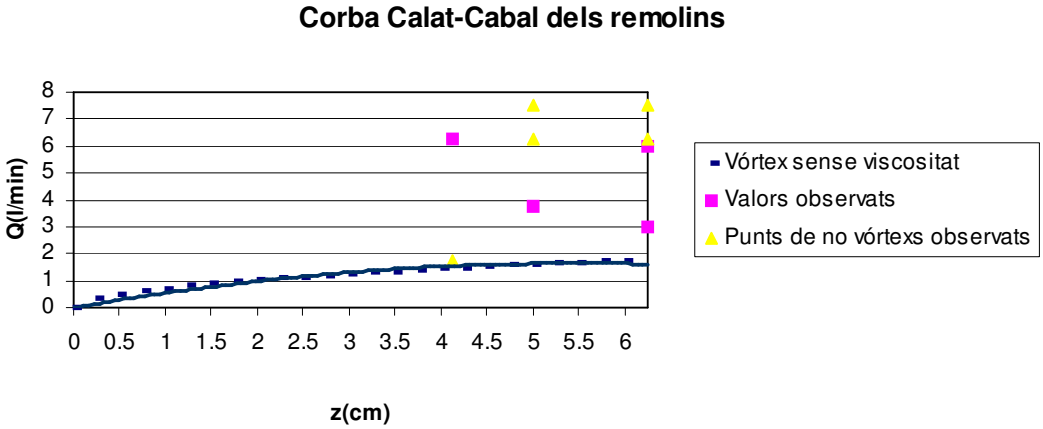


Gràfic 7-18 Relació dels paràmetres adimensionals suposats en prototip

L'escala de Reynolds que queda un cop aplicada la semblança de Froude és de 715. Seguint els resultats obtinguts per Hecker (1981) la majoria de vórtexs formats en el model són "*essencialment*" comparables als que es formaran al prototip.

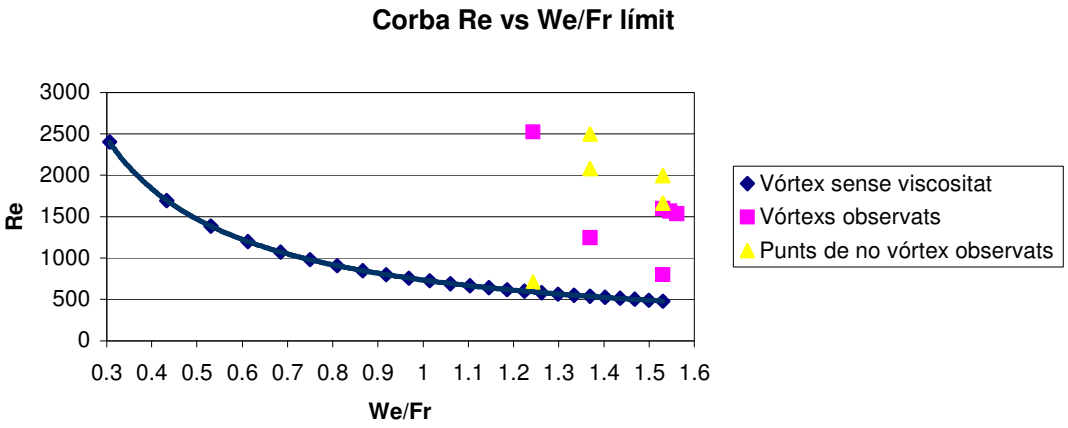
Seguint la teoria definida en l'apartat 4.9 podem utilitzar les fórmules per a fluids invíscids per veure els límits inferiors a partir dels quals es produiran els remolins. r_{max}, definida com la distància mínima a la paret més propera, és de 10 cm que és la distància entre les sortides i la paret del costat llarg de la base.

$$z = \frac{1}{2g}\left(\frac{Q \cdot r_{max}}{A \cdot r}\right)^2 \tag{7.4}$$



Gràfic 7-19 Relació Calat-Cabal dels remolins

Suposant que z és la cota de la làmina lliure i que el vórtex format ocupa tota la vertical, el Gràfic 7-19 és la corba límit del cabal sortint per cada sortida. Els valors observats al laboratori queden per sobre la corba, entenent que la viscositat genera una resistència a la formació dels vórtexs, però un cop es formen el cabal que surt és superior als remolins en líquids invíscids; això vol dir que per la formació dels remolins és necessària una variació d'energia entre l'entrada i la sortida del vórtex que forci la sortida de més cabal. Veient la relació entre els diferents valors adimensionals esmentats –Re, Fr, We- el Gràfic 7-20 dibuixa els valors relacionats amb l'equació 7.4:



Gràfic 7-20 Relació dels valors adimensionals

Com era d'esperar, els punts reals continuen quedant a la part superior de la corba, ja que si augmenta el cabal, el número de Reynolds també ho fa. A més la viscositat apareix en aquest cas per augmentar també el número de Reynolds.

És important destacar que la fórmula 4.48 imposa un valor del número de Froude constant al llarg de la corba expressada en el Gràfic 7-19:

$$Fr = \sqrt{2}\,\frac{r}{r_{\max}} \tag{7.5}$$

En el cas dels assajos descrits, el nombre de Froude dels remolins respon al valor de 1.3.

Igualment es continua sense distingir una línia que separa els valors observats en els quals es formava un remolí amb aquells en els quals no es formava. De totes maneres com que es tracten, ambdós casos de situacions límit, és normal aquesta indefinició.