

Treball de Fi de Grau en Enginyeria en  
Tecnologies Industrials

# The Ocean CleanUp

Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Miguel Bárcena González

Q2-2016



## Resum

Aquest *Treball de Fi de Grau* (TFG) s'inclou dins el projecte global *The Ocean CleanUp* (TOC), que pretén netejar la gran illa de plàstics situada a l'Oceà Pacífic. Aquesta memòria s'ha realitzat al *Barcelona Supercomputing Center* (BSC).

Aquest document pretén donar a conèixer el projecte *TOC*, l'entorn del *BSC* i les característiques pròpies de treballar amb un supercomputador, el *Marenostrum*. El *BSC* és l'encarregat de desenvolupar una *Macrosimulació 3D* on és visualitzi la interacció entre els plàstics, l'oceà i la màquina dissenyada per la gent del *TOC*.

Una simulació d'aquestes magnituds és molt costosa en tots els sentits, és per aquest motiu que no es poden cometre errors. És molt usual dissenyar aquestes *Macrosimulacions* per capes. Des dels estrats més senzills, fins a la simulació final. En aquest document treballarem amb un model 2D molt simplificat.

L'objectiu principal d'aquest treball és validar el codi *Alya*, desenvolupat al *BSC*, per resoldre el problema presentat pels companys del *TOC*. Per fer-ho caldrà conèixer adequadament el problema i reconèixer mínimament algunes característiques d'*Alya*.

Ens valdrem d'un estudi en 2D realitzat per la gent del *TOC* al document *How the oceans can clean themselves. A Feasibility Study* (FS).

Per validar el codi *Alya* intentarem reproduir els mateixos experiments duts a terme en aquest estudi. D'aquesta forma si els resultats són semblants acceptarem el codi *Alya* com a vàlid. Si són molt diferents estudiarem el com i el perquè d'aquests resultats.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>8</b>
2.1. Origen del projecte .....	9
2.2. Motivació.....	10
2.3. Requeriments previs.....	10
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>11</b>
3.1. Objectius del projecte .....	11
3.1.1. Objectius fundació <i>The Ocean's CleanUp</i> .....	11
3.1.2. Objectius TFG .....	12
3.2. Abast del projecte .....	13
<b>4. EL PROJECTE <i>THE OCEAN CLEANUP</i></b>	<b>14</b>
4.1. Producció global de plàstics .....	14
4.2. La illa de plàstic .....	17
4.2.1. Els girs oceànics.....	17
4.3. Com netegem els oceans?.....	19
4.3.1. Estat de l'art.....	19
4.3.1.1. Models basats en Drons .....	20
4.3.1.2. Models basats en Vaixells.....	21
4.3.1.3. Models basats en illes flotants .....	21
4.3.2. El model de l'Ocean CleanUp.....	22
4.3.2.1. L'estructura .....	23
4.3.2.2. Fase de captura .....	23
4.3.2.3. Fase de concentració.....	24
4.3.2.4. Fase de recol·lecció .....	25
4.3.2.5. Principals avantatges .....	25
<b>5. ALYA</b>	<b>26</b>
5.1. Arquitectura.....	27
<b>6. MARC TEÒRIC</b>	<b>29</b>

6.1.	Dinàmica de Fluids.....	29
6.1.1.	Fenòmens de Turbulència.....	31
6.2.	Transport de partícules de Lagrange <sup>[13]</sup> .....	32
6.3.	Semblances i nombres adimensionals <sup>[10]</sup> .....	34
6.3.1.	Semblança incompleta.....	36
6.4.	CFD, Computational Fluid Dynamics.....	37
<b>7.</b>	<b>COMPAREM MODELS</b> .....	<b>38</b>
7.1.	Definim el problema amb <i>Alya</i> .....	38
7.2.	Descripció del Model.....	39
7.2.1.	Domini.....	40
7.3.	Malla.....	42
7.4.	Condicions de contorn.....	44
7.5.	Model a escala.....	44
<b>8.</b>	<b>VALIDACIÓ DEL MODEL OCEAN, RESULT AMB ALYA</b> .....	<b>47</b>
8.1.	Introduïm les partícules en el model.....	51
8.1.1.	SIMPLIFICACIONS DEL MODEL.....	51
8.1.2.	Ocean.pts.dat.....	52
8.2.	Primeres simulacions.....	54
8.2.1.	Velocitat $v_1=2,25\text{cm/s}$ .....	56
8.2.2.	Velocitat $v_2=4,5\text{cm/s}$ .....	57
8.2.3.	Velocitat $v_3=6,75\text{cm/s}$ .....	59
8.2.4.	Resultats Feasibility Study.....	61
8.3.	Influència de les variables en la captura de partícules.....	63
8.3.1.	Influència de la profunditat d'injecció.....	63
8.3.1.1.	Diàmetre 5mm, model ocean.....	63
8.3.1.2.	Diàmetre 10mm, model ocean.....	63
8.3.1.3.	Resultats FS.....	64
8.3.2.	Influència de la densitat.....	65
8.3.2.1.	Resultats 5mm, model ocean.....	65
8.3.2.2.	Resultats 10mm, model ocean.....	65
8.3.2.3.	Resultats FS.....	65
8.3.3.	Influència del diàmetre.....	66
8.3.3.1.	Resultats 5mm, model ocean.....	66
8.3.3.2.	Resultats 10mm, model ocean.....	66

8.3.3.3. Resultats FS .....	67
<b>9. PRESSUPOST</b> .....	<b>68</b>
<b>10. IMPACTE AMBIENTAL</b> .....	<b>70</b>
<b>11. TREBALL FUTUR</b> .....	<b>71</b>
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>72</b>
<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>73</b>
<b>12. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>74</b>
Referències bibliogràfiques.....	74
12.1. Bibliografia complementària .....	75

# 1. Glossari

TOC: The Ocean's CleanUp. Plataforma sense ànim de lucre que té com a principal objectiu la neteja de la gran illa de plàstics situada a l'Oceà Pacífic.

BSC: Barcelona Supercomputing Center. El supercomputador, i nucli, d'aquest centre és el Marenostrum. El BSC és dedica a investigar, desenvolupar i fer difusió de la ciència de la supercomputació.

FS: How the Ocean's can clean themselves. A Feasibility Study. Com indica el seu títol, FS és un document de fiabilitat. És un document molt extens que abarca multituds de temes diferents. En aquest document apareixen les raons per dur a terme aquesta neteja, com fer-la i els resultats que se n'obtidrien.

Gir Oceànic: En oceanografia, un gir oceànic, o simplement un gir, és qualsevol gran sistema de corrents marins rotatius, particularment els que estan relacionats amb els grans moviments del vent. Hi han 5 grans girs oceànics al món.

## 2. Prefaci

Cada any es produeixen aproximadament 300 milions de tones de plàstic, una porció dels quals entra i s'acumula als oceans. Degut a fortes corrents oceàniques anomenades *girs oceànics*, els plàstics s'acumulen en diferents zones concretes. La illa d'escombraries situada entre Hawaii i Califòrnia és el major exemple conegut.

El dany ocasionat a la vida marina és catastròfic: al menys un milió d'aus marines i centenars de milers de mamífers marins moren cada any a causa de la pol·lució. I el que encara és més greu, la supervivència de diferents espècies, com la *Foca monjo de Hawaii* o la *Tortuga Careta*, estan directament amenaçades per aquests plàstics.

Les espècies marines es veuen atrapades sovint entre les runes, el que porta a «lesions, malalties, asfíxia, fam i, fins i tot, la mort» (NOAA,2014). Petits fragments de plàstic es poden confondre amb aliments, causant malnutrició, oclusió intestinal i, finalment, la mort. Com observem a la *Imatge 1*.

Alguns animals confonen petits plàstics amb menjar, introduint així productes químics perjudicials a la cadena alimentària.

El problema no acaba aquí. S'ha estimat que aquesta catàstrofe ocasiona pèrdues de \$1.270M anuals als col·lectius que és dediquen a la pesca o al treball marítim, només a la zona de l'APEC, *Asia-Pacific Economic Cooperation*. I encara més, la neteja de platges i costes suposa una despesa de \$25.000 per tona de plàstic.<sup>[1]</sup>



*Imatge 1: Albatros amb plàstics a l'estómac*



## 2.1. Origen del projecte

Si s'ha de personificar el projecte TOC en un individu aquest és Boyan Slat, fundador i CEO de *The Ocean CleanUp Foundation*. Qui amb 16 anys marxa de vacances a Grècia per bussejar i descobrir la biodiversitat marina de les illes. Les excursions al fons marí es frustren per la quantitat de plàstics que troben a l'oceà.<sup>[2]</sup>

Des d'aquest moment, comença a interessar-se per aquest fenomen i a buscar possibles solucions. Durant uns anys continuarà estudiant les problemàtiques que ocasionen els plàstics i trobarà una solució per començar a netejar els oceans. Però la falta de recursos farà impossible continuar el desenvolupament del projecte.

Aquesta situació canvia amb la conferència realitzada a la universitat de Delft, *How the ocean can clean themselves: Boyan Slat at TEDxDelft*<sup>[3]</sup>, que es farà viral, fins a 2M de visites en pocs dies. A partir d'aquest moment s'inicià un Verkami que aportarà \$2,2M a la fundació TOC.

En poc de temps, tot un conjunt de professionals: enginyers, oceanogràfics, economistes, informàtics... li donen l'empenta necessària per que el projecte comenci a rodar definitivament.

Es fan multitud d'estudis, s'estudia la zona afectada i es valoren tot tipus de conseqüències que es recullen al document *Feasibility Study, FS*, al que farem referència durant bona part de la memòria. Les conclusions presentades al *FS*, que validen la viabilitat del projecte, són el veritable tret de sortida d'aquest projecte.

## 2.2. Motivació

La formació en el Grau d'enginyeria Industrial ofereix una gran quantitat de coneixements en diferents àmbits, des de la química, la mecànica i l'estudi dels materials fins al càlcul numèric i l'estadística o l'economia.

Durant els anys que he estat a l'escola he anat aprenent de les diferents matèries a l'hora que superava els cursos. Com a enginyers ens eduquen per sobreviure en un món difícil. Ens ensenyen a superar-nos i a trobar solucions a tot tipus de problemes.

Diuen que si li preguntes a un enginyer quina és la unitat de mesura més important, et respondrà, sense pensar-hi gaire, l'Euro. Aquest, al meu entendre, és un defecte simptomàtic d'una societat cada cop més malalta.

Aquest projecte presenta una oportunitat, la primera en tots aquests anys a l'escola, de participar d'un projecte ecològicament sostenible, èticament saludable i sense ànim de lucre. És per aquest motiu que em vaig embarcar en aquest projecte.

És la millor forma de demostrar-me que es pot treballar com a enginyer en projectes socials i col·lectius. Més enllà de la mecànica de fluids, la informàtica, l'optimització, l'economia o l'estadística que hi ha darrere d'aquesta memòria... ha estat el fet de ser un projecte social el que m'ha fet entusiasmar-me en aquest treball.

## 2.3. Requeriments previs

Per poder realitzar les simulacions necessàries per dur a terme aquest projecte és necessari uns coneixements bàsics d'*Alya*.

D'altra banda per poder visualitzar el model i els resultats de les ja comentades simulacions, és necessari la utilització d'un visualitzador. El programa recomanat va ser *Paraview*.

L'estudiant autor d'aquest projecte no tenia cap mena de coneixements previs sobre *Alya* ni sobre cap eina semblant a *Paraview*, fet que ha suposat un esforç important a l'hora de desenvolupar aquest projecte.

Per últim, els coneixements obtinguts a les assignatures de Mecànica de Fluids i de *Computational Fluid Dynamics*, impartides a l'escola, han estat molt importants per aquest treball.

## 3. Introducció

Com hem comentat anteriorment, aquest treball està inclòs dins un projecte global, el dut a terme per la fundació *The Ocean's CleanUp*. És per aquest motiu que hem trobat interessant deixar palès els objectius de tots dos projectes.

### 3.1. Objectius del projecte

#### 3.1.1. Objectius fundació *The Ocean's CleanUp*

1. Netejar la illa d'escombraries situada entre Hawaii i Califòrnia.

- Recaptar la meitat de plàstic de la zona, 70.000.000 kg, en 10 anys.
- Minimitzar el dany ocasionat per la humanitat a la biodiversitat marina.
- Proposar una solució per la neteja dels diferents girs oceànics, on es concentren la gran quantitat de plàstics abocats a mars i oceans.

2. Generar consciència envers la deriva mediambiental a la que estem abocant al planeta.

- Conscienciar la gent que el volum de plàstic utilitzat és desorbitant, 300M de tones anuals.
- Emfatitzar la necessitat en reduir, reciclar i reutilitzar els plàstics que fem servir a la vida quotidiana.
- Visualitzar les conseqüències negatives, tant a la biodiversitat, com a l'economia, que genera la incompetència en la gestió dels recursos naturals.

3. Demostrar que es poden dur a terme grans projectes des de l'autogestió i la cooperació.

- Impulsar un projecte d'aquestes magnituds des de una plataforma no governamental.
- Motivar altres col·lectius a fer projectes similars.
- Educar a la societat en la cooperació activa com a solució a problemes que afecten la totalitat de la població.

### 3.1.2. Objectius TFG

1. Participar activament d'un projecte global per millorar les condicions de vida de les persones.

- Col·laborar amb la fundació *The Ocean's CleanUp* en la seva empresa per netejar de plàstics l'Oceà Pacífic.
- Desenvolupar un model 2D per observar quina quantitat de plàstics és capaç de recaptar el prototip proposat per l'equip de *The Ocean's CleanUp*.
- Comprovar la fiabilitat del codi *Alya* per simular problemes físics complexos com el que presenta l'equip de *The Ocean's CleanUp*.

2. Adquirir noves eines i coneixements per desenvolupar-se com a enginyer.

- Descobrir nous codis i programes, com *Alya* i *Paraview*.
- Treballar amb *Marenostrum* i col·laborar amb companys amb estudis i coneixements superiors en un ambient de treball diferent.
- Apropar-se a un món laboral fora del sector empresarial.

3. Consolidar coneixements adquirits durant el Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials.

- Aprofundir en els coneixement de diverses assignatures com la Mecànica de Fluids, especialment, en CFD.
- Endinsar-se en la recerca i la investigació per dur a terme el treball proposat de forma autònoma.
- Aplicar les aptituds i tècniques pròpies dels projectes d'enginyeria al projecte de fi de grau.

## 3.2. Abast del projecte

Aquest treball pretén establir les bases per desenvolupar una simulació que resolgui el problema plantejat per *The Ocean's CleanUp*. En aquesta direcció el més urgent és estar segurs que el codi amb el que resoldrem el problema, *Alya*, és suficientment robust.

Per confirmar la validesa del codi *Alya* ens aprofitarem de l'estudi de CFD que apareix al capítol 3.3 del document «*How the oceans can clean themselves. A Feasibility Study.*», realitzat amb el codi ANANAS.

Realitzarem una sèrie de simulacions que siguin el més semblants possible a les realitzades a l'estudi comentat anteriorment i discutirem els resultats.

D'altre banda, és inevitable explicar el projecte presentat per *TOC*, les seves motivacions i aspiracions. Així com explicar mínimament que és *Alya*, com es treballa amb *Marenostrum* i les facilitats que presenta el poder treballar amb CFD.

No pretenem explicar amb profunditat el codi *Alya* ni les dificultats inherents en treballar amb software lliure. De la mateixa manera, no hem cregut convenient estudiar els diferents models de turbulència que ofereix el codi.

## 4. El projecte *The Ocean CleanUp*

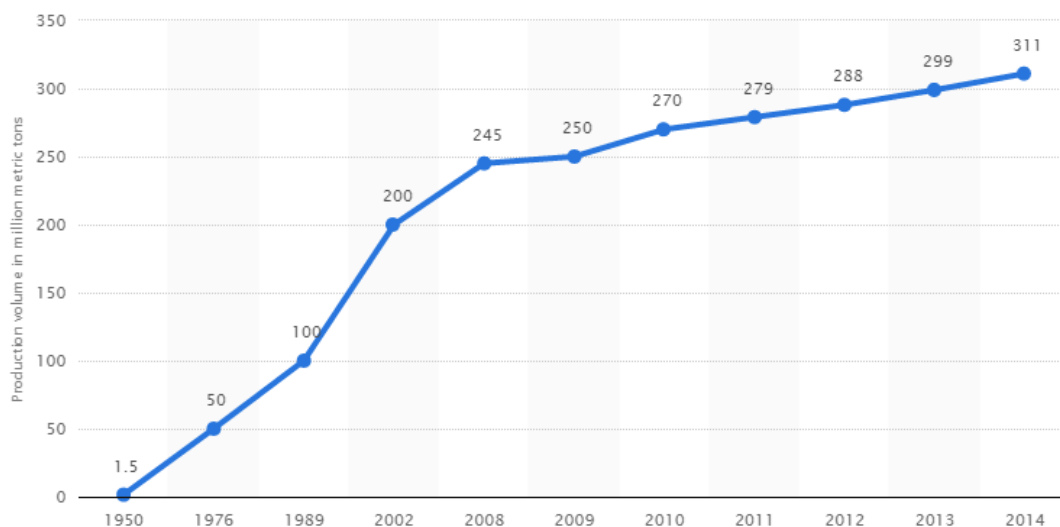
En aquest capítol volem donar a conèixer en profunditat el projecte engegat per la fundació The Ocean CleanUp.

Per fer-ho s'ha estructurat en 3 grans blocs. En el primer explicarem quina es la producció mundial de plàstics i com ha evolucionat en els darrers anys, en segon lloc veurem l'origen de l'anomena *Illa de plàstic* i, per últim, la solució proposada per netejar-la.

### 4.1. Producció global de plàstics

Com s'ha comentat a la introducció, la producció global de plàstics es situa al voltant dels 300 milions de tones anuals. <sup>[4]</sup>

Al Gràfic 1: *Producció global de plàstic* observem la progressió de la producció global d'aquest material durant l'últim segle. El creixement de la producció anual es situa entre el 2-4%.



Gràfic 1 Producció global de plàstic

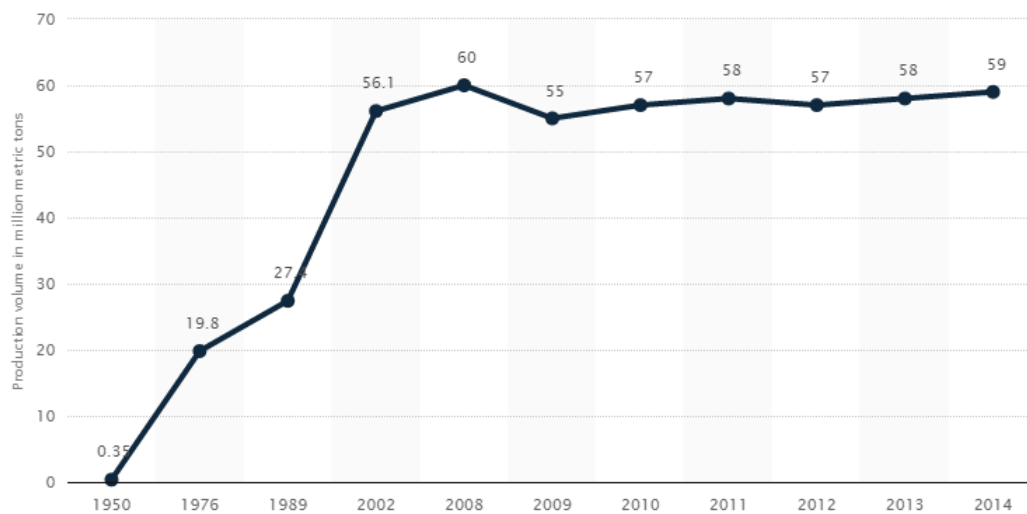
A l'Estat Espanyol la indústria dels plàstics representa un 2,2% del PIB, uns 2.000M€. Esperar una davallada en el consum de plàstics en un futur proper és pecar d'innocent.

Segons dades de *The Plastic Data Alliance* al 2012 la Unió Europea va reciclar 5,4M de tones, un 34,7% de tot el plàstic fet servir per envasos i embalatge.

Un 34,5% va ser utilitzar per generar energia. Això suposa que el 69,2% dels plàstics utilitzats per *packaging* va ser reutilitzat. La resta, més d'un 30%, va ser incinerat o enviat a abocadors.

Els envasos representen un 62% de tots els residus de plàstic generat. I és el sector on el tant per cent de productes reciclats és major.

Al *Gràfic 2: Producció europea de plàstic* observem que al 2012 és van produir 57M de tones a la UE.



*Gràfic 2: Producció europea de plàstic*

Si estudiem les dades, observem que:

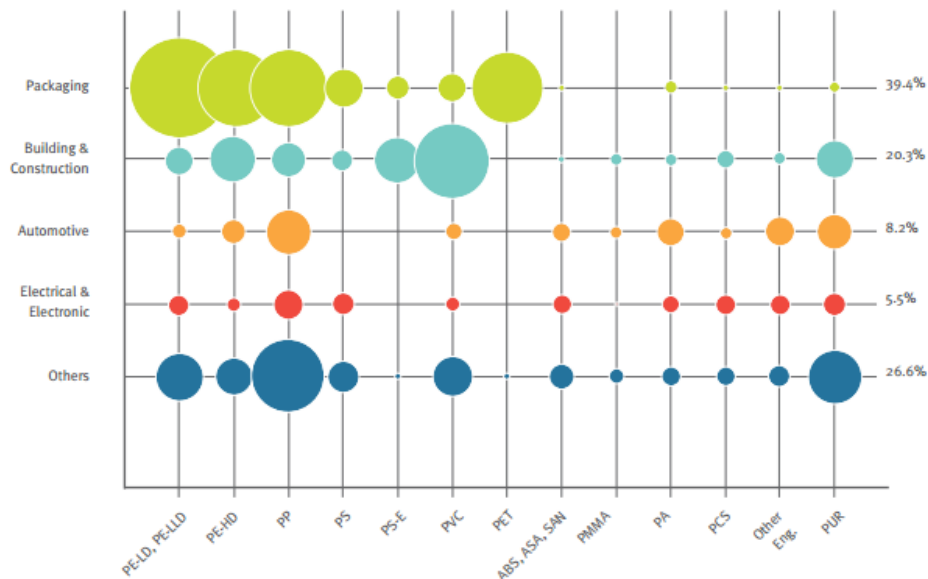
- Europa produeix l'any 2012 57M de tones de plàstic.
- Europa genera l'any 2012 23M de tones de residus de plàstic.  
( $23M \times 0,69 \times 0,347 = 5,4M$ )

El resultat d'aquest balanç, 34M de tones, és degut a diversos factors. Els 3 principals són:

En primer lloc que Europa és una gran exportadora de productes plàstics, segons dades d'Eurostat l'any 2012 va exportar 18,6M de tones i en va importar 9,2M.

En segon lloc que, com veiem al *gràfic 3: demanda de plàstics segons mercat*, la construcció té un gran pes en el mercat i no ha passat el temps suficient des del *boom* dels plàstics per esgotar la vida útil d'aquests edificis. Aquest darrer argument també és vàlid per altres productes amb una vida útil prolongada.

Per últim, aquelles deixalles llençades a diferents espais, sense cap mena de control, no apareixen computades com a residus.



Gràfic 3: demanda de plàstics segons mercat

D'aquest anàlisi extraïem 2 conclusions:

La producció i el consum de plàstics mundial està en creixement continu.

Una gran quantitat dels residus plàstics es llencen a abocadors, són incinerats o s'acumulen en diferents indrets sense cap mena de control.

Diferents estudis han estimat en 8M de tones la quantitat de plàstic que cada any s'aboca a l'oceà. Això significa que un 2,6% de el plàstic que es produeix al món, acaba als mars i oceans.

És una dada molt preocupant. Una forma de veure fins a quin punt ho es, és posar un exemple senzill:

Imaginem-nos que de cada 1.000 llaunes de refresc que es venen a Mercadona, 26 les llencéssim directament al mar. I, aquesta barbaritat, extrapolada a tots els envasos, equipaments, joguines o de més objectes de plàstic que trobem arreu del món.



## 4.2. La illa de plàstic

La illa de plàstic o illa d'escombraries, de l'anglès *Great Pacific garbage patch*, va ser predita al 1988 per la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* d'Estats Units.

Alguns dels laboratoris d'Alaska<sup>[5]</sup>, que es dedicaven a comprovar les propietats de les aigües del Pacífic, van descobrir micropartícules de plàstic en aquestes. Els resultats d'aquests experiments deixaven en evidència que el continu abocament de residus als rius i oceans tindria conseqüències.

No va ser fins 9 anys més tard, al 1997, quan Charles Moore, científic i capità de vaixell, descobrí, per casualitat, una gran zona plena de deixalles al mig de l'oceà, la illa de brossa.

Des d'aquell moment ha dedicat gran part del seu temps a estudiar la pol·lució produïda pels plàstics. Actualment dirigeix el centre Algalita<sup>[6]</sup> que es dedica a estudiar i difondre les causes i les conseqüències originades pels plàstics abocats a l'oceà.

### 4.2.1. Els girs oceànics

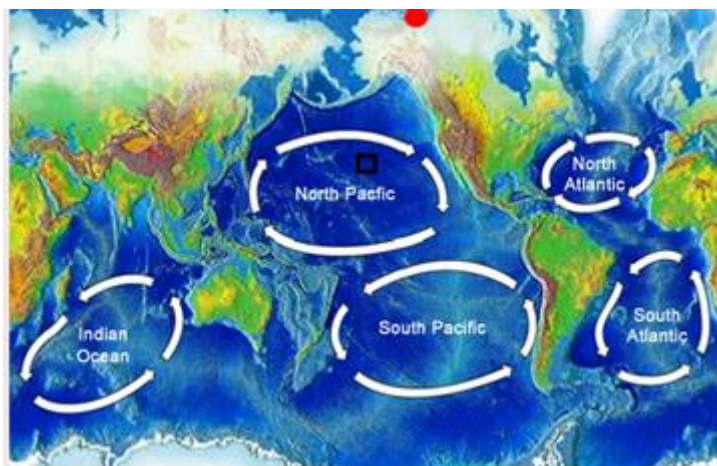
Des de fa unes quantes dècades, se sap que l'estructura dels corrents marins a escala global és tridimensional.

Els moviments horitzontals a la superfície produïts principalment pel vent i la inèrcia produïda per la rotació terrestre i amb moviments verticals, en els quals la configuració del relleu submarí i de les costes modifiquen els efectes de la rotació de la Terra. Aquestes grans pressions generen una força centrífuga que tendeix a "ocupar" el nivell oceànic al llarg de la circumferència equatorial. Es tracta del corrent equatorial que es dirigeix, per inèrcia, en sentit contrari a la rotació terrestre.

Al fons submarí tant de l'oceà Atlàntic com del Pacífic, l'aigua acompanya la litosfera en el moviment de rotació terrestre i això es deu a l'enorme pressió que suporten aquestes aigües abissals. Però, en arribar a les costes occidentals dels continents, es genera un efecte "ascensor" per a aquestes aigües profundes fent-les pujar i creant el que s'anomena *surgència d'aigües fredes*, que ve a ocasionar un corrent, aquest cop superficial, en sentit contrari al que tenien les aigües profundes.

D'aquesta manera, s'originen en les costes occidentals dels continents corrents d'aigües molt fredes, ja que emergeixen de gran profunditat.

En resum, els patrons de circulació de les aigües oceàniques s'originen per una complexa síntesi de forces que actuen de manera diversa i variable en el temps i en l'espai, i les més importants d'aquestes forces són: el moviment de rotació terrestre, la configuració del fons submarí, la forma de les costes i la seva influència en la direcció dels corrents, la desigual absorció i transport de calor per la radiació solar absorbida per les aigües marines, la influència mútua entre els corrents marins i els vents, la desviació dels corrents a causa de l'efecte de Coriolis, etc.



Imatge 2: Els 5 grans girs oceànics

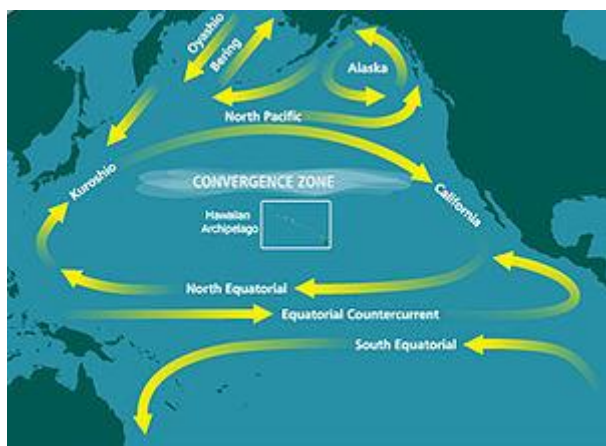
Els *girs oceànics* són el resultat de la confluència de diferents corrents oceàniques que, en trobar-se, generen grans corrents rotatives anomenades vòrtex. A la *imatge 2: Els 5 grans girs oceànics* observem on es situen els 5 més importants.

El quadrat negre de la *imatge 2* representa la illa de brossa.

Durant els últims 50 anys molts països costaners han estat abocant, com hem comentat anteriorment, residus plàstics als oceans. De la mateixa manera que molts éssers marins aprofiten aquestes corrents per traslladar-se, els plàstics han estat navegant per aquestes corrents durant molts anys.

És per aquest motiu que en els 5 girs oceànics s'han acumulat milers de tones de plàstic.

La zona on el volum de plàstic és més elevat i on el projecte de *The Ocean Cleanup* ha centrat el seu estudi és al Gran gir oceànic del Pacífic Nord. Aquesta regió s'estén aproximadament 20 milions de km<sup>2</sup> i suposa l'ecosistema més gran del món.

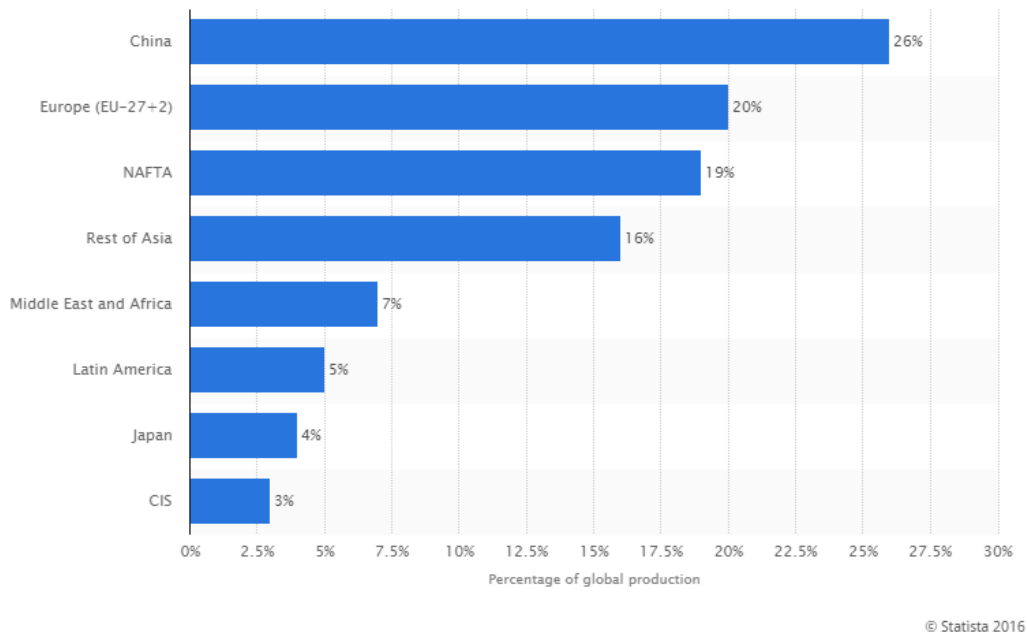


Imatge 3: Principals corrents que alimenten el Gran gir oceànic del Pacífic Nord

Aquesta immensa quantitat d'aigua té un patró de moviment circular, en el sentit de les agulles del rellotge, i s'alimenta de 4 grans corrents oceàniques, com podem veure a la *Imatge 3: Principals corrents que alimenten el Gran gir oceànic del Pacífic Nord*. La corrent del Pacífic Nord, cap al nord, la corrent de Califòrnia

direcció est, la corrent Equatorial Nord cap al sud i la corrent de Kuroshio a l'oest.

En el *gràfic 4: Producció de plàstics per regions* observem una de les raons pels quals aquesta zona és la més contaminada del món. China, la regió de NAFTA (EUA, Mèxic i Canadà) i Japó són, traient Europa, les principals productores de plàstics del món.



*Gràfic 4: Producció de plàstics per regions*

## 4.3. Com netegem els oceans?

### 4.3.1. Estat de l'art

Des del moment en que la contaminació dels oceans va ser notòria, han aparegut diferents models, mètodes o idees per tal d'extreure aquests plàstics. Abans d'explicar el model desenvolupat per *The Ocean CleanUp* veurem quines idees han aparegut, les seves avantatges i inconvenients.

Aquestes diferents idees es poden reduir a 3 models que explicarem a continuació:

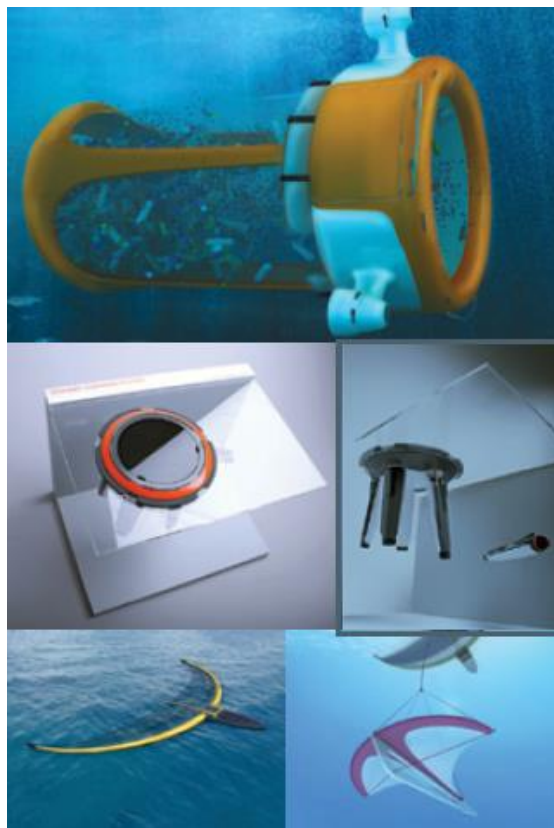
1. Models basats en Drons
2. Models basats en Vaixells
3. Models basats en illes flotants

#### 4.3.1.1. Models basats en Drons

La idea general darrera aquest model és utilitzar una gran quantitat de drons per capturar residus i tornar, eventualment, a una nau central on deixar els plàstics capturats. Els drons estarien equipats amb bateries o plaques fotovoltaïques com a fonts d'alimentació i serien capaços de funcionar de forma autònoma.

Una avantatge d'aquest sistema és la flexibilitat d'acció. Si hagués una zona amb una alta quantitat de partícules seria molt fàcil fer arribar els drons. A més, en cas d'averia, l'impacte sobre tot el sistema seria mínim. Els diferents drons podrien estar equipats amb petites malles per capturar partícules de plàstic sense fer malbé la biodiversitat.

No obstant això, també hi ha problemes potencials. Primer de tot, degut a les fortes corrents i la fricció ocasionada per les xarxes, necessitarien molta energia per desplaçar-se i, la limitació de les bateries faria necessari tornar molt sovint a la nau mare. A més, tant els drons com la nau mare tenen una capacitat d'emmagatzematge limitat, que els obligaria a tornar a terra. Per altra banda, no se sap com recollirien els residus de gran volum, com parts de vaixells o xarxes de pesca,



*Imatge 4: Diferents conceptes de Drons*

Encara més important, les àrees on s'acumulen els plàstics són enormes, cobrir aquestes zones requeriria moltes unitats i, probablement, centenars d'anys.

#### **4.3.1.2. Models basats en Vaixells**

Solucions basades en vaixells han estat freqüentment proposades. Aquesta és la idea menys innovadora. Consisteix en navegar pel gir oceànic fent servir diferents vaixells equipats amb xarxes o amb diferents prototips d'extracció per capturar els residus.

L'avantatge d'aquest sistema és que la tecnologia necessària ja està inventada, això suposa reduir costos en recerca i investigació.

El principal inconvenient d'aquest model, com ho és pels models basats en drons i en illes flotants, torna a ser la magnitud de l'àrea a netejar. L'operació de neteja s'allargaria durant centenars d'anys i, només per la quantitat de combustible necessari, ja seria contraproductiu pel medi ambient.

#### **4.3.1.3. Models basats en illes flotants**

L'última, i més exòtica, idea la trobem en les "illes flotants". Trobem 2 models principals:

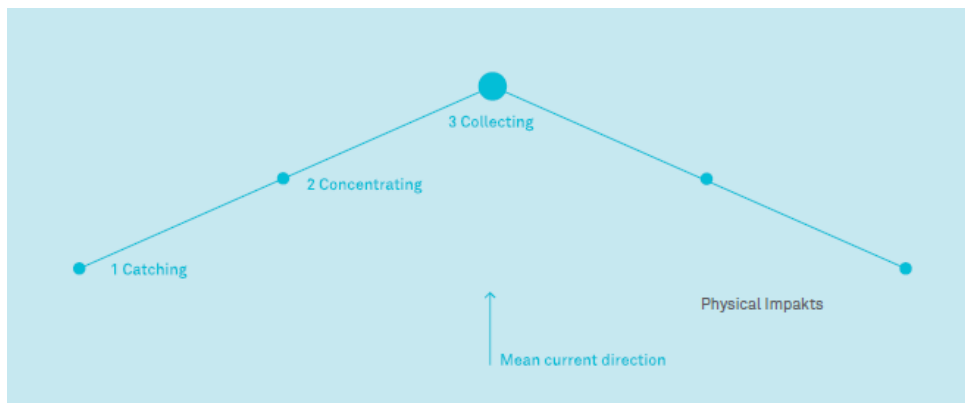
- La primera consisteix en construir "gratacels flotants" que, a més de lúdics, tenen filtres per recollir els residus que es van trobant.
- La segona respon a la construcció d'illes artificials amb els residus que es van recollint.

Més enllà que es desconeixen els detalls tècnics de com es duran a terme, aquestes estructures xoquen amb el mateix problema que drons i vaixells, l'àrea que pot cobrir una d'aquestes illes és, comparada amb els 20 M de km<sup>2</sup> del gir oceànic pràcticament negligent.

### 4.3.2. El model de l'Ocean CleanUp

El concepte desenvolupat per l'Ocean CleanUp consisteix en una sèrie de barreres flotants i plataformes, amarrades al fons marí, on les partícules de plàstic són capturades. D'aquesta forma els organismes passen per sota de la barrera, seguint la corrent, i no es veuen afectats per la recollida.

Amb aquesta proposta els plàstics poden ser extrets de l'aigua en tres fases com podem observar a la imatge 5.



*Imatge 5: Esquema de les diferents fases de captació.*

En la fase inicial les partícules són captades davant de la barrera, deixant enrere la forta corrent oceànica per quedar-se a les tranquil·les aigües, gairebé estacionaries, propiciades per la mampara.

Durant la segona fase, les partícules s'acumulen mentre es desplacen lentament en direcció a la plataforma de recollida, mentrestant noves partícules es van afegint a aquesta corrent.

En la darrera fase, les partícules dels dos costats de la plataforma s'agrupen davant d'aquesta, propiciant així, grans concentracions de residus que faciliten la seva recollida.

A continuació expliquem amb més detalls aquests conceptes.

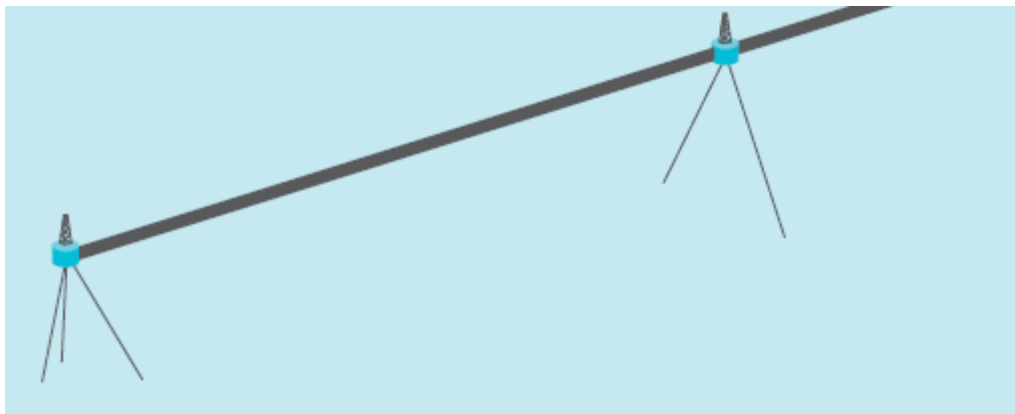
#### 4.3.2.1. L'estructura

La barrera flotant s'estén per 100km per cobrir una gran àrea. Per assegurar que les partícules de plàstic puguin ser recollides passivament aprofitant el flux rotatiu de la corrent (*imatge 6*), és necessari generar una diferència de velocitat entre l'aigua i les barreres.



Això s'aconsegueix fixant parts de l'estructura al terra oceànic, d'aquesta forma també s'aconsegueix que les forces que pateixen les barreres degudes a la pressió siguin transferides per aquests amarratges. A la *imatge 7* veiem un esquema.

*Imatge 6: Com aprofitar les corrents per recollir passivament els residus de plàstic*



*Imatge 7: Esquema de l'amarratge de l'estructura*

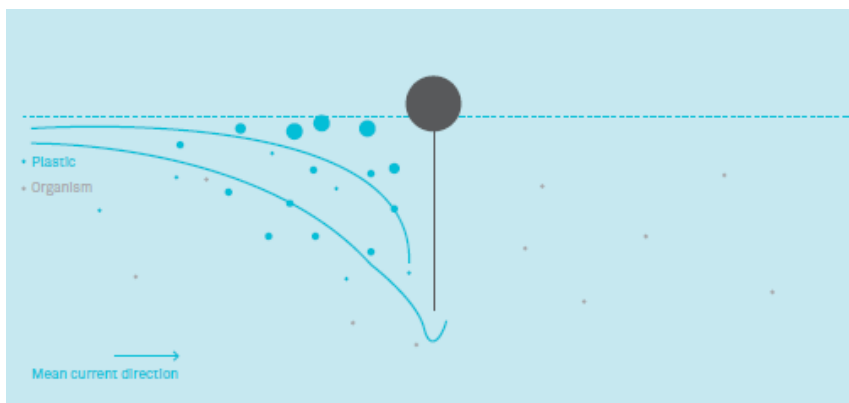
S'utilitzaran flotadors per compensar les forces exercides pels diferents amarratges, com podem veure a l'esquema anterior. Es necessitaran gran quantitat de cables lleugers i resistents per fixar l'estructura, ja que la profunditat de l'oceà en aquestes coordenades pot arribar als 4.000m.

#### 4.3.2.2. Fase de captura

Per causar el mínim impacte en l'ecosistema oceànic no s'utilitza cap tipus de xarxa. Aquest model es basa en el coneixement de que les corrents superficials del oceà empenyen els residus de plàstic contra les barreres. La part superior de les barrera, el flotador, està dissenyada per assegurar que mai quedarà per sota del nivell de l'aigua.

La part inferior és una mampara que es submergeix fins als 3 metres, capturant els plàstics que estan a prop de la superfície. Els organismes propis del medi són portats per la corrent

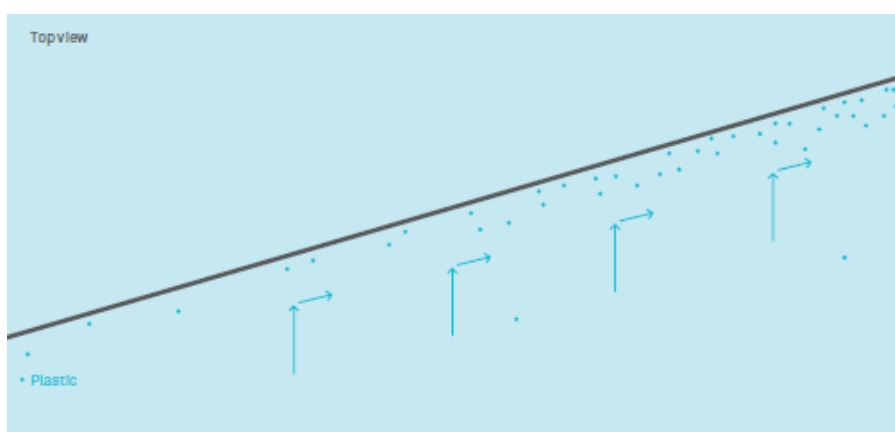
per sota de la barrera; les partícules de plàstic, en canvi, deixen aquesta corrent i és queden flotant al costat de la barrera. Com la mampara està feta d'un material no permeable, la mida de les partícules de plàstic que poden ser capturades està limitada únicament per la força de flotació. Aquest procés està esquematitzat a la *imatge 8*.



*Imatge 8: Esquema de la fase de captura*

#### 4.3.2.3. Fase de concentració

Col·locant les barreres en forma de V amb l'obertura en la direcció de la corrent permet que sigui aquesta qui transporti els residus cap al centre. Mentre recollir els residus directament de l'oceà podria considerar-se ineficient degut a la dispersió d'aquests en la gran extensió del gir oceànic, l'acumulació de les partícules durant aquesta fase facilita la posterior extracció dels residus. Veiem aquest procés a la *imatge 9*.



*Imatge 9: Esquema procés de concentració*

Un altre avantatge és que d'aquesta forma és possible recollir les micropartícules de plàstic (menys de 5mm).



#### 4.3.2.4. Fase de recol·lecció

Els residus de plàstic, acumulats en el centre de l'estructura en gran quantitat poden ser recol·lectats amb tècniques convencionals, com bombes hidràuliques. Després d'extreure la brutícia de l'oceà, els residus arriben a l'interior de la plataforma on es filtra fora de l'aigua.

Aquest procediment es duu a terme deixant passar l'aigua per diferents filtres. Els volum dels residus es pot reduir comprimint-los per després emmagatzemar-los fins que siguin portats a terra.

La plataforma pot ser autònoma, operant sense la necessitat de personal, durant molt de temps degut a la utilització d'energies renovables.

La *imatge 10* ens monstre un disseny preliminar realitzat amb *SolidWorks*.



*Imatge 10: Disseny preliminar de plataforma de captació*

#### 4.3.2.5. Principals avantatges

La principal avantatge de la neteja passiva és que la gran extensió del gir oceànic no impedeix dur la neteja. El temps necessari per netejar tota l'extensió del gir utilitzant xarxes i vaixells s'ha estimat en uns 79.000 anys.

Per altra banda, amb el mètode desenvolupat per l'Ocean CleanUp , aprofitant la corrent natural de l'aigua i la recirculació pròpia del Gir Subtropical del Pacífic Nord, el temps de neteja pot ser reduït dràsticament a un mínim de 5 anys.

A més, la recollida passiva proposada té molts menys efectes perjudicials sobre l'ecosistema i pot recollir partícules molt més petites que qualsevol xarxa.

## 5. Alya

Alya és un codi computacional d'alt rendiment programat en llenguatge *Fortran 1995* que resol diferents problemes multi-físics: fluxos compressibles i incompressibles, mecànics, químics, problemes de transferència de calor i de transport de partícules de Lagrange.

És un únic codi, no hi ha versions paral·leles. La principal tècnica de discretització emprada en *Alya* és basa en el mètode d'elements finits per acoblar les equacions físiques que regeixen els diferents problemes en sistemes algebraics. Per resoldre aquests sistemes es fan servir diferents mètodes com el GMRES (Generalized minimal residual method), el mètode del gradient conjugat, el mètode additiu de Sxhwarz o el SOR (Successive Over Relaxation) entre d'altres.

El codi és paral·lelitzat amb MPI (paral·lelització de memòria distribuïda) i OpenMP (paralelització de memòria compartida) i presenta una bona escalabilitat fins a 100.000 CPUs.

*Alya* ha estat creat i desenvolupat al *BSC*, la paral·lelització, la bona escalabilitat i la possibilitat de resoldre diferents models multi-físics, el fan específicament apte per córrer eficientment en supercomputadors.

*Alya* està reconegut per PRACE<sup>[7]</sup> (*Partnership foR Advanced Computing in Europe*) com un dels 12 codis per supercomputadors més importants d'Europa.

La missió de PRACE, una societat sense ànim de lucre, és fomentar l'impacte dels supercomputadors en la investigació científica i l'enginyeria per millorar las competències europees i beneficiar, així, la societat.

PRACE també busca enfortir els usuaris europeus de Supercomputadors en la indústria i té un fort interès en la millora de l'eficiència energètica dels sistemes informàtics i en reduir el seu impacte ambiental.

## 5.1. Arquitectura

*Alya* està organitzat com un conjunt de parts de codi que es poden connectar entre si i es poden compilar de forma independent. Aquests diferents conjunts s'agrupen en tres grans blocs: Kernel, Modules and Services. (Nucli, Mòduls i Serveis)<sup>[8]</sup>

- Kernel: El nucli. Conté tot el que es necessita per resoldre un problema. És l'encarregat de la lectura de dades i de la geometria, de generar el mallat, de cridar als mòduls i els serveis, controlar el flux de treball, etc.

El nucli és conscient de quins mòduls i serveis s'estan executant. També proporciona algunes eines de matemàtica bàsica.

- Modules: Conté els diferents mòduls físics. És on cada problema físic es resol numèricament. En un mòdul es programa la forma discretitzada de les equacions de govern, el mètode de resolució, les condicions inicials i de contorn, i totes les subtileses numèriques requerides.
- Services: entre de les diferents utilitats que disposa *Alya* en la carpeta services, destaquem totes les subrutines que necessita la resta del codi per la seva paral·lelització i que han estat utilitzades en aquest treball, on hem executat *Alya* amb més d'un processador. Com ja s'ha comentat anteriorment, *Alya* està paral·lelitzat tant a nivell de memòria compartida, com memòria distribuïda. En aquest últim cas es fa servir l'estandard MPI i dins de la carpeta de serveis trobem totes les subrutines relacionades amb les comandes que s'encarreguen de les comunicacions entre les diferents CPUS.

Qualsevol problema que vulguem simular amb *Alya* requerirà un seguit de fitxers. Una sèrie d'arxius necessaris per definir el *kernel* i els *modules*. A la *imatge 2: fitxers necessaris per córrer amb Alya* estan representats:

- *Kernel*. Necessita de 3 arxius obligatoris:

*problema.dat*: Dades necessàries per córrer (temps, nombre d'iteracions, paral·lel...), quins mòduls i serveis són necessaris.

*problema.dom.dat*: Definició del domini. Definició de la malla (nombre, tipus d'elements...), estratègia d'integració, geometria del model i condicions de contorn.

*problema.ker.dat*: A l'hora de resoldre problemes físics apareixen variables que són

compartides per diferents mòduls, com la densitat. Aquestes variables es troben aquí. Kermod, *ker.dat*, es pot veure com un mòdul obligatori que, en alguns casos, resol algunes equacions senzilles, com la distància d'un element fins la paret.

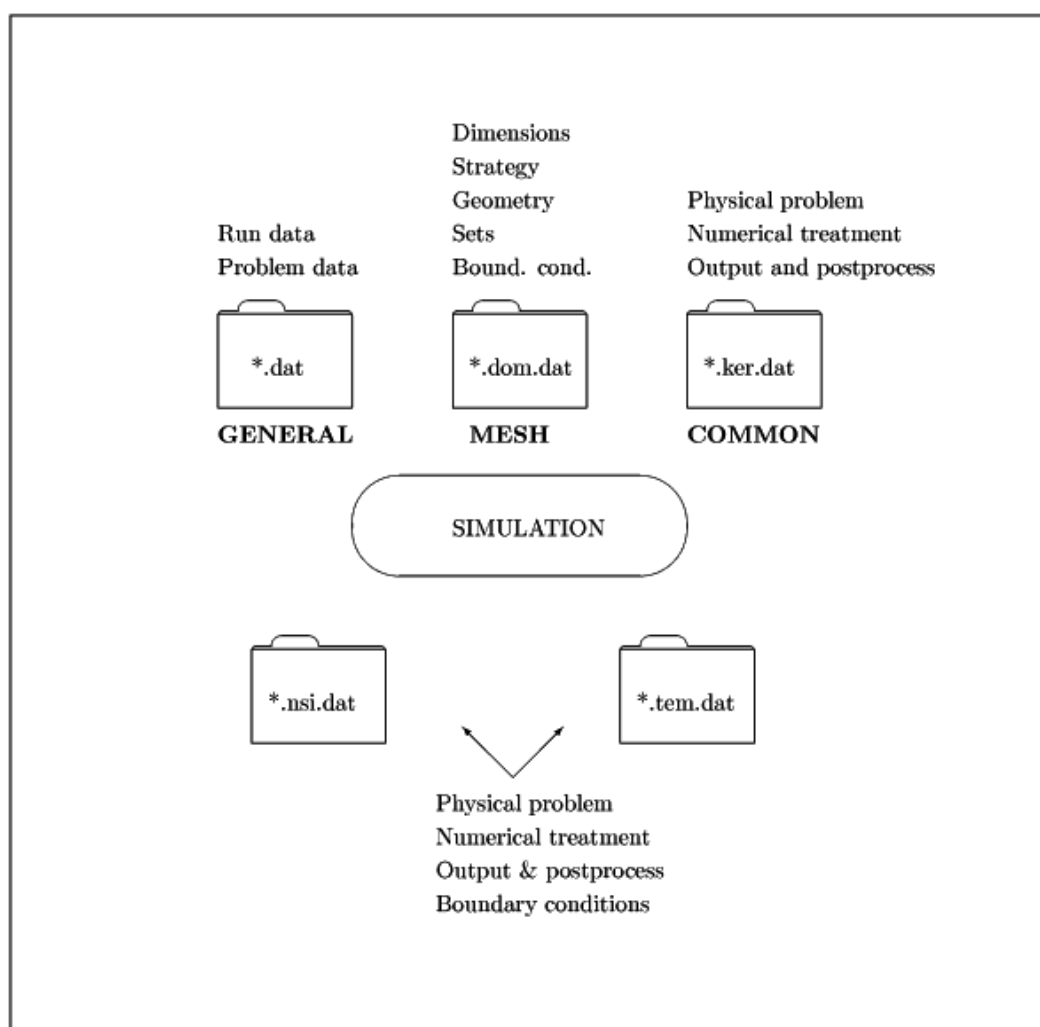
- *Modules*. Es requereix un fitxer per cada mòdul que es vulgui fer servir:

*problema.nsi.dat*: Equacions de Naveir-Stokes incompressibles.

*problema.tur.dat*: Models de turbulència.

*problema.tem.dat*: Problemes amb Temperatura.

*problema.pts.dat*: Problemes amb partícules.



Imatge 11: fitxers necessaris per córrer amb Alya

## 6. Marc teòric

### 6.1. Dinàmica de Fluids

La dinàmica de Fluids és l'estudi dels fluids en moviment. Les equacions bàsiques que governen el moviment d'un fluid viscos, conductor de la calor, s'anomenen les *equacions de Navier-Stokes, NS*, i és coneixen des de fa més de 150 anys.

Originalment eren atribuïdes a l'equació vectorial de la segona llei de Newton aplicada a un volum de control infinitesimal, actualment fan referència a 3 equacions que en forma vectorial s'escriuen:

- **Equació de la quantitat de moviment:**  $\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij}$

*Equació 1: Quantitat de moviment, on  $g$ =camp gravitatori,  $p$ =pressió,  $\tau_{ij}$ =tensor d'esforços viscosos  $\rho$ =densitat  $V$ =Camp de velocitats*

L'equació de la quantitat de moviment es pot expressar en paraules de la següent forma:

La suma de la força gravitatòria per unitat de volum, la força de pressió per unitat de volum i les forces viscoses per unitat de volum serà igual al producte de la densitat per l'acceleració.

Per a fluids Newtonians, com l'aigua, les tensions viscoses són proporcionals a les velocitats de deformació de l'element fluid i al coeficient de viscositat,  $\mu$ .

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \tau_{zy} = \tau_{yz} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

*Equació 2: Tensions viscoses per a fluid Newtonià*

Degut a que el fluid d'estudi durant aquest treball és l'aigua, podem considerar que el flux és incompressible. Això comporta que las variacions de la densitat són menyspreables.

Si expressem l'equació anterior en els 3 eixos espacials i suposem el flux incompressible, obtenim les següents equacions:

$$\begin{aligned}\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \mu \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{dP}{dy} + \mu \left( \frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{dP}{dz} + \mu \left( \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} + \frac{d^2 w}{dz^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt}\end{aligned}$$

Equació 3: Equacions de Navier-Stokes per cada eix espacial

- **Equació de conservació de la massa, o continuïtat:**  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$

Aquesta equació defineix la conservació de la massa en un suposat volum de control infinitesimal. Aquesta equació és valida independentment de si el flux es transitori o estacionari, viscos o no viscos, compressible o incompressible.

Com a l'equació anterior, per al nostre problema considerem el flux incompressible. Aquesta simplificació ens duu a la següent equació:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Equació 4: Equació de continuïtat en fluid incompressible

on  $V$ =Camp de velocitats

- **Equació de conservació de l'energia:**  $\rho \frac{du}{dt} + P(\nabla \cdot \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$

L'equació diferencial de l'energia s'obté aplicant la primera llei de la termodinàmica a un volum de control diferencial. On  $\Phi$  és la funció de dissipació viscosa que té en compte la conversió de l'energia del fluid en calor per fricció.

Fent una sèrie de simplificacions s'arriba a la següent equació:

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi$$

Equació 5: Equació de l'energia simplificada

Las equacions de continuïtat i de quantitat de moviment es poden resoldre independentment de l'equació de l'energia. Es més, si suposem la temperatura constant, com és el cas d'aquest treball, podem prescindir de l'equació de l'energia.

### 6.1.1. Fenòmens de Turbulència

Els fenòmens de turbulència són una de les branques de la dinàmica de fluids on queda més terreny per investigar. S'anomena flux turbulent el moviment d'un fluid que presenta les següents característiques<sup>[9]</sup>:

- Irregularitat: Els fluxos turbulents són sempre irregulars. La turbulència és caos.
- Difusivitat: L'alt nivell energètic del flux tendeix a accelerar l'homogeneïtzació d'aquest.
- Rotacionalitat: Els fluxos turbulents estan caracteritzats per la generació d'un gran vòrtex tridimensional. El resultat d'aquest efecte és la reducció progressiva d'aquest gran vòrtex i la conseqüent creació d'estructures similars més petites. El procés continua fins que l'energia cinètica d'aquests petits vòrtexs es dissipa en forma de calor.
- Dissipació: Per mantenir el flux turbulent, és necessària una font contínua d'energia degut a que l'energia cinètica de les partícules es dissipa en energia degut als esforços viscosos.

Per tots aquests motius modelar un flux turbulent és molt complicat. Per solventar aquest problema és va introduir el concepte de *viscositat turbulenta*.

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

Equació 6: Vector de tensions viscoses

D'aquesta forma podem modelar el flux turbulent amb eines molt similars a les del flux laminar, només afegint aquest nou terme. Així, el problema es redueix a calcular aquesta nova *viscositat turbulenta*.

Els models més comuns per calcular la viscositat turbulenta són els models k-omega, SST (Shear Stress Transport) i el k-epsilon. Aquest darrer model, el k-epsilon, és el fet servir al Feasibility Study i, per tant, l'utilitzat en aquesta memòria.

## 6.2. Transport de partícules de Lagrange<sup>[13]</sup>

Les partícules en un flux fluid són transportades degut a l'acció de diverses forces. Encara que aquestes forces poden variar segons l'estudi, la força d'arrossegament, originada per l'oposició del fluid al moviment de la partícula, sempre s'ha de tenir en compte.

Com la força d'arrossegament depèn del fluid, és necessari, primer de tot, resoldre les equacions de Navier-Stokes presentades a l'apartat anterior.

Definim  $\delta t = t_f - t_i$  com l'interval de temps de cada iteració. Per cada  $\delta t$  les equacions de Navier-Stokes són resoltes, el camp de velocitats fixat i les velocitats en cada punt del domini poden ser interpolades linealment.

Sent  $F_p$ ,  $a_p$  i  $m_p$  la força, l'acceleració i la massa de la partícula  $p$ . Aplicant la Segona llei de Newton, l'acceleració total aplicada a cada partícula s'obté amb el sumatori de totes les forces que intervenen. En l'estudi que realitzem en aquesta memòria les forces que s'han tingut en compte han estat la força exercida per la gravetat, la força d'arrossegament i la força de flotabilitat.

$$\sum F_p = m_p a_p$$

El càlcul de l'acceleració  $a_p$  s'ha de realitzar durant el mateix  $\delta t$  que és resol el fluid. Per fer-ho és necessita aplicar un mètode d'integració.

El mètode utilitzat és un semi implícit Newmark- $\beta$ . En aquest mètode, la velocitat  $u_p^{n+1}$  i la posició  $x_p^{n+1}$  corresponents a la següent iteració venen donades per dues equacions:

$$u_p^{n+1} = u_p^n + [(1 - \gamma)a_p^n + \gamma a_p^{n+1}]\delta t$$

*Equació 7: Equació velocitat Newmark-B*

$$x_p^{n+1} = x_p^n + u_p^n \delta t + \frac{\delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)a_p^n + 2\beta a_p^{n+1}]$$

*Equació 8: Equació posició Newmark-B*

On  $\beta$  i  $\gamma$  són constants. En aquesta memòria s'ha suposat l'acceleració constant per cada  $\delta t$ , això suposa fixar les constants  $\beta=1/4$  i  $\gamma=1/2$ . Com el Newmark- $\beta$  amb aquests valors és netament implícit apliquem el mètode Newton-Raphson per resoldre la dependència de  $u^{n+1}$ .



Sent  $f(u^{n+1})$  la funció l'arrel ve definida per l'equació 7:

$$\text{Equació 9: } f(u^{n+1}) = -u^{n+1} + u^n + [(1 - \gamma)a^n + \gamma a^{n+1}] \delta t$$

La seva derivada serà definida com:

$$\text{Equació 10 } f'(u^{n+1}) = -1 + \gamma \left. \frac{da}{du} \right|_{n+1} \delta t$$

El teorema Newton-Raphson queda definit com:

$$u_p^{n+1,k+1} = u_p^{n+1,k} - w(u_p^{n+1,k})$$

$$u_p^{n+1,k+1} = u_p^{n+1,k} - \frac{f(u_p^{n+1,k})}{f'(u_p^{n+1,k})}$$

*Equació 11: Equacions Newton-Raphson*

On el superíndex  $k$  indica la iteració del Newton-Raphson i

$$w^{n+1,k} = \frac{f(u_p^{n+1,k})}{f'(u_p^{n+1,k})}$$

*Equació 12*

per assegurar la convergència l'equació 13 es imposada.

$$\frac{\|w(u_p^{n+1,k})\|}{\|u_p^{n+1,k}\|} < \epsilon_c$$

*Equació 13*

On  $\epsilon_c$  representa la precisió desitjada a la convergència.

### 6.3. Semblances i nombres adimensionals<sup>[10]</sup>

Es denomina *semblança* a la relació existent entre una magnitud física en el prototip i el model, expressada en la mateixes unitats. Hi han diferents nivells de semblances:

- **Semblança geomètrica**

Totes les dimensions lineals del model estan relacionades amb les dimensions corresponents en el prototipus per un factor de forma d'escala constant,  $\lambda$ .

- **Semblança cinemàtica**

Les velocitats en punts "corresponents" en el model i el prototipus tenen la mateixa direcció i tan sols difereixen per un factor d'escala constant. Per tant els fluxos han de tenir patrons de línies de corrent similars i els règims de flux han de ser els mateixos.

La semblança cinemàtica implica la semblança geomètrica

- **Semblança dinàmica**

S'obté si les forces en punts similars en el model i el prototipus difereixen per un factor d'escala constant.

La semblança dinàmica implica les semblances cinemàtica i geomètrica.

Les condicions de comptabilitat per obtenir semblança dinàmica s'obtenen substituint les equacions de semblança a les equacions de Navier-Stokes.

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho'}{\rho} \quad \tilde{c} = \frac{c'}{c} \quad \tilde{t} = \frac{t'}{t} \quad \tilde{l} = \frac{l'}{l} = \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z}$$

*Equació 14: Equacions de semblança*

Després d'una sèrie de simplificacions obtenim les següents condicions:

Condicció 1:

$$1 = \frac{\tilde{l}^{\tilde{c}-2}}{\tilde{v} \tilde{l}^{-1} \tilde{t}^{-1}} = \frac{\left( \tilde{l}^{\tilde{c}-1} \right) \tilde{l}}{\tilde{v}} = \frac{c'l'}{v'} = \frac{\text{Re}'}{\text{Re}} \Rightarrow \boxed{\text{Re}' = \text{Re}}$$

*Equació 15: Igualtat de Reynolds*

Condicció 2:

$$1 = \frac{\tilde{\rho}}{\tilde{P}} \tilde{l}^2 \tilde{t}^{-2} = \dots = \frac{P'}{\frac{\rho'(c')^2}{\rho c^2}} = \frac{Eu'}{Eu} \Rightarrow \boxed{Eu' = Eu}$$

Equació 16: Igualtat d'Euler

Condicció 3:

$$1 = \frac{\tilde{l}^2}{\tilde{f}_v} = \frac{\frac{(c')^2}{l' g'}}{\frac{c^2}{lg}} = \frac{(Fr')^2}{Fr^2} \Rightarrow \boxed{Fr' = Fr}$$

Equació 17: Igualtat de Froude

Per tant, si pretenem tenir semblança dinàmica, cal que es conservin els tres paràmetres adimensionals. Per imposicions d'estudi, s'acostumen a tenir les següents restriccions:

- Mateixa gravetat:  $g = g' \Rightarrow \tilde{f}_v = 1$
- Mateix fluid:  $\rho, \nu \Rightarrow \begin{cases} \rho = \rho' \Rightarrow \tilde{\rho} = 1 \\ \nu = \nu' \Rightarrow \tilde{\nu} = 1 \end{cases}$
- Mateixa pressió:  $P = P' \Rightarrow \tilde{P} = 1$

Si substituïm a les equacions de comptabilitat:

Observem que l'estudi sobre el model reduït és impossible.

És precís recórrer a la **semblança incompleta**.

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad 1 = \frac{\tilde{l}^2 \tilde{t}^{-1} \tilde{\nu}^1}{\tilde{\nu}} \Rightarrow \tilde{l}^2 \tilde{t}^{-1} &= 1 \\ (2) \quad 1 = \frac{\tilde{\rho} \tilde{l}^2 \tilde{t}^{-2} \tilde{\rho}^1}{\tilde{P}} \Rightarrow \tilde{P} = \tilde{l}^2 \tilde{t}^{-2} & \\ (3) \quad 1 = \frac{\tilde{l}^2 \tilde{t}^{-2} \tilde{f}_v^1}{\tilde{f}_v} \Rightarrow \tilde{l}^2 \tilde{t}^{-2} &= 1 \end{aligned} \right\} \begin{matrix} \tilde{l} = 1 \\ \tilde{t} = 1 \\ \tilde{P} = 1 \end{matrix} \Rightarrow \boxed{GrLL = 0}$$

### 6.3.1. Semblança incompleta

La semblança incompleta tracta de prescindir d'algunes condicions de comptabilitat amb la finalitat d'augmentar el nombre de graus de llibertat del sistema.

Estudiarem els diferents nombres adimensionals més rellevants per el nostre problema. Tractarem d'igualar alguns, d'altres, ens serviran per acotar algunes variables del model com la velocitat d'entrada de l'aigua.

A continuació observem la *taula 1* amb els principals nombres adimensionals, la seva fórmula, la relació de forces que estudia i en quines situacions és mes rellevant.

<b>NOMBRE DE REYNOLDS</b>	$R_E = \rho UL/\mu$	INÈRCIA/VISCOSITAT	SEMPRE
<b>NOMBRE DE MACH</b>	$MA = U/A$	VELOCITAT FLUX/VELOCITAT SO	FLUX COMPRESSIBLE
<b>NOMBRE DE FROUDE</b>	$F_r = U^2/gL$	INÈRCIA/GRAVETAT	FLUX AMB SUPERFÍCIE LLIURE
<b>NOMBRE DE WEBER</b>	$W_e = \rho U^2 L/\gamma$	INÈRCIA/TENSIÓ SUPERFICIAL	FLUX AMB SUPERFÍCIE LLIURE
<b>NOMBRE D'EULER (CAVITACIÓ)</b>	$C_a = (p-p_v)/\rho U^2$	PRESIÓ/INÈRCIA	CAVITACIÓ
<b>NOMBRE DE STROUHAL</b>	$St = \omega L/U$	OSCILACIÓ/VELOCITAT MITJA	FLUX OSCIL-LATORI
<b>RUGOSITAT RELATIVA</b>	$\epsilon/L$	RUGOSITAT/LONGITUT DEL COS	FLUX TURBULENT, PARET RUGOSA

*Taula 1: Principals nombres adimensionals*

Observem que els nombres adimensionals més representatius pel nostre estudi són el nombre de Reynolds, per assegurar la turbulència, el nombre de Mach, per confirmar la compressibilitat i el nombre de Froude, per comprovar que el règim de flux és el mateix en ambdós estudis.

## 6.4. CFD, Computational Fluid Dynamics

La dinàmica computacional de fluids, CFD, és una branca, cada dia més important, de la mecànica de fluids. Aquesta tècnica sorgeix arran de la utilització de computadors en la resolució de problemes físics.

El mètode per solucionar els problemes consisteix en la discretització de l'espai, el que es coneix com *mallar*. D'aquesta forma es divideix el domini del problema en diferents cel·les on les equacions de Navier-Stokes són resoltes.

La discretització de l'espai en un nombre finit de volums de control, elements, permet fer servir mètodes algebraics iteratius per resoldre els problemes.

Una de les avantatges de fer servir mètodes computacionals per resoldre problemes de fluxos fluids és que permet obtenir l'estat del fluid (velocitat, pressió, energia...) en cada element del domini, per cada instant de temps.

Això suposa resoldre les equacions de Navier-Stokes per cada element, en cada iteració. En conclusió, per resoldre un problema 2D molt senzill, hem de resoldre les equacions abans comentades entre centenars de milers i milions de vegades. És aquest el motiu pel que es necessitin supercomputadors per resoldre problemes complexos.

## 7. Comparem models

En aquest capítol volem donar a conèixer el model en 2D amb el que comencem a treballar, el model que apareix al *FS* i les diferències entre ells que haurem de superar. Per facilitar la lectura del model treballarem amb la visualització d'aquest, realitzada amb el programa lliure *Paraview*.

### 7.1. Definim el problema amb *Alya*

Per definir el nostre model, *ocean*, amb *Alya* ens fem servir de 8 fitxers:

A l'*annex* apareixen tots els fitxers que donen forma a aquest model. A continuació farem una breu explicació de cadascun d'ells.

*ocean.dat*: Dades necessàries per córrer (temps, nombre d'iteracions, paral·lel...), quins mòduls i serveis són necessaris.

*ocean.dom.dat*: Definició del domini. Definició de la malla (nombre, tipus d'elements...), estratègia d'integració, geometria del model i condicions de contorn.

*ocean.fix.dat*: Llistat de nodes que són frontera i l'element del que formant part, triangles o quadrats).

*ocean.geo.dat*: Llistat de tots els nodes i dels elements que formant part, el que es coneix com connectivitat.

*ocean.ker.dat*: A l'hora de resoldre problemes físics apareixen variables que són compartides per diferents mòduls, com la densitat. Aquestes variables es troben aquí. *Kermod*, *ker.dat*, es pot veure com un mòdul obligatori que, en alguns casos, resol algunes equacions senzilles, com la distància d'un element fins la paret.

*ocean.nsi.dat*: Equacions de Navier-Stokes incompressibles.

*ocean.post.alysadat*: Permet que programes com *Paraview* puguin llegir les solucions.

*ocean.tur.dat*: Equacions i models de turbulència.

## 7.2. Descripció del Model

El model 2D amb el que treballem es va definir abans de la publicació del FS. Aquest fet provoca que els 2 models no siguin iguals i comporta que les simulacions que realitzarem, no podran ser idèntiques.

El disseny d'aquest model respon a un estudi realitzat per l'Ocean Cleanup, que anomenarem *mocean*<sup>[1]</sup>. Aquest estudi tracta de definir la força que exerceixen les onades sobre la barrera. Per fer-ho es fan servir uns sensors, unes molles, col·locades als extrems de la mànara. Una piscina d'onades els hi permet obtenir resultats experimentals. Posteriorment fan un estudi més exhaustiu amb el programa OrcaFlex.

Els resultats d'aquest estudi no entren dins l'abast d'aquest projecte. El mencionem aquí per justificar el model 2D d'*ocean* amb el que treballem en aquesta memòria. Si observem la taula següent, a la segona pàgina de l'estudi *mocean*, veiem que el model amb el que treballarem està fet a escala.

	<i>Symbol</i>	<i>Model</i>	<i>unit</i>	<i>Prototype</i>	<i>unit</i>
<i>Tank width</i>	W_T	1,00	[m]	19,0	[m]
<i>Water depth</i>	D_w	0,90	[m]	17,1	[m]
<i>Boom length</i>	l_B	1,00	[m]	19,0	[m]
<i>Floater diameter</i>	D_f	0,06	[m]	1,2	[m]
<i>Skirt height</i>	h_Sk	0,11	[m]	2,0	[m]
<i>Floater mass</i>	M_B	579	[g]	3,97	[te]
<i>Keel mass I</i> <i>(low mooring)</i>	M_KI	109	[g]	0,75	[te]
<i>Keel mass II</i> <i>(high mooring)</i>	M_KII	302	[g]	2.07	[te]
<i>Skirt mass</i>	M_Sk	15	[g]	0,10	[te]
<i>Simulation duration</i>	T	14	[min]	120	[min]
<i>Mooring Stiffness per line</i>	K_m	[1]	[N/m]	375	[N/m]

Taula 2: Escala del model

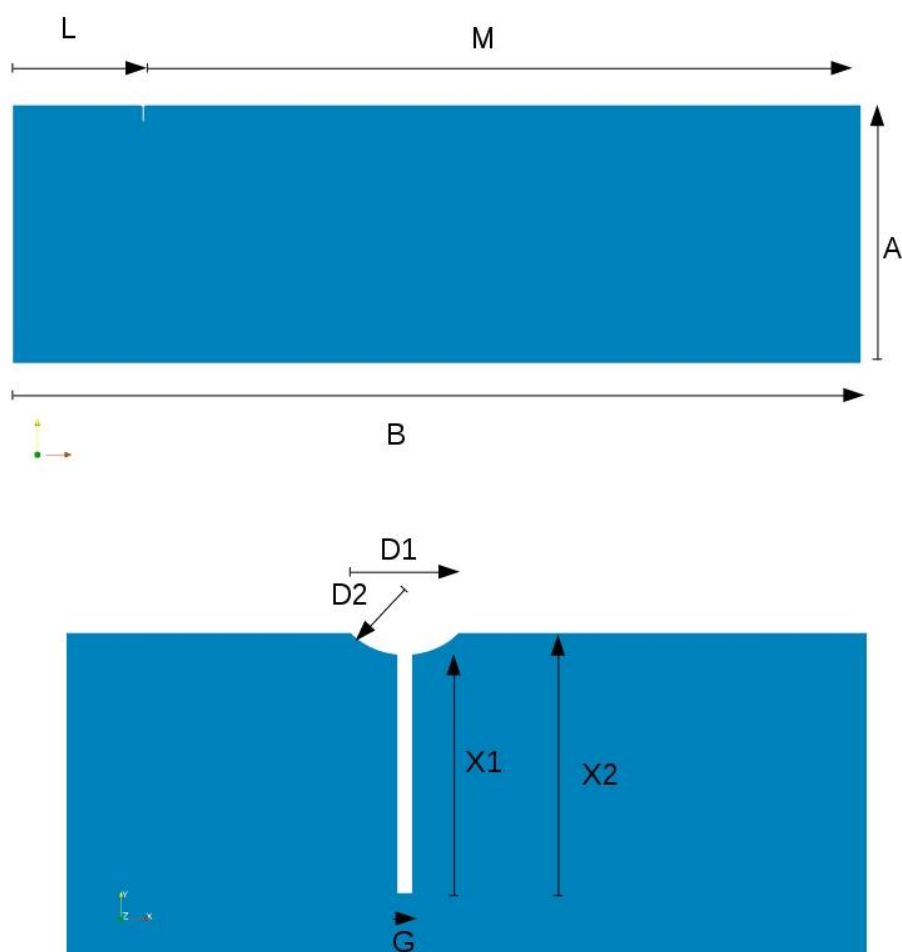
Aquest fet, el de treballar amb un model a escala, tindrà greus repercussions a l'hora de comparar tots dos models. Per a l'estudi que estem duent a terme ens centrarem únicament en l'escala de longituds:

$$\lambda = \text{longitud}_{\text{model}} / \text{longitud}_{\text{prototip}} = 1/19$$

### 7.2.1. Domini

Com ja hem explicat, per disminuir costos i errors, quan s'engega una simulació de gran envergadura, la millor opció és començar per un model molt senzill i, conforme es va confirmant que els resultats són correctes, es van agregant les diferents complexitats del problema. En el nostre cas això significa un domini 2D ple d'aigua, rectangular, amb un forat que correspon al flotador i la mampara que, per suposat, està sotmesa a la llei de la paret. A efectes pràctics, és com si flotador i membrana estiguessin presents.

A la *imatge 12*, observem la visualització del model 2D en *Paraview* i les dimensions del domini.



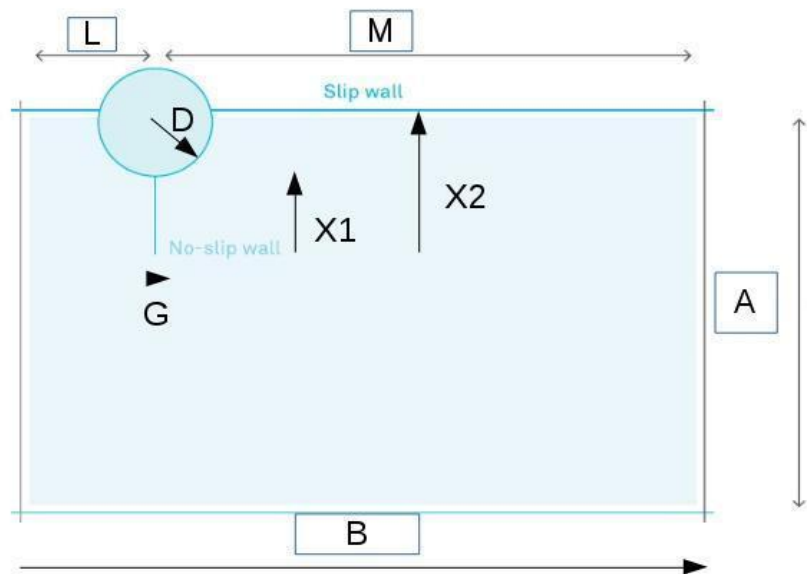
*Imatge 12: Domini del model d'Alya*



En les figures anteriors observem com és el domini amb el que estem treballant. En estrats més avançats del projecte caldrà incorporar la barrera i el flotador, l'aire, les onades i els plàstics.

De tots aquests elements, en aquesta memòria, només veurem la implantació de les partícules de plàstic.

A la *Imatge 13* observem el domini que utilitzen al FS. A la *taula 3* observem les diferències entre tots dos.



*Imatge 13: Domini model FS*

	Ocean [m]	Escala (1:19) [m]	FS [m]	Diferencia en %
<b>A</b>	1,9	36,1	40	10,80
<b>B</b>	6,5	123,5	80	-35,22
<b>L</b>	1	19	20	5,26
<b>M</b>	5,5	104,5	60	-42,58
<b>D1</b>	0,06	1,14	1	-12,28
<b>D2</b>	0,045	0,855	1	16,96
<b>X1</b>	0,11	2,09	2,5	19,62
<b>X2</b>	0,12	2,28	3	31,58
<b>G</b>	0,006	0,114	0,01	-91,23

*Taula 3: Diferències en els dominis dels models*

Observem que les diferències són considerables. Les files remarcades prenen més importància en el disseny, la diferència més gran la trobem en el gruix de la mampara. Les altres, corresponents a «A,B,L i M» no afecten a la simulació, ja que en ambdós models les distàncies són suficientment grans per estabilitzar el fluid.

Com explicàvem al capítol anterior, per tenir semblança geomètrica entre model i prototip, «totes les dimensions lineals del model estan relacionades amb les dimensions corresponents en el prototipus per un factor de forma d'escala constant,  $\lambda$ ». Així que, entre aquests 2 models mai podrem assumir semblança geomètrica ni, per suposat, semblança cinemàtica ni dinàmica.

Una altra diferència geomètrica entre els 2 models és la posició del flotador. Al model resolt amb *A/ya* el flotador està menys submergit que el flotador del *FS*.

Com la geometria dels models és una de les coses que no podem variar en aquest estudi, continuarem endavant suposant una semblança geomètrica amb  $\lambda=1/19$ .

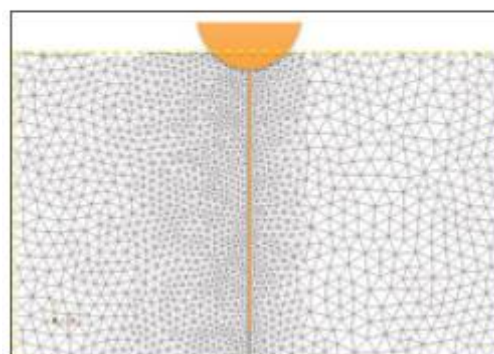
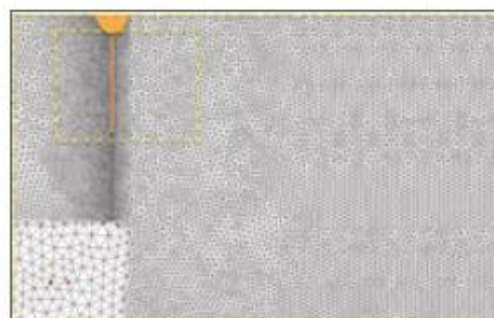
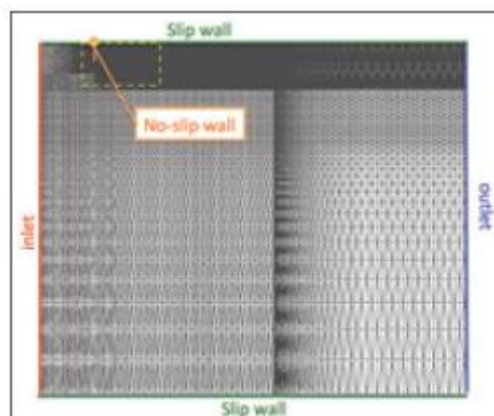
Haurem de ser curosos a l'hora d'interpretar els resultats.

### 7.3. Malla

Al capítol anterior parlàvem de la importància de discretitzar els dominis, comunament anomenat mallar. El mallat del domini és l'altre gran factor que mantenim invariable en el disseny.

El mallat realitzat al nostre model consta de 25272 elements, tant quadrats com triangulars. Com es pot observar a la *imatge 15 Mallat ocean*, el mallat és cada cop més refinat conforme ens apropem a la mampara. Aquest refinament és degut a que en aquesta zona és on el gradient de las velocitats és més elevat. És a dir, en aquesta zona el valor de la velocitat varia molt pronunciadament.

Els elements de la malla del *FS*, *imatge 14*, estan dimensionats entre els 5mm a prop de la mampara i els 0.8m al *outlet*.

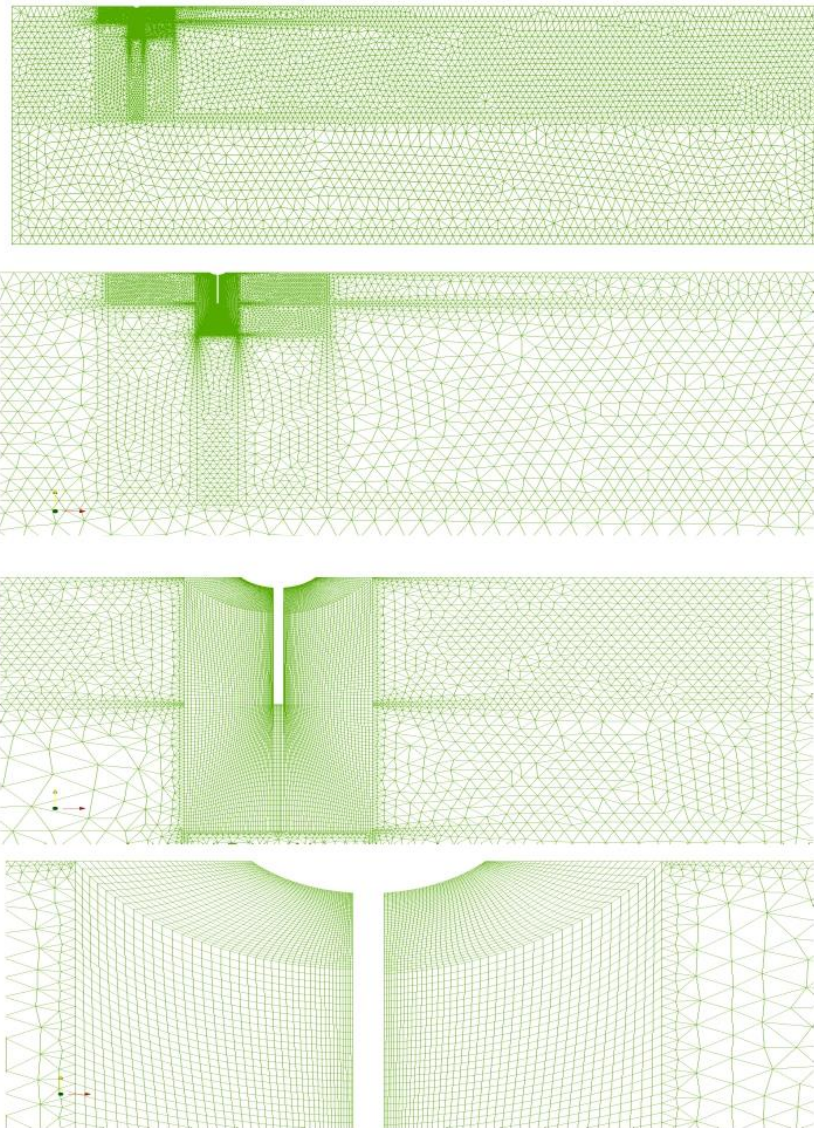


En el nostre model els elements més petits són de 0,4mm i, els més grans d'uns 65mm (sense escalar).

La principal diferència entre els 2 estudis és la dimensió del domini. Com que no està fet a escala, el domini del FS és 250 vegades més gran que el nostre. Això suposa haver de mallar amb elements més grans i tenir menys precisió en la solució o dedicar-hi molts més recursos en la simulació, tant de CPU's com de temps.

*Imatge 14: Malla FS*

La malla que veiem a la *imatge 15* és el resultat de diferents anàlisis de sensibilitat que han permès l'optimització d'aquesta. Una malla ben definida és aquella que utilitza el mínim nombre d'elements per obtenir uns bons resultats.



*Imatge 15: malla ocean*

## 7.4. Condicions de contorn

Les condicions de contorn són les mateixes en tots dos models. Com podem observar a la *imatge 13* el domini està limitat per 4 parets i la mampara.

Les parets inferior i superior estan sotmeses a la condició “slip wall”, parets amb lliscament. A la barrera, en canvi, no hi ha lliscament. D'aquesta forma assegurem que la velocitat del fluid sigui 0 en tota la barrera.

L'*outlet*, la paret de sortida del flux, està suficientment separada de la mampara perquè el flux estigui estabilitzat. A l'*outlet* imposarem la pressió hidrostàtica.

La darrera paret que queda per definir és l'*inlet*, la paret d'entrada. En aquesta paret fixarem la velocitat d'entrada de l'aigua al volum de control. Serà l'única condició de contorn que variarem durant l'estudi.

Aquestes condicions, imposar velocitat a l'entrada i pressió a la sortida, són les més òptimes en aquests tipus de simulacions. Aquestes condicions de contorn faciliten la convergència de la solució.

Al model desenvolupat amb *Alya* tots aquests elements estan representats al fitxer *ocean.nsi.dat*

## 7.5. Model a escala

Per definir les condicions de contorn esmentades a l'apartat anterior no podem fer servir, directament, les dades que s'utilitzen al *FS*.

Per resoldre aquest problema, calcularem les escales de les diferents magnituds necessàries. Per fer-ho, recuperem la *taula 2: escala del model*.

Com el fluid d'estudi és el mateix en tots dos experiments, l'aigua, tant l'escala de densitats, com l'escala de viscositats serà igual a 1. Les 3 escales bàsiques seran:

- Escala de longituds:  $\lambda = 1/19$
- Escala de masses:  $m' = \text{massa}_{\text{model}} / \text{massa}_{\text{prototip}} = 109\text{g} / 750.000\text{g} = 0,0001453$
- Escala de temps:  $t' = \text{temps}_{\text{model}} / \text{temps}_{\text{prototip}} = 14\text{min} / 120\text{min} = 0,1166$

A partir de les 3 escales de magnituds bàsiques, longitud, massa i temps (la temperatura no afecta en aquest estudi), podem trobar la resta d'escales que desitgem.

Com hem comentat anteriorment, durant l'estudi utilitzarem diferents magnituds de velocitats. Serà necessari definir l'escala de velocitats.

- Escala de velocitats:  $v' = v_{\text{model}}/v_{\text{prototip}} = \lambda/t' = (1/19)/0,1166 = 0,45138$

Un cop calculades les diferents escales, estudiarem com afecten aquestes als 3 nombres adimensionals comentats al *capítol 6.2*, el nombre de Reynolds, el nombre de Mach i el nombre de Froude.

Hem escollit aquests 3 nombres adimensionals per 2 raons. La primera és que són 3 dels nombres adimensionals més influents en la física del problema. La segona és que tots tres diferencien, en funció del seu valor, característiques pròpies del flux fluid.

Així doncs, un cop realitzats els càlculs dels 3 nombres adimensionals estem en condicions de validar la semblança entre els dos models. Aquests càlculs s'han realitzat establint la velocitat de l'aigua del prototip en 15cm/s,  $u_{\text{prototip}} = 0.15\text{m/s}$ . Els resultats són els següents:

#### Nombre de Reynolds:

- $Re < 2000 \rightarrow$  Flux Laminar
- $Re > 10.000 \rightarrow$  Flux Turbulent
- $Re_{\text{model}} = 2.47 \times 10^6$
- $Re_{\text{prototip}} = 1.12 \times 10^9$

Tots dos fluxos són MOLT turbulents.

#### Nombre de Mach:

- $M < 1 \rightarrow$  Flux subsònic, la densitat és pràcticament constant  $\rightarrow$  Incompressible
- $M \sim 1 \rightarrow$  Flux transsònic, la densitat varia de la mateixa forma que ho fa la velocitat.
- $M > 1 \rightarrow$  Flux supersònic, la densitat varia més intensament que la velocitat, amb un factor de  $M^2$ .

- $M_{\text{model}}=1.5 \times 10^{-5}$
- $M_{\text{prototip}}=1 \times 10^{-4}$

Tots dos fluxos són incompressibles, el que és evident degut al seu estat líquid.

#### Nombre de Froude:

- $Fr < 1 \rightarrow$  Flux subcrític, flux lent, tranquil.
- $Fr = 1 \rightarrow$  Flux crític, punt inestable.
- $Fr > 1 \rightarrow$  Flux supercrític, flux ràpid.
- $Fr_{\text{model}}=4.7 \times 10^{-4}$
- $Fr_{\text{prototip}}=8.3 \times 10^{-3}$

Tots dos fluxos són subcrítics.

## 8. Validació del model ocean, resultat amb Alya

En aquest capítol presentem les simulacions realitzades amb Alya i comparem els resultats obtinguts amb els resultats que apareixen al capítol 3.3 del Feasibility Study.

Per comparar els resultats veurem quines són les partícules que es queden atrapades a la barrera i quines no.

El mòdul *partís* d'Alya permet introduir partícules en els problemes físics. Aquest mòdul està dissenyat per que les partícules corrin sobre les línies de corrent. Si hem de fer diferents simulacions amb el mòdul *partís*, com és el nostre cas, és més òptim resoldre primer el model sense partícules i, després, córrer les diferents simulacions de *partís* sobre el camp de velocitats original.

Un cop resolt el problema amb les velocitats del fluid desitjades, extraurem el perfil de velocitats i serà sobre aquest perfil de velocitats, ja en estacionari, per on navegaran les partícules de plàstic.

Abans de veure el comportament de les partícules hem resolt el problema *ocean.dat* amb 3 velocitats d'entrada diferents, que és corresponen amb les velocitats que apareixen al FS de la següent forma:

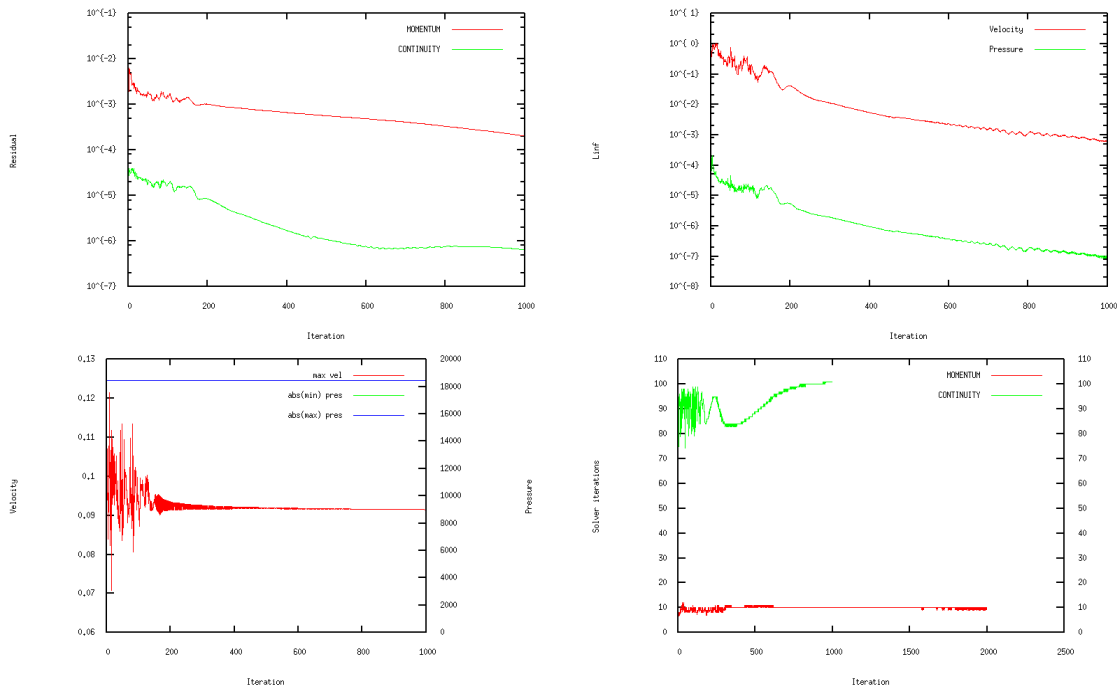
$$v_{1\text{ocean}}=2,25\text{cm/s} \rightarrow v_{1\text{FS}}=5\text{cm/s}$$

$$v_{2\text{ocean}}=4,5\text{cm/s} \rightarrow v_{2\text{FS}}=10\text{cm/s}$$

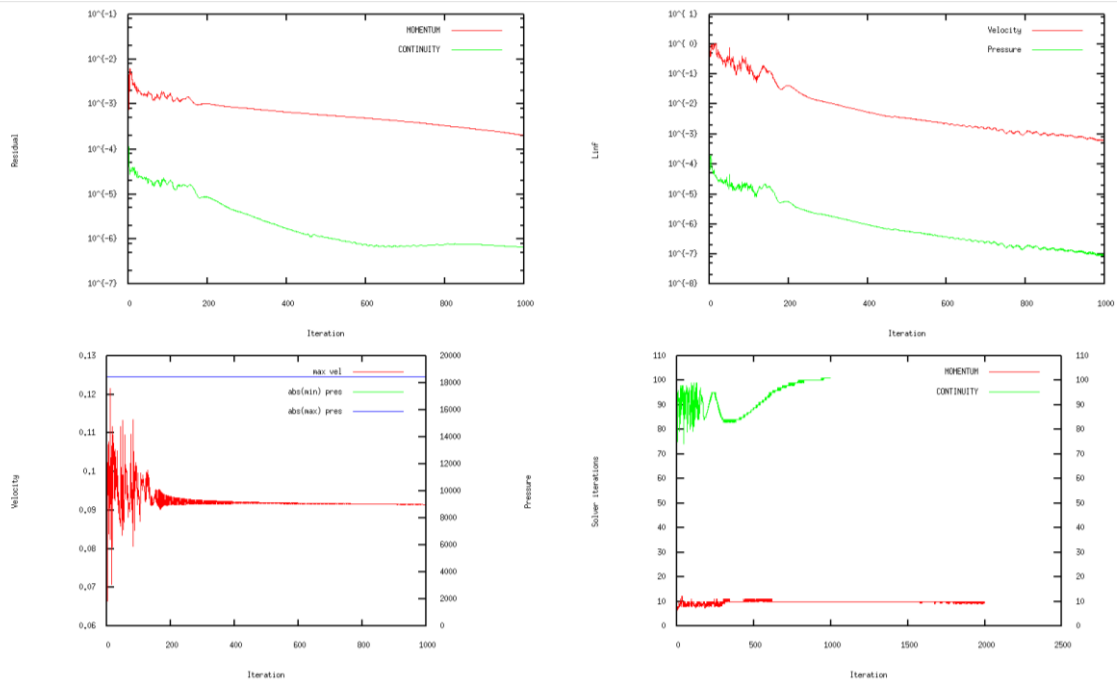
$$v_{3\text{ocean}}=6,75\text{cm/s} \rightarrow v_{3\text{FS}}=15\text{cm/s}$$

Per assegurar-nos que les simulacions són correctes hem de comprovar que la solució convergeixi en un valor concret i que els residus entre un pas d'iteració i el següent siguin menyspreables.

*Alya* facilita aquesta comprovació mitjançant diferents gràfics, els podem veure a continuació:

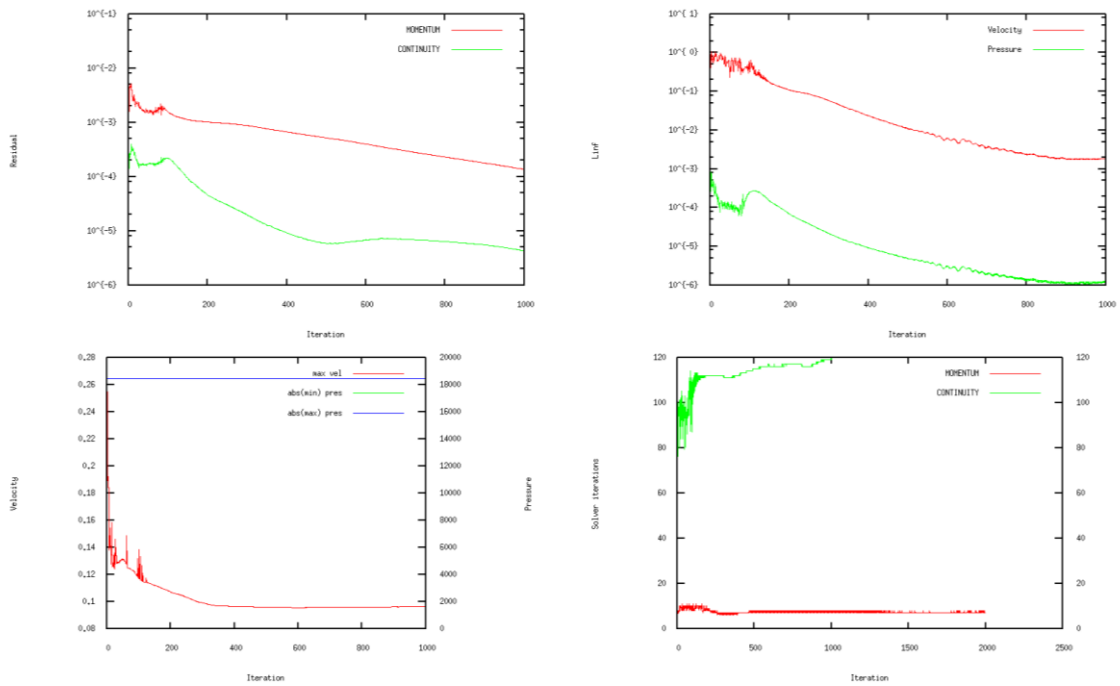


Gràfic 5: Convergència velocitat 2,25cm/s



Gràfic 6: Convergència velocitat 4,45cm/s

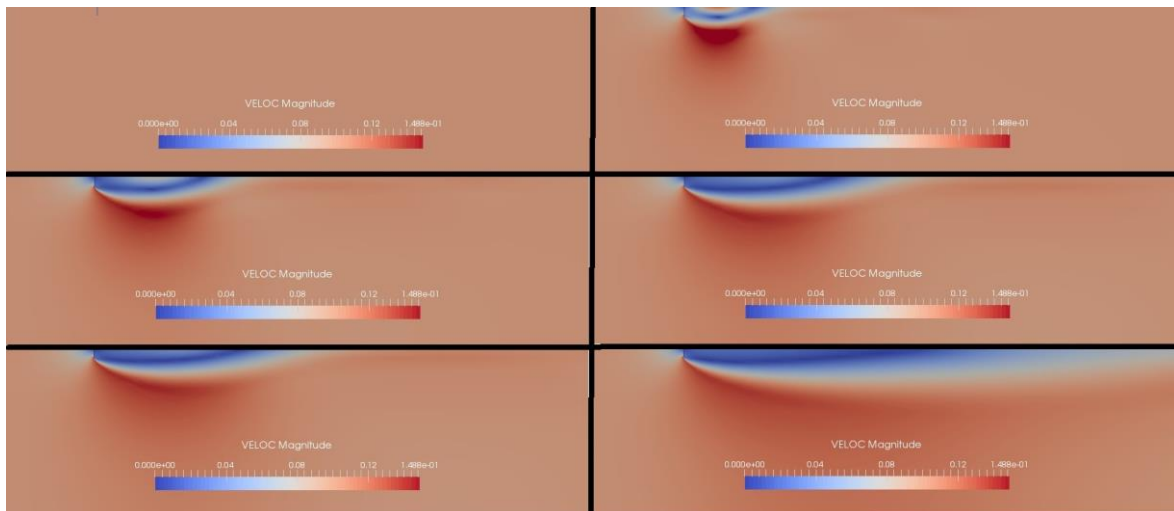




Gràfic 7: Convergència velocitat 6,75cm/s

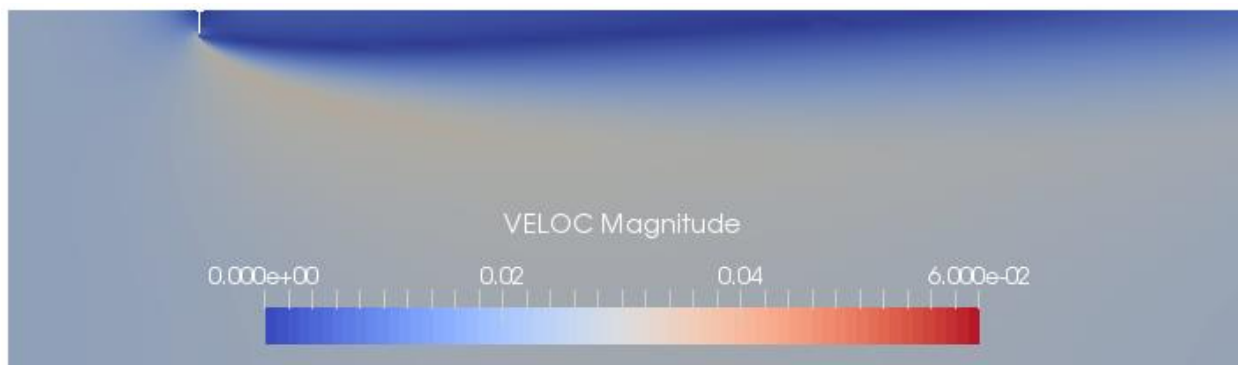
Per veure els resultats gràficament hem fet servir el programa *Paraview*.

A continuació veiem com evoluciona el perfil de velocitats conforme avança el temps. En aquesta ocasió la velocitat d'entrada correspon a  $v_{ocean}=10\text{cm/s}$ .



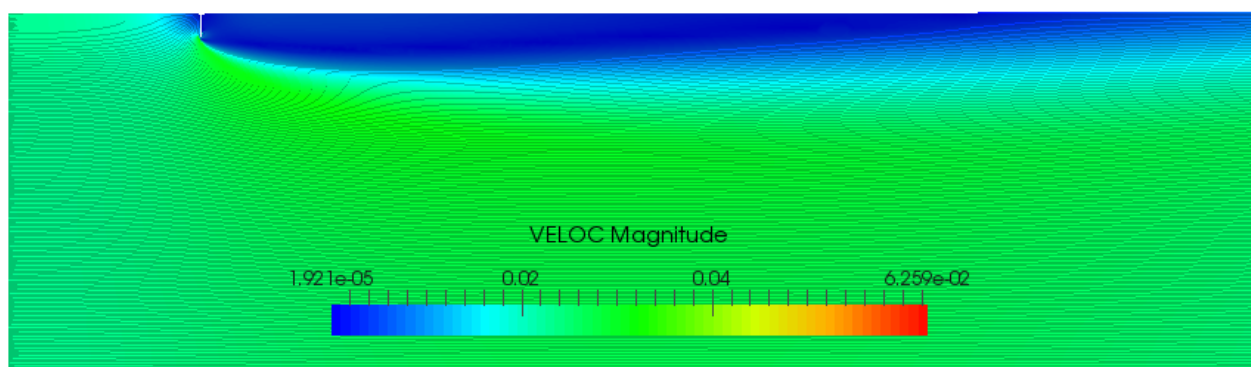
Imatge 16: Evolució velocitat amb  $v=10\text{cm/s}$

Com podem veure a la *imatge 17*: velocitat  $v=2,25\text{cm/s}$ , on el flux ja està en règim estacionari, la recirculació originada per la barrera és menor conforme reduïm la velocitat d'entrada de l'aigua.



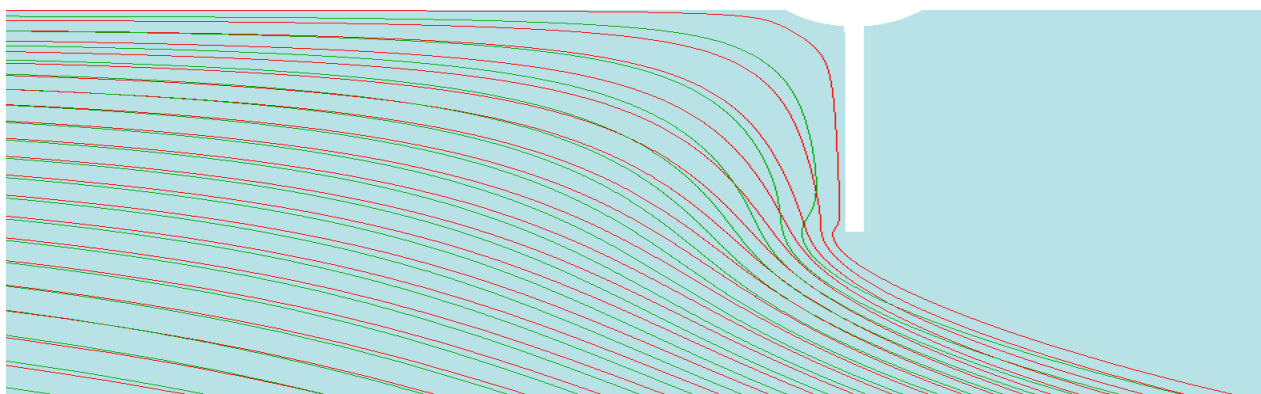
*Imatge 17: velocitat  $v=2,25\text{cm/s}$*

A la *imatge 18* observem les *streamlines*, o línies de corrent, que seguiran les diferents partícules.



*Imatge 18 Streamlines amb  $v=2,25\text{cm/s}$*

A la *imatge 19* estan representades les línies de corrent corresponents a una  $v=2,25\text{cm/s}$  en verd i les corresponents a una velocitat  $v=4,5\text{cm/s}$  en vermell. Hem fet un zoom a la barrera per veure com es comporta la velocitat en aquesta zona.



*Imatge 19: Streamlines  $v=2,25$  en verd. Streamlines  $v=4,5$  cm/s en vermell.*

## 8.1. Introduïm les partícules en el model

### 8.1.1. SIMPLIFICACIONS DEL MODEL

En aquest capítol veurem com hem implantat les diferents partícules que simularan els plàstics a l'oceà.

Per facilitar la simulació i amb la intenció de comparar els resultats obtinguts amb Alya dels obtinguts a l'anàlisi fet per l'equip de TOC, farem servir les mateixes simplificacions que les dutes a terme al *Feasibility Study*. Són les següents:

- Les partícules de plàstic són esfèriques.
- La distribució vertical de partícules de plàstic utilitzada és l'estimada al document *The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris by Kukulka, Proskurowski, Morét-Ferguson, Meyer & Law (2012)*.<sup>[12]</sup>
- La distribució ponderada dels plàstics en funció de la seva mida mesurada per l'equip de TOC a la secció 2.3 *Feasibility Study* és representativa i aplicable al vòrtex estudiat i, per tant, a la simulació.
- La component normal de la velocitat, perpendicular a la barrera, de les partícules és igual a la velocitat de la corrent (secció 2.5 *Feasibility Study*).

### 8.1.2. Ocean.pts.dat

En aquest capítol explicarem detalladament com hem inclòs les partícules de plàstic al nostre model. Per fer-ho hem dissenyat el fitxer ocean.pts.dat. L'esquelet d'aquest fitxer el veiem a la *imatge 20*.

```

$-----
PHYSICAL_PROBLEM
  MAXIMUM = 50
$ TYPE= 1
$ MODEL=   VELOCITY
$ DIAMETER= 2.0E-07
$ DIAMETER= 1.0E-09
$ BROWNIAN_MOTION: Off
$ END_TYPE
TYPE= 2
  MODEL=   FORCE
  FORCES:  DRAG, GRAVITY, BUOYANCY
  DENSITY= 1.0E+04
  DIAMETER= 1.0E-09
END_TYPE

END_PHYSICAL_PROBLEM
$-----
NUMERICAL_TREATMENT
$ ADAPTIVE_TIME_STEP: ERROR
  NEWMARK: GAMMA=0.5, BETA=0.25   $ Diffusive
$ NEWMARK: GAMMA=1.0, BETA=0.5625 $ Very diffusive
END_NUMERICAL_TREATMENT
$-----
OUTPUT_&_POST_PROCESS
  LEVEL   = 1
  FREQUENCY = 1
$ OUTPUT DEPOSITION
$ POSTPROCESS DEPOSITION, STEPS=1
$ POSTPROCESS PARTICLES, STEPS=1
$POSTPROCESS RESIDENCE, STEPS=1
END_OUTPUT_&_POST_PROCESS
$-----
BOUNDARY_CONDITIONS
$ INJECTIONS = 1.0
INJE1:   SQUARE, PARAM=0.3,0.3,0.0,0.7,0.7,0.0 1
$ INJE2:   CIRCLE, PARAM=0.2,0.2,0.0,0.1,1.0,0.0,
  INITIAL_TIME= 0.0
  PERIOD_TIME= 1.0e6
END_BOUNDARY_CONDITIONS
$-----

```

*Imatge 20: Esquelet fitxer ocean.pts.dat*

Observem 4 blocs diferenciats. Per adaptar aquest *script* al nostre problema només necessitarem variar dos d'aquests: PHYSICAL\_PROBLEM I BOUNDARY\_CONDITIONS.

El primer bloc, PHYSICAL\_PROBLEM, recull els diferents tipus de partícules i el tractament que rebran. De moment només s'han dissenyat dos tipus de models: VELOCITY I FORCE. El primer només te en compte velocitats i trajectòries. El segon model, que és el que aplicarem a totes les partícules del nostre problema, te en compte diverses forces. Per tal

de calcular la trajectòria de les partícules necessitem introduir la densitat, el diàmetre i aquelles forces que volem que apareguin a la simulació. En aquest cas aplicarem 3 tipus de forces: *DRAG*, *GRAVITY* i *BUOYANCY*, és a dir, la força d'arrossegament, el pes i la força de flotació.

En aquestes simulacions no s'ha contemplat la fricció de la paret, això vol dir que totes les partícules que toquin la mampara seran considerades partícules atrapades. Les simulacions realitzades al FS distingeixen entre 3 tipus de possibilitats. Que les partícules quedin atrapades, que toquin la barrera i marxin per sota i, per últim, aquelles partícules que no arriben a tocar la barrera. A les nostres simulacions només tindrem 2 possibilitats, toquen la barrera o no la toquen.

Un cop hem omplert el primer bloc, *PHYSICAL\_PROBLEM*, ens endinsem en completar l'últim, *BOUNDARY\_CONDITIONS*.

En aquest bloc s'especifica el nombre d'injeccions, el tipus d'aquestes i la quantitat de partícules a cada una. Amb aquest script no podem decidir quins tipus de partícula injectem i quins no. Quan fem una injecció, apareixeran tots els tipus de partícules definits

Del FS observem que introdueixen les partícules a 10m de la barrera i a 5 alçades diferents (respecte el nivell del mar):

- $h_1=0\text{m}$
- $h_2=-0.25\text{m}$
- $h_3=-0.5\text{m}$
- $h_4=-1\text{m}$
- $h_5=-2\text{m}$

Per representar el mateix en el nostre model necessitarem escalar aquestes dimensions. Generarem 5 injeccions quadrades de dimensions molt petites, que simularan punts. Per situar-les cal tenir en compte que els orígens de coordenades dels models són diferents.

Situarem els quadrats injectors a 10m de la barrera i a la profunditat esmentada anteriorment. En el model a escala significa situar-les a 0.0265m de l'origen de coordenades.

Las 5 injeccions es situaran en les posicions definides a la *taula 4: Injeccions del model ocean*.

Injeccions	Xmin [m]	Ymin [m]	Zmin [m]	Xmax [m]	Ymax [m]	Zmax [m]	Num. Part.
1	0.0265	0.875	0	0.0260	0.8795	0	1
2	0.0265	0.8668	0	0.0260	0.8669	0	1
3	0.0265	0.8536	0	0.0260	0.8537	0	1
4	0.0265	0.8273	0	0.0260	0.8274	0	1
5	0.0265	0.7747	0	0.0260	0.7748	0	1

Taula 4: Injeccions del model ocean

## 8.2. Primeres simulacions

La primera sèrie de simulacions que apareix al FS respon a les velocitats  $v_{1FS}=5\text{cm/s}$  i  $v_{3FS}=15\text{cm/s}$ . Les partícules que apareixen en aquestes simulacions estan definides per 5 densitats, 5 diàmetres i són llençades des de 5 profunditats diferents.

Per facilitar l'estudi i la comparació dels resultats hem definit 25 tipus de partícules, injectades des de les 5 posicions comentades anteriorment. A la *Taula 5* observem les partícules del FS.

[mm] - [kg/m <sup>3</sup> ]	930	955	965	975	990
0,1	Tipus 1	Tipus 2	Tipus 3	Tipus 4	Tipus 5
0,3	Tipus 6	Tipus 7	Tipus 8	Tipus 9	Tipus 10
5	Tipus 11	Tipus 12	Tipus 13	Tipus 14	Tipus 15
10	Tipus 16	Tipus 17	Tipus 18	Tipus 19	Tipus 20
100	Tipus 21	Tipus 22	Tipus 23	Tipus 24	Tipus 25

Taula 5: Partícules FS

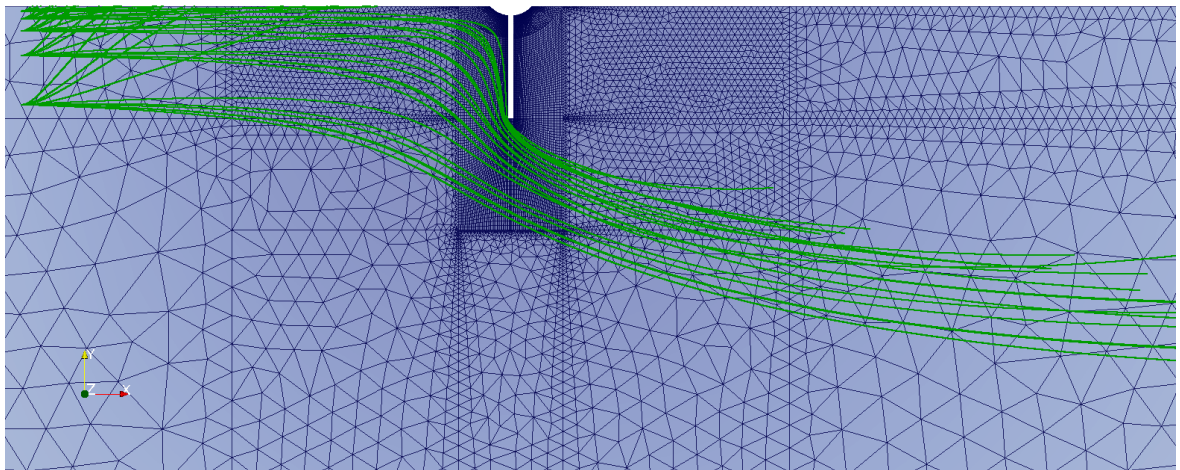
Com hem vist al capítol anterior, no podem fer servir directament aquestes dades.

[m] - [kg/m <sup>3</sup> ]	930	955	965	975	990
5,263x10 <sup>-6</sup>	Tipus 1	Tipus 2	Tipus 3	Tipus 4	Tipus 5
1,579x10 <sup>-5</sup>	Tipus 6	Tipus 7	Tipus 8	Tipus 9	Tipus 10
2,631x10 <sup>-4</sup>	Tipus 11	Tipus 12	Tipus 13	Tipus 14	Tipus 15
5,263x10 <sup>-4</sup>	Tipus 16	Tipus 17	Tipus 18	Tipus 19	Tipus 20
5,263x10 <sup>-3</sup>	Tipus 21	Tipus 22	Tipus 23	Tipus 24	Tipus 25

Taula 6: Partícules model ocean

Prèviament hem d'escalar-les al nostre model. Els 25 tipus de partícules que inclourem, expressades en el Sistema Internacional, són les següents:

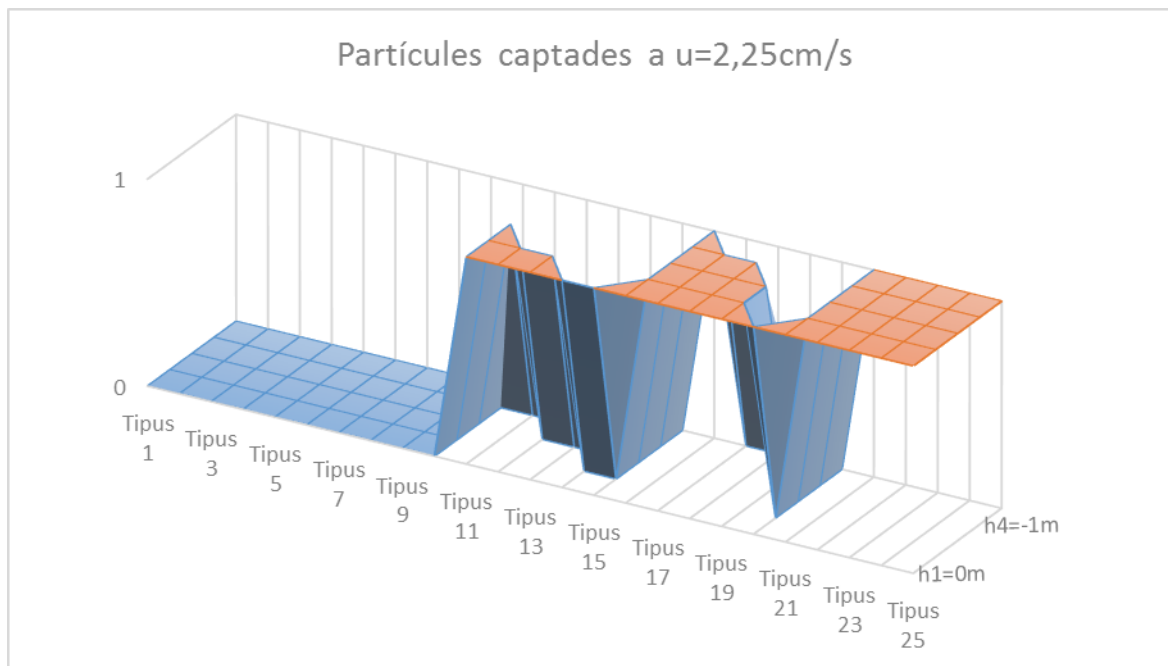
A la *imatge 21* podem veure, després de 15.000 iteracions amb Alya, la trajectòria de les diferents partícules en un camp de velocitats originat per una velocitat inicial de 10cm/s.



*Imatge 21: Trajectòria de les partícules visualitzada amb Paraview. Velocitat inicial v=10cm/s*

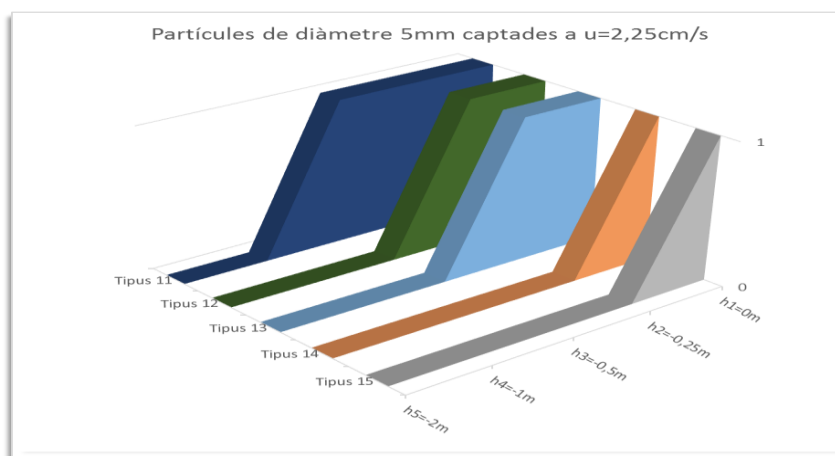
### 8.2.1. Velocitat $v_1=2,25\text{cm/s}$

En els següents gràfics il·lustrem les partícules captades per la barrera a la velocitat  $v_1=2,25\text{cm/s}$ . Cal recordar que el nostre model detecta com a capturades totes les partícules que toquen la barrera.



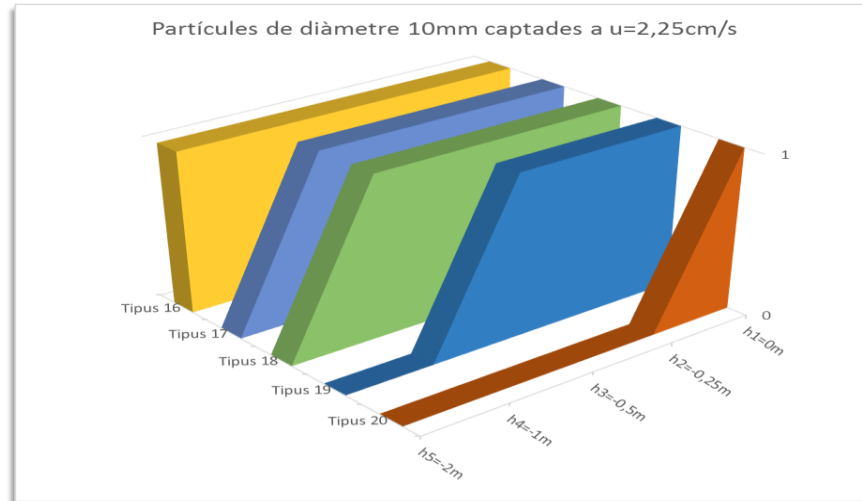
Gràfic 8: 25 tipus de partícules a  $v_1=2,25\text{cm/s}$

Observem que les partícules entre els tipus 1 i 10, és a dir, aquelles partícules amb un diàmetre menor a 5mm no són capturades. Per altra banda, totes les partícules amb diàmetre de 100mm són capturades. En els gràfics 6 i 7 observem que passa amb les partícules de diàmetre 5mm i 10 mm respectivament.



Gràfic 9: Partícules de diàmetre 5mm capturades a  $v=2,25\text{cm/s}$



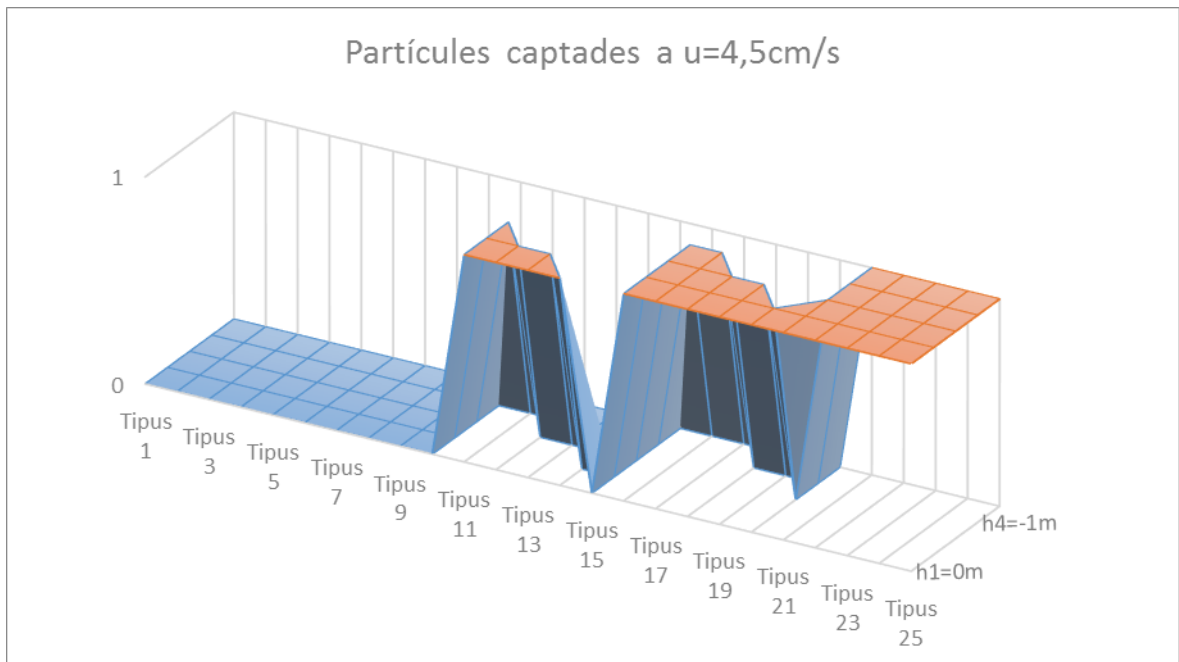


Gràfic 10: Partícules de diàmetre 10mm capturades a  $v=2,25\text{cm/s}$

Com era previsible, les partícules amb menor densitat i aquelles que s'han injectat més a prop de la superfície són capturades. Més endavant estudiarem la rellevància del diàmetre, la densitat i la profunditat d'injecció en la captura de les partícules.

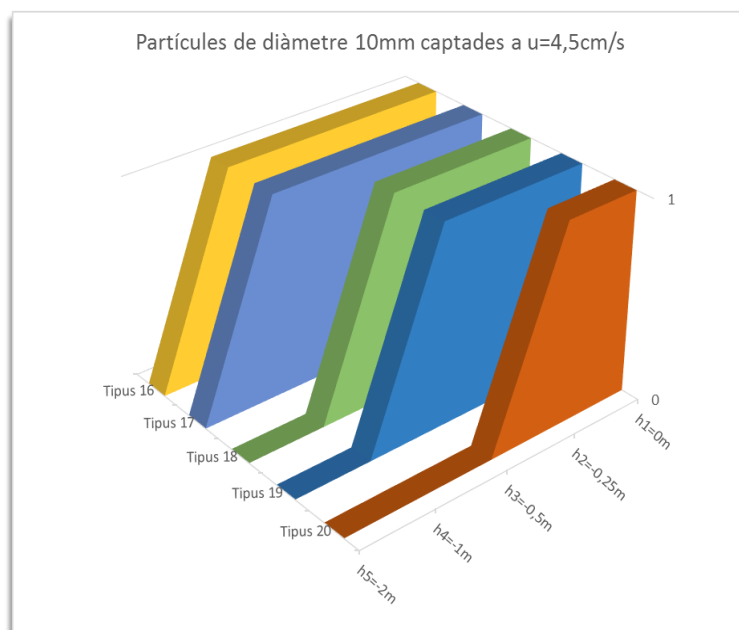
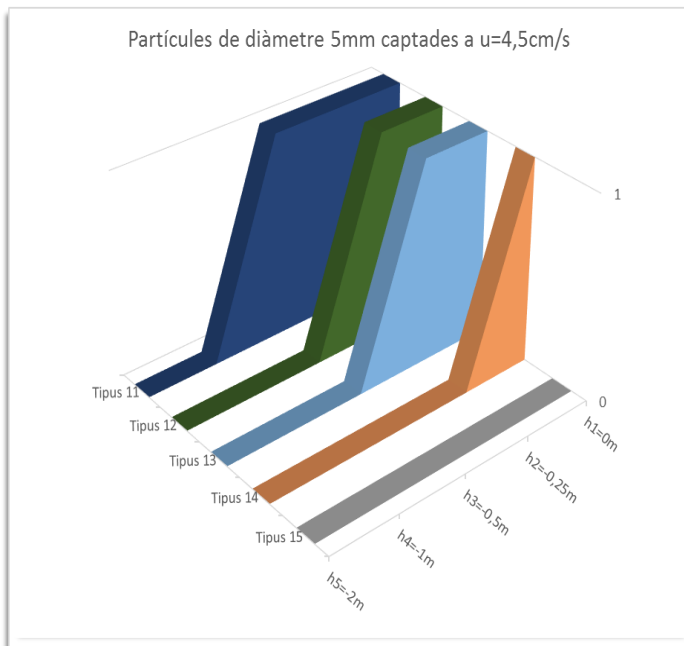
### 8.2.2. Velocitat $v_2=4,5\text{cm/s}$

Aquest cas no apareix al FS. Es realitza per que s'ha cregut rellevant estudiar la influència de la velocitat d'entrada en la captura de les partícules.



Gràfic 11: Partícules capturades a  $v_2=4,5\text{cm/s}$

El resultat obtingut és molt similar a l'anterior. Per aquest motiu també presentem la distribució de partícules entre els tipus 11 i 20.

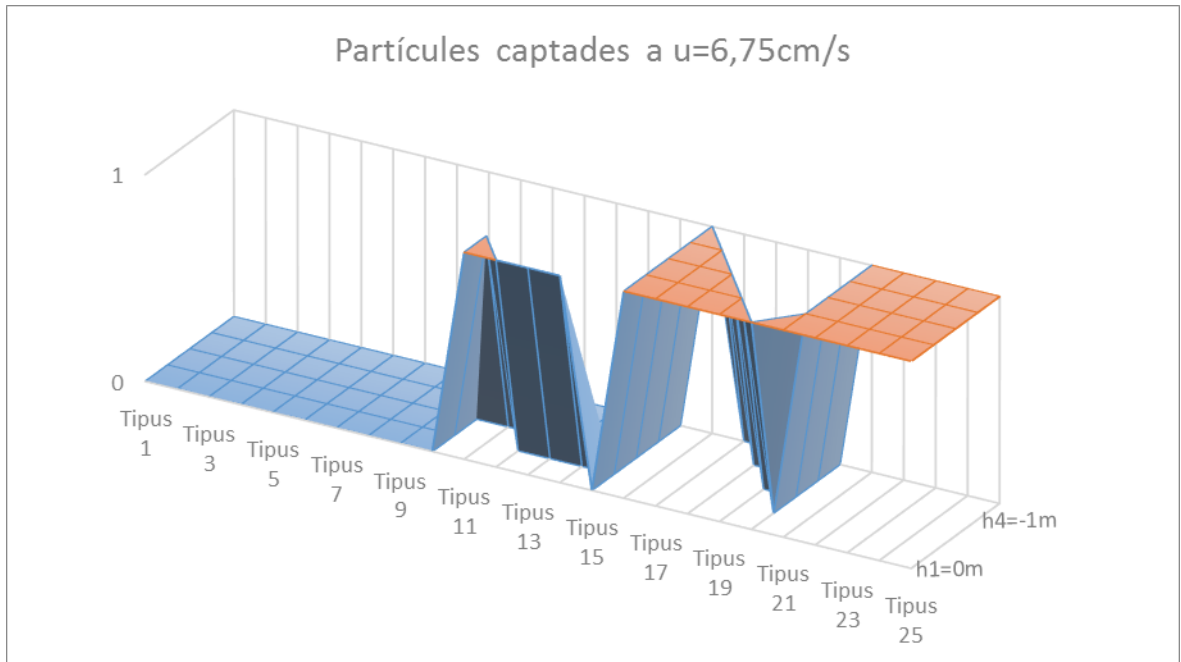


Gràfic 13: Partícules de diàmetre 5mm capturades a  $v=4,5\text{cm/s}$

Gràfic 12: Partícules de diàmetre 10mm capturades a  $v=4,5\text{cm/s}$

### 8.2.3. Velocitat $v_3=6,75\text{cm/s}$

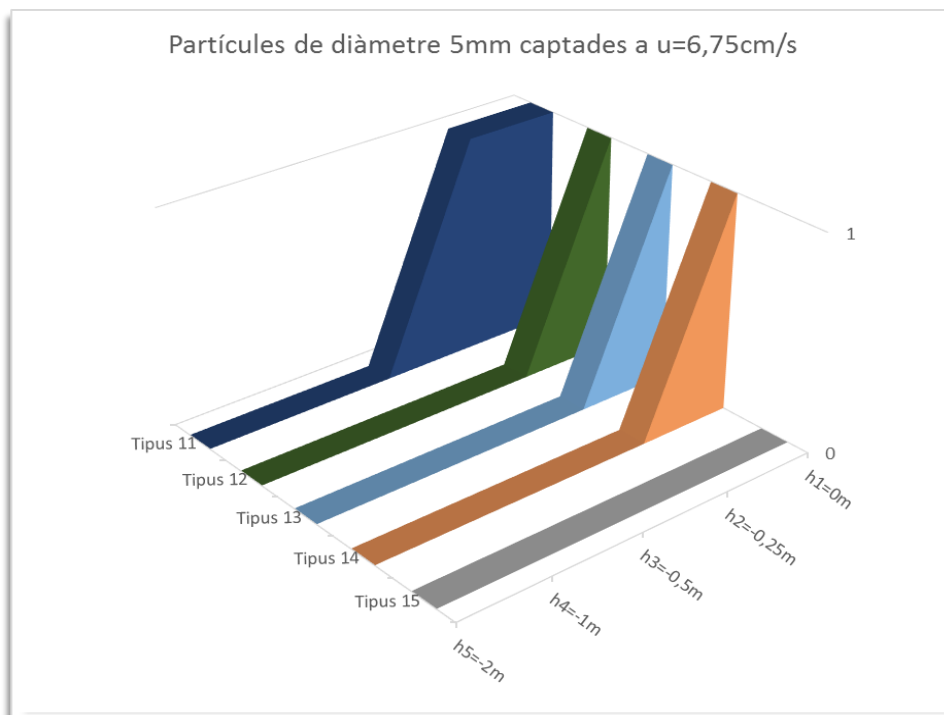
Els resultats obtinguts a la velocitat  $v_3=6,75\text{cm/s}$  són similars als obtinguts amb les altres 2 simulacions. Es detecta que conforme augmenta la velocitat de l'aigua menys partícules són capturades per la barrera.



Gràfic 14: Partícules capturades a  $v_3=6,75\text{cm/s}$

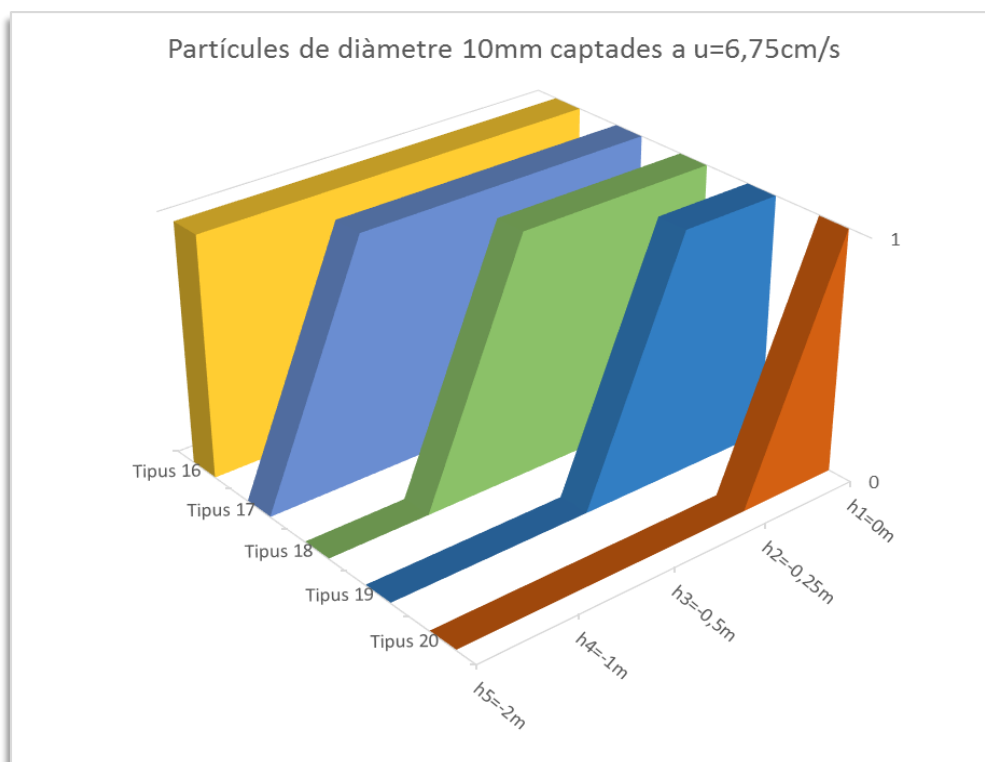
Com hem vist amb les dues simulacions anteriors, cap de les partícules entre els tipus 1 i 10 ha estat capturada. I, de la mateixa manera, totes les partícules de diàmetre 100mm, independentment de la densitat i la profunditat d'injecció, han estat capturades.

El que passa amb les partícules amb un diàmetre intermig ho veurem amb més detall als gràfics 12 i 13.



Gràfic 15: Partícules de diàmetre 5mm captades a  $v3=6,75\text{cm/s}$

Observem que de les 25 partícules de diàmetre 5mm només 5 han estat captades. Observem en aquest gràfic que la profunditat de la injecció afecta en gran mesura l'eficiència de la captura. Les partícules amb densitat més baixa són captades amb més facilitat.

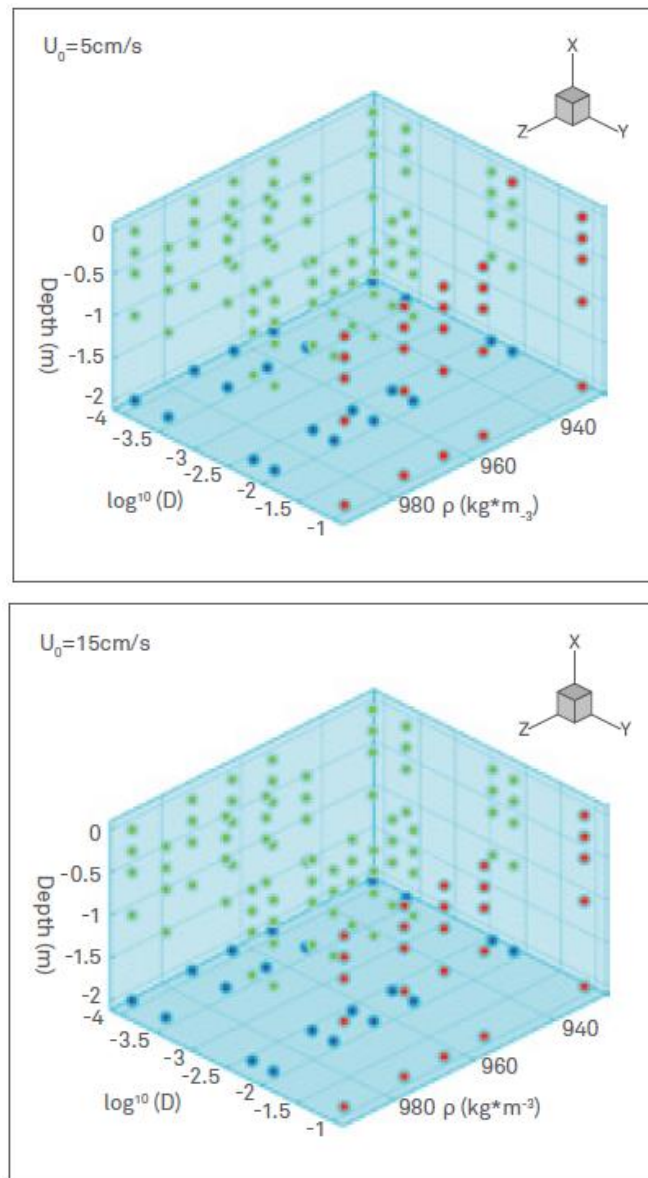


Gràfic 16: Partícules de diàmetre 10mm captades a  $v3=6,75\text{cm/s}$

Del gràfic 13 observem que la densitat pren més importància en la *funció captura* conforme s'incrementa el diàmetre de les partícules.

#### 8.2.4. Resultats Feasibility Study

Els resultats del Feasibility Study ens apareixen de forma gràfica en el *gràfic 14: Resultats Feasibility Study*.



Gràfic 17: Resultats FS per a  $v_1 = 5 \text{ cm/s}$  i  $v_2 = 15 \text{ cm/s}$

Com hem comentat anteriorment, al FS distingeixen entre 3 possibles resultats. En vermell apareixen les partícules atrapades, en verd les que han impactat contra la barrera i han marxat i en blau les que no han tocat.

Degut a la nostra definició del problema, per comprovar la validesa d'Alya, hem de considerar tant les partícules verdes com las vermelles com partícules atrapades.

Observem que, independentment de diàmetre i densitat, totes les partícules llençades entre 0 i -1m impacten contra la barrera, és a dir, haurien d'aparèixer com partícules atrapades al nostre model.

Malgrat aquestes discrepàncies, hi han moltes tendències que, tot i estar desplaçades, són comunes a tots 2 models:

- El diàmetre, en aquestes magnituds, és la variable que més influeix en la captura de les partícules
- Conforme augmentem el diàmetre de les partícules amb més facilitat són capturades. A partir d'un diàmetre crític totes les partícules són capturades, independentment de la profunditat de la injecció, de la densitat i de la velocitat de l'aigua.
- Com més profunda és la injecció de la partícula, més difícil resulta la seva captura. Cap partícula injectada a 2m de profunditat i amb un diàmetre inferior als 5mm impacta contra la barrera en cap dels dos models.
- Conforme augmentem la velocitat de l'aigua, menys partícules són capturades.

Per aprofundir en aquestes tendències, al següent subcapítol, estudiarem com afecten les diferents variables en l'eficiència de la barrera.

### 8.3. Influència de les variables en la captura de partícules

En l'estudi del Ocean CleanUp, després de la primera sèrie de simulacions, fan un seguit d'estudis per veure la transició entre partícules atrapades i no atrapades, fixant aquesta transició en les partícules de diàmetre  $D=10\text{mm}$ .

En el nostre model la transició és difusa. Per aquest motiu realitzarem les simulacions tant per les partícules amb diàmetre  $D=5\text{mm}$ , com per les partícules amb diàmetre  $D=10\text{mm}$ .

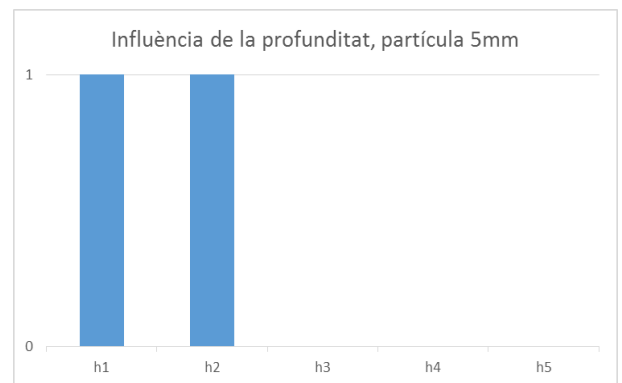
Totes les simulacions que es fan en aquest apartat s'han realitzat sobre camps de velocitats generats amb una velocitat inicial  $v_{\text{ocean}}=2,25\text{cm/s}$ . Els resultats de les simulacions del FS responen a una velocitat  $v_{\text{FS}}=5\text{cm/s}$ .

#### 8.3.1. Influència de la profunditat d'injecció

##### 8.3.1.1. Diàmetre 5mm, model ocean

Definim 1 nova partícula de  $\rho = 960\text{kg/m}^3$  i la injectem en les 5 posicions comentades anteriorment.

Observem els resultats en el *gràfic 15*.

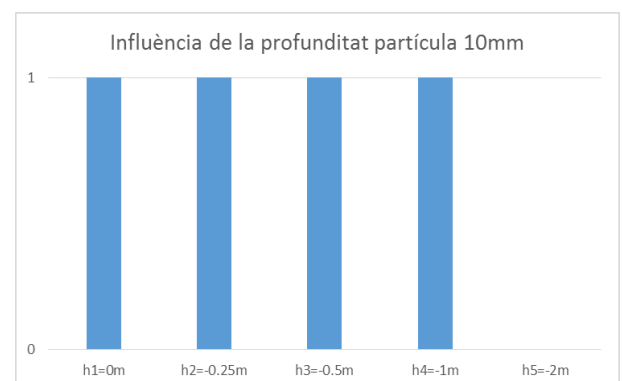


Gràfic 18: Influència de la profunditat en diàmetre 5mm

##### 8.3.1.2. Diàmetre 10mm, model ocean

Definim 1 nova partícula de  $\rho = 960\text{kg/m}^3$  i la injectem en les 5 posicions comentades anteriorment.

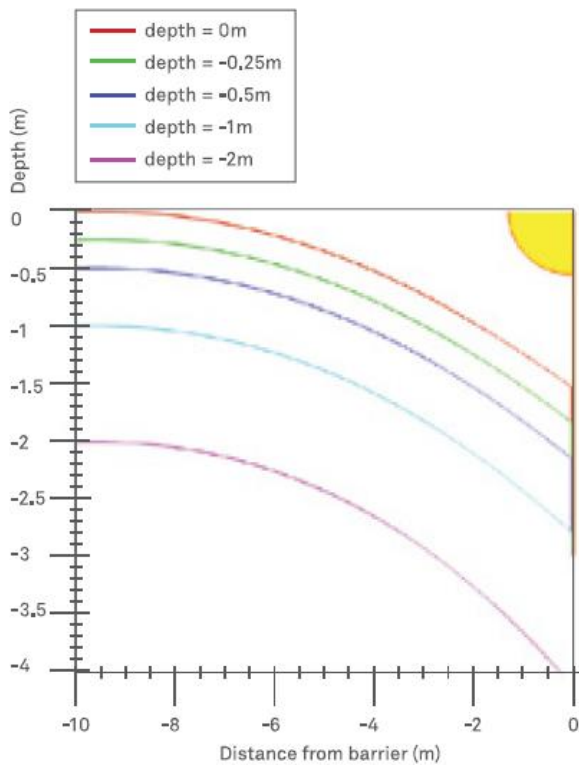
Observem els resultats en el *gràfic 16*



Gràfic 19: Influència de la profunditat en diàmetre 10mm

### 8.3.1.3. Resultats FS

Els resultats del FS els trobem, també, de forma gràfica. Observem que els resultats són els mateixos que pel model resolt amb Alya.



Les partícules de diàmetre 10mm i  $\rho=960\text{kg/m}^3$  en tots dos models actuen de la mateixa forma.

Les injectades des de menys de 2m toquen la barrera. Mentre que la partícula llençada des dels 2m passa per sota la mampara sense tocar-la.

Gràfic 20: Influència profunditat model FS

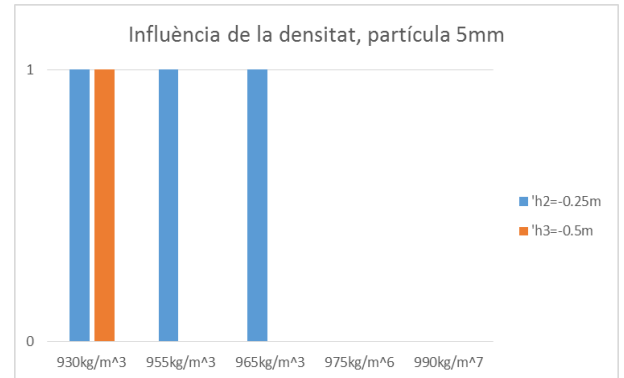


### 8.3.2. Influència de la densitat

#### 8.3.2.1. Resultats 5mm, model ocean

Recuperem les partícules dels tipus 11,12,13,14 i 15 definides a l'apartat 8.2 i les llencem des de les injeccions  $h_2=-0,25m$  i  $h_3=-0,5m$ .

Observem els resultats en el gràfic 18.

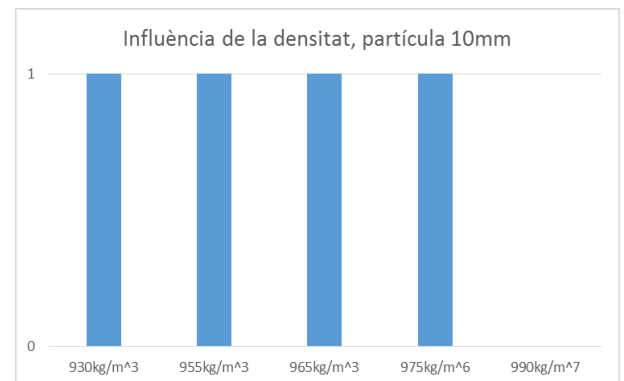


Gràfic 21: Influència de la densitat, partícula 5mm

#### 8.3.2.2. Resultats 10mm, model ocean

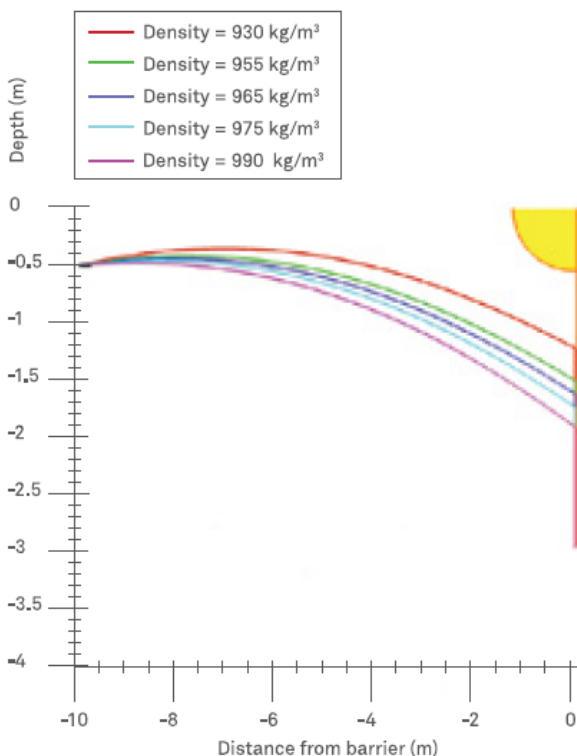
Recuperem les partícules dels tipus 16,17,18,19 i 20 definides a l'apartat 8.2 i les llencem des de la injecció  $h_3=-0,5m$ .

Observem els resultats en el gràfic 19.



Gràfic 22: Influència de la densitat, partícula 10mm

#### 8.3.2.3. Resultats FS



Gràfic 23: Influència densitat model FS

Els resultats obtinguts en l'estudi del FS mostren que totes les partícules, independentment del valor de las densitats definides, impacten en la barrera.

Observem que les simulacions realitzades amb el model ocean són molt semblants, cal remarcar que la partícula de tipus 20, amb  $\rho=990 \text{ kg/m}^3$ , no impacta amb la barrera.

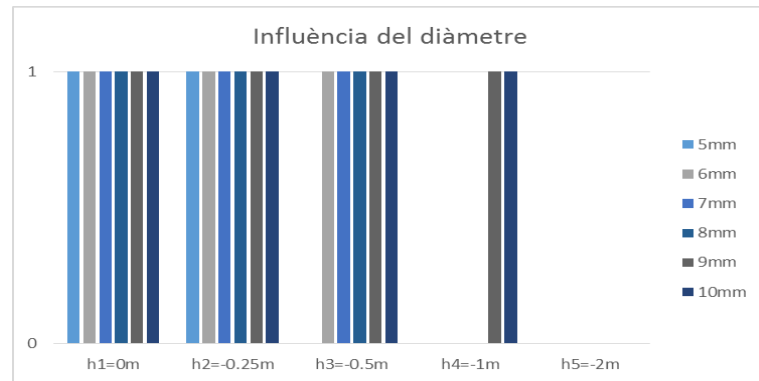
### 8.3.3. Influència del diàmetre

#### 8.3.3.1. Resultats 5mm, model ocean

Definim 6 partícules, de  $\rho=960\text{kg/m}^3$ , i les llencem des de les 5 injeccions definides anteriorment. Les partícules varien de mida de la següent forma:

	Escala real [mm]	Escala reduïda [mm]
D1	5	0,2632
D2	6	0,3158
D3	7	0,3684
D4	8	0,4211
D5	9	0,4737
D6	10	0,5263

Observem els resultats al *gràfic 21*.



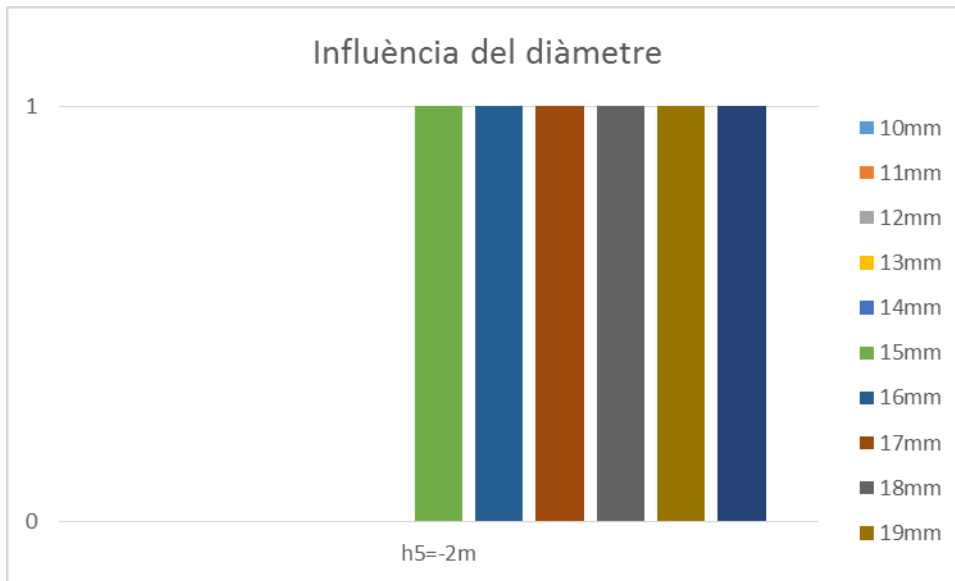
*Gràfic 24: Influència del diàmetre, 5mm*

#### 8.3.3.2. Resultats 10mm, model ocean

Definim 11 partícules, de  $\rho=960\text{kg/m}^3$ , i les llencem des de la injeccions  $h_5=-2\text{m}$ . Les partícules varien de mida de la següent forma:

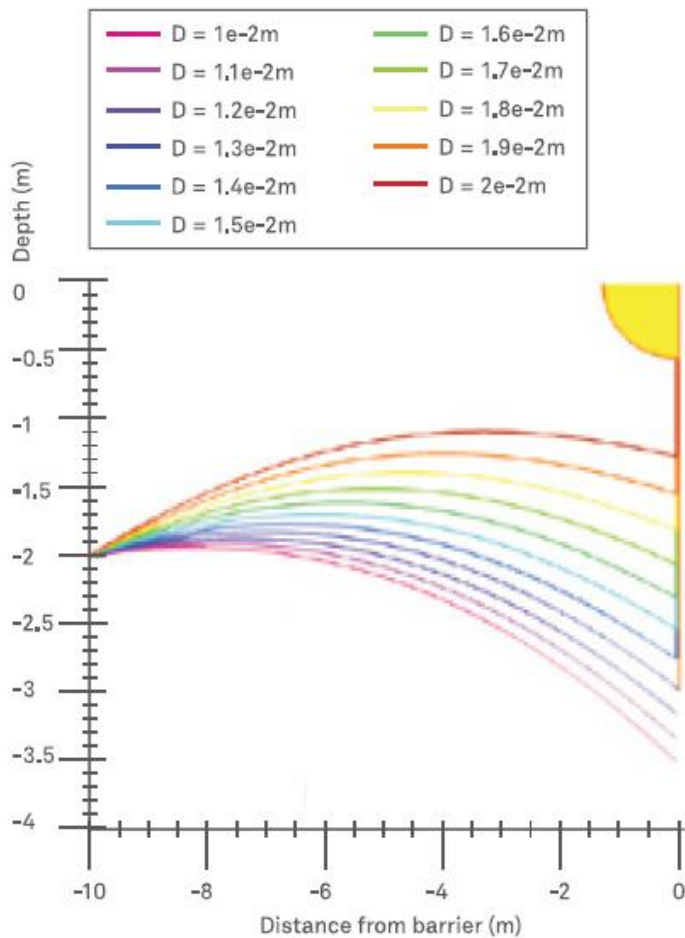
	Escala real [mm]	Escala reduïda [mm]
D1	10	0,5263
D2	11	0,5789
D3	12	0,6316
D4	13	0,6842
D5	14	0,7368
D6	15	0,7895
D7	16	0,8421
D8	17	0,8947
D9	18	0,9474
D10	19	1,0000
D11	20	1,0526

Els resultats els observem al *Gràfic 22*.



Gràfic 25: Influència del diàmetre, 10mm.

### 8.3.3.3. Resultats FS



Els resultats entre la simulació feta amb Alya i la solució que apareix al FS tornen a ser molt similars, tot i que no són idèntiques.

Observem que al Gràfic 22 les partícules menors als 15mm no apareixen, és a dir, no són captades.

Al Gràfic 23 veiem que al FS les partícules que no toquen la barrera són les menors de 13mm.

## 9. Pressupost

El cost d'aquest projecte recau en diferents factors: els cost de la simulació, el sou del personal, el cost del hardware i del transport.

Per estimar un cost de la simulació s'ha consultat al personal del BSC. S'ha arribat a la següent consideració:

Preu d'1 CPU activa durant 1h,  $\text{Preu}_{\text{CPU/h}}=0,10\text{€}$

En aquest preu està inclosa la despesa energètica i el cost de manteniment. Durant aquest projecte s'han realitzat diverses simulacions amb 8 CPUs i durant un temps acumulat de 4h aproximadament. El que suposa un cost de 3,20€.

Per calcular el sou d'un enginyer s'ha consultat la taula salarial de CCOO corresponent al conveni de la siderometalúrgia<sup>[14]</sup> que fixa el sou d'un enginyer en 23.015,69€ anuals, que correspon a 1.643,98€ mensuals per una jornada de 40h setmanals.

L'autor d'aquesta memòria ha estimat en 15h setmanals durant 5 mesos el temps emprat en aquest projecte. El salari acumulat suposa un cost de 3082,46€.

Altres factors ha tenir en compte són el transport, 15€ setmanals, i el cost del ordinador, que s'ha valorat en 80€. A la següent taula observem les despeses desglossades:

Concepte	Cost
Simulació	3,20 €
Salari enginyer	616,49 €
Hardware	80 €
Transport	300 €
<b>Total</b>	<b>999,69 €</b>

Taula 7: Pressupost

Degut a les simplifacions del model utilitzat i el reduït nombre d'elements els costos de simulació són molt menyspreables. Si es fes un pressupost de la simulació 3D el cost augmentaria en varis ordres de magnitud.

Actualment s'estan fent proves del model *ocean* en 3D. Aquestes simulacions tenen una durada de 15 segons i el domini és de 5 metres. El nombre d'elements d'aquest model és

aproximadament de 2 milions. Per córrer utilitza 200CPUs durant 4 hores.

El domini del model 3D final s'extén per 5km, és a dir, 1.000 vegades més gran. Això suposaria una malla de 2.000.000.000 d'elements, aproximadament, 20.000 CPUs. Suposant 100h de càlculs, el cost de la simulació seria de 200.000€.

## 10. Impacte ambiental

Per la realització de l'estudi ambiental ens hem centrat en el treball realitzat durant aquests mesos, és a dir, en les simulacions presentades en aquesta memòria.

Per la realització d'aquest treball s'ha fet servir un ordinador, per tant s'ha de tenir en compte tant el seu consum energètic, com la possibilitat de que alguns dels seus components es deteriorin i s'hagin de substituir. D'altre banda, s'ha de tenir en compte la gran potència que utilitza *Marenostrum* que és de l'ordre d'1MW<sup>[15]</sup>. El consum elèctric del supercomputador equival al consum de 2.500 llars familiars<sup>[16]</sup>. Cal remarcar que, degut a les dimensions del model simulat, s'ha emprat un 0,016% de la capacitat de *MareNostrum* en aquest estudi.

## 11. Treball Futur

Com es comentava a la introducció aquesta memòria conforma un primer pas per desenvolupar un model 3D que simuli la recollida de partícules de plàstic mitjançant el model dissenyat per la fundació *The Ocean CleanUp*.

Com és evident, queda molta feina per endavant. Alguns dels aspectes més rellevants per consolidar el model 2D són:

- Introducció de la fricció entre las partícules i la barrera.
- Desenvolupar el mòdul *partis* per tal que les col·lisions i l'acumulació de partícules davant la barrera es tinguin en compte.
- Implementar l'efecte de les onades en el mòdul *Nastin*.
- Introduir en l'estudi els efectes ocasionats pel vent.
- Estimar els efectes vinculats al canvi d'escala.
- Estudiar diferents models de turbulència (k-omega, SST, etc.) i veure com afecten als resultats.
- Realitzar un estudi d'optimització per tal de reduir al màxim el nombre d'iteracions necessari per arribar a la convergència de la solució.

Una vegada assolits tots aquests reptes estarem en condicions de introduir les 3 dimensions en el nostre model.

## Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte consistia en verificar la capacitat d'*Alya* de resoldre el problema proposat per la fundació *The Ocean CleanUp*. Després d'observar els resultats presentats al capítol 8 hem extret les següents indicacions:

- El canvi en la geometria del problema ha dificultat en gran mesura la comparació directa de resultats.
- L'estudi centrat en les partícules de 10mm presenta resultats molt semblants.
- El pes de les variables en la *funció captura* segueix una tendència similar en tots dos models

Per aquests motius la conclusió que extraiem d'aquest treball és la següent:

El codi *Alya* és vàlid per resoldre el problema en 2D, la discrepància en els resultats és la conseqüència de les diferències en la geometria. Per la implementació de les necessitats expressades al *capítol 9* caldrà un desenvolupament del codi.

En quant l'objectiu d'estimar l'eficiència en la captura de plàstics del prototip, tant un model com l'altre, presenten un diàmetre crític per sota del qual no es captura cap partícula. Aquest diàmetre crític està situat en torn els 2mm segons el FS, i en els 5mm segons el nostre model.



## Agraïments

Voldria agrair al professor Emilio Hernández per confiar en mi per aquest projecte.

També voldria agrair profundament a la Beatriz Eguzkita per fer-me l'entrada al BSC el més fàcil possible i que sempre tingués un moment per ajudar-me. Sense ella, el resultat d'aquest projecte hagués estat impossible

## 12. Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] BOYAN SLAT, *How the oceans can clean themselves. A Feasibility Study* Delft: 2014.
- [2] TIMON SINGH, *Interview: Boyan Slat, Teenage inventor of the Ocean Cleanup Array*, 2014
- [3] BOYAN SLAT, *How the oceans can clean themselves*. TEDxDelft [Video]\*, 2012  
<https://www.youtube.com/watch?v=ROW9F-c0kIQ>
- [4] STATISTA, *Global production of plastics since 1950*, 2013
- [5] Miriam J. Doyle a, William Watson b , Noelle M. Bowlin b , Seba B. Sheavly, *Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean*, 2010.
- [6] J. MOORE, *Algalita* [pàgina web]
- [7] MARK BULL, PRACE, *Unified European Applications Benchmark Suite*, 2013
- [8] GUILLAUME HOUZEAUX, *The Alya System – Large Scale Computational Mechanics*, 2015.
- [9] C.GHERARDELLI, *Análisi Dimensional y Semejanza*. Universidad de Chile.
- [10] XAVIER ESCALER, *Introduction to turbulence*, ETSEIB UPC, Computational Fluid Dynamics, 2016.
- [11] WILLEM VAN SCHOTEN, *Calibration numerical models with deltares test results*, 2015.
- [12] T. Kukulka, G. Proskurowski, S. Morét-Ferguson, D. W. Meyer, i K. L. Law, *The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris*, 2012
- [13] EDGAR OLIVARES I MAÑAS, GUILLAUME HOUZEAUX, *Lagrangian Particles Transport Algorithm*, Barcelona Supercomputing Center, Spain, 2016

[14] CCOO, *Tablas salariales convenio siderometalúrgico*, Tarragona, 2014

[15] JAVIER BARTOLOMÉ. *MareNostrum 3*, BSC, 2013.

## 12.1. Bibliografia complementària

Teoria de CFD:

- Wilcox, David C., *Turbulence modeling for CFD*, 2010
- [www.cfd-online.com/Wiki/Main\\_Page](http://www.cfd-online.com/Wiki/Main_Page)

Tutorial de Paraview:

- Kenneth Moreland, *The ParaView Tutorial, version 4.2*,

Tutorials d'Alya:

- Running an openALYA case:  
[http://bsccase02.bsc.es/alya/tutorial/running\\_an\\_openAlya\\_case.html](http://bsccase02.bsc.es/alya/tutorial/running_an_openAlya_case.html)
- OpenALYA cases tutorials page:  
<http://bsccase02.bsc.es/alya/tutorial/problems.html>
- How to partition large meshes in files with OpenAlya:  
<http://bsccase02.bsc.es/alya/tutorial/partitions.html>
- How to create and visualize traces with Paraver in Alya at Marenostrum III  
<http://bsccase02.bsc.es/alya/tutorial/paraver.html>