



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Mecànica**

**MODELITZACIÓ D'UN BANC D'ASSAIG D'IMPACTE D'UN  
DOLL**



**Memòria i Annexos**

**Autor:** Oriol Rodríguez  
**Director:** Dr. Alfred Fontanals  
**Convocatòria:** Gener 2023



## Resum

El present document consisteix en l'estudi d'un banc d'assaig d'impacte d'un doll d'aigua, el qual compleix la funcionalitat com a equip experimental de pràctiques de mecànica de fluids a l'EEBE. El treball està compost per dos grans blocs: l'obtenció de les dades experimentals, amb els respectius valors teòrics; i la simulació (*Computational Fluid Dynamics*) mitjançant el software Ansys Fluent, a partir de les mateixes dades adquirides. Per la realització d'aquest document, s'han introduït conceptes teòrics relacionats amb la dinàmica de fluids rellevants que influeixen d'alguna manera en l'estudi. Un cop tancats aquests blocs i descrits els fenòmens observats, s'ha fet una valoració de l'eficàcia dels resultats finals i explicat el motiu pel qual s'observen algunes diferències entre aquests. Per últim, s'ha mesurat l'efecte mediambiental de l'estudi en termes de consums energètics i s'ha fet un pressupost general dels costos del treball. Cal destacar, també, que es presenten uns annexos en els quals es troba formulació matemàtica complementària d'algun dels conceptes teòrics del treball, especificacions de l'equip experimental indicades pel fabricant, i un recull d'imatges del conjunt de les simulacions.

## Resumen

El presente documento consiste en el estudio de un banco de ensayo de impacto de un chorro de agua, que cumple la funcionalidad como equipo experimental de prácticas de mecánica de fluidos en la EEBE. El trabajo está compuesto por dos grandes bloques: la obtención de los datos experimentales, con sus respectivos valores teóricos; y la simulación (*Computational Fluid Dynamics*) mediante el software Ansys Fluent, a partir de los mismos datos adquiridos. Para la realización de este documento, se han introducido conceptos teóricos relacionados con la dinámica de fluidos relevantes que influyen de algún modo en el estudio. Una vez cerrados estos bloques y descritos los fenómenos observados, se ha realizado una valoración de la eficacia de los resultados finales y explicado el motivo por el que se observan algunas diferencias entre ellos. Por último, se ha medido el efecto medioambiental del estudio en términos de consumos energéticos y se ha realizado un presupuesto general de los costes del trabajo. Cabe destacar, también, que se presentan unos anexos en los que se encuentra formulación matemática complementaria de alguno de los conceptos teóricos del trabajo, especificaciones del equipo experimental indicadas por el fabricante, y una recopilación de imágenes del conjunto de las simulaciones.

## Abstract

This document consists of the study of a water jet impact test bench, which functions as experimental equipment for fluid mechanics practices at the EEBE. The work is composed of two large blocks: obtaining experimental data, and their respective theoretical values; and simulation (*Computational Fluid Dynamics*) using the Ansys Fluent software, based on the same data acquired. For the realization of this document, theoretical concepts related to relevant fluid dynamics have been introduced that somehow influence the study. Once these blocks have been closed and the observed phenomena have been described, an evaluation of the efficacy of the final results has been carried out and the reason why some differences between them are observed has been explained. Finally, the environmental effect of the study has been measured in terms of energy consumption and a general budget of the work costs has been made. It should also be noted that some annexes are presented in which there is a complementary mathematical formulation of some of the theoretical concepts of the work, specifications of the experimental equipment indicated by the manufacturer, and a compilation of images of the set of simulations.



## Agraïments

En primer lloc m'agradaria donar les gràcies al Dr. Alfred Fontanals, pel seu ajut, planificació i seguiment de la feina realitzada setmana a setmana en l'elaboració d'aquest TFG.

També voldria agrair la comprensió dels meus familiars i amics en els moments més complicats del treball, i donar-me força per seguir endavant.

Per últim, no voldria oblidar-me l'equip docent de l'EEBE que, gràcies a la formació i els coneixement que he pogut adquirir en aquests anys d'estudiant, han aportat una part en aquest treball.







# Índex

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUM</b>                                      | <b>I</b>   |
| <b>RESUMEN</b>                                    | <b>II</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>                                   | <b>III</b> |
| <b>AGRAÏMENTS</b>                                 | <b>V</b>   |
| <b>1. PREFACI</b>                                 | <b>1</b>   |
| 1.1. Origen del treball .....                     | 1          |
| 1.2. Motivació .....                              | 1          |
| 1.3. Requeriments previs .....                    | 1          |
| <b>2. INTRODUCCIÓ</b>                             | <b>3</b>   |
| 2.1. Objectius del treball .....                  | 3          |
| 2.2. Abast del treball .....                      | 3          |
| <b>3. CONTEXT TEÒRIC</b>                          | <b>5</b>   |
| 3.1. Equacions de conservació .....               | 5          |
| 3.1.1. Elements i propietats del fluid .....      | 5          |
| 3.1.2. Balanç de massa .....                      | 5          |
| 3.1.3. Conservació de moment .....                | 6          |
| 3.1.4. Equacions de Navier-Stokes .....           | 6          |
| 3.2. Condicions de contorn .....                  | 7          |
| 3.2.1. Entrades i sortides .....                  | 7          |
| 3.2.2. Límits de paret .....                      | 7          |
| 3.2.3. Zona de fluid .....                        | 7          |
| 3.3. Capes límit .....                            | 8          |
| 3.3.1. Força de resistència .....                 | 8          |
| 3.3.2. Capa límit viscosa .....                   | 8          |
| 3.4. Models de turbulència .....                  | 9          |
| 3.5. Fluids multifàsics .....                     | 10         |
| <b>4. EXPERIMENTACIÓ</b>                          | <b>11</b>  |
| 4.1. Característiques del banc d'assaig .....     | 11         |
| 4.1.1. Material i equips .....                    | 11         |
| 4.1.2. Dades del banc d'assaig i geometries ..... | 13         |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.      | Procediment experimental.....                | 14        |
| 4.3.      | Resultats de l'assaig.....                   | 16        |
| 4.3.1.    | Valor teòric de la força d'impulsió.....     | 16        |
| 4.3.2.    | Gràfics.....                                 | 19        |
| 4.4.      | Repetició de l'assaig.....                   | 21        |
| 4.4.1.    | Taules de resultats.....                     | 22        |
| 4.4.2.    | Estudi d'errors.....                         | 23        |
| 4.4.3.    | Gràfics.....                                 | 26        |
| <b>5.</b> | <b>SIMULACIÓ</b> .....                       | <b>29</b> |
| 5.1.      | Eina de càlcul.....                          | 29        |
| 5.2.      | Procediment.....                             | 29        |
| 5.2.1.    | Ansys Workbench.....                         | 29        |
| 5.2.2.    | Disseny de les geometries.....               | 30        |
| 5.2.3.    | Ansys Fluent.....                            | 32        |
| 5.2.4.    | Estudi de convergència de malla.....         | 33        |
| 5.2.5.    | Aplicació de capa límit.....                 | 35        |
| 5.2.6.    | Estudi del model de turbulència.....         | 37        |
| 5.3.      | Resultats de la simulació.....               | 38        |
| 5.3.1.    | Taules de resultats.....                     | 38        |
| 5.3.2.    | Gràfics.....                                 | 39        |
| 5.3.3.    | Volum d'aigua al sistema.....                | 41        |
| 5.3.4.    | Velocitat dels fluids.....                   | 43        |
| <b>6.</b> | <b>ANÀLISI DE RESULTATS</b> .....            | <b>45</b> |
| <b>7.</b> | <b>ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL</b> .....  | <b>47</b> |
| 7.1.      | Consum energètic experimentació.....         | 47        |
| 7.1.1.    | Laboratori.....                              | 47        |
| 7.1.2.    | Banc d'assaig.....                           | 47        |
| 7.2.      | Consum energètic simulació.....              | 47        |
| 7.3.      | Possibles contratemps.....                   | 48        |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONS</b> .....                     | <b>49</b> |
| <b>9.</b> | <b>PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMIC</b> ..... | <b>51</b> |
| 9.1.      | Costos d'enginyeria.....                     | 51        |
| 9.2.      | Lloguer d'espais i equip experimental.....   | 51        |
| 9.3.      | Costos de software.....                      | 52        |

|  |           |
|--|-----------|
| 9.4. Pressupost final .....  | 52        |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>ANNEX A. FORMULACIÓ DELS MODELS DE TURBULÈNCIA</b> .....                                      | <b>54</b> |
| A1. Model Spalart-Allmaras .....   | 54        |
| A2. Model SST k- $\omega$ .....  | 55        |
| A3. Model SST k- $\epsilon$ Standard .....   | 56        |
| A4. Model SST k- $\epsilon$ Realizable .....   | 57        |
| <b>ANNEX B. ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES BANC D'ASSAIG</b> .....                                    | <b>58</b> |
| B1. Especificacions GUNT HM 150.08 .....   | 58        |
| B2. Especificacions tècniques ISOIL MS 501 .....   | 58        |
| <b>ANNEX C. IMATGES DE RESULTATS DE LA SIMULACIÓ</b> .....                                       | <b>60</b> |
| C1. Placa plana. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats... 60      |           |
| C2. Copa cònica. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats. 62        |           |
| C3. Copa hemisfèrica. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats. .... | 64        |



# 1. Prefaci

En l'actualitat, les simulacions CFD tenen un important paper al sector industrial, ja que permet predir resultats de diferents magnituds mitjançant mètodes numèrics, estalviant així una gran quantitat de costos. Algunes de les funcionalitats més importants d'aquest tipus de simulacions són: la realització d'estudis conceptuals de nou dissenys, el desenvolupament de productes amb detall, la resolució de problemes i el redisseny.

## 1.1. Origen del treball

Des del departament de mecànica de fluids de l'EEBE s'ha proposat analitzar el funcionament dels equips de laboratori, on s'executen les pràctiques d'algunes assignatures del grau. S'ha decidit observar el comportament del banc d'assaig d'impacte d'un doll d'aigua, degut a la relativa senzillesa de disseny per dur a terme les simulacions i les dades a extreure.

## 1.2. Motivació

Des d'un inici, he tingut molt interès pels fenòmens fluids i com es comportaven diferents objectes, vehicles, etc. al pas de fluid. En la cerca d'aplicacions, quan va ser proposat el treball, vaig començar a trobar aplicacions que em van semblar molt interessants pel que respecte les simulacions CFD, ja que desconeixia aquesta metodologia.

## 1.3. Requeriments previs

Per poder dur a terme l'anàlisi, ha estat necessari la descàrrega del programari Ansys. Amb l'objectiu de familiaritzar-se amb el software, s'han realitzat alguns tutorials expedits per la Cornell University, els quals han ajudat a comprendre conceptes necessaris a l'hora d'introduir dades abans d'executar els càlculs i les equacions que es resolen.



## 2. Introducció

L'estudi que es presenta tracta d'analitzar, amb valors numèrics, com es comporten els fluids en un assaig d'impacte d'un doll d'aigua sobre àleps de diferents geometries, i quin efecte causen sobre la força de sustentació en aquest impacte. El treball es resumeix en la part experimental, on s'adquireixen les dades de forma empírica, i la part computacional, on a través dels càlculs efectuats en la simulació s'extreuen els resultats de la força sobre els àleps.

### 2.1. Objectius del treball

L'objectiu principal del treball és extreure una comparativa entre els resultats de força d'impacte del doll d'aigua empírics, teòrics i mitjançant la simulació, per tal d'observar quins errors apareixen en les dades i de quina manera poden ser reduïts. També, es pretén observar l'efecte de la forma del àlep en quant a la força que exerceix el doll contra la geometria, a partir d'un valor comú de caudal i velocitat de l'aigua. Un altre objectiu que es planteja és esbrinar la procedència dels hipotètics defectes en els equips d'assaig, a través d'un estudi d'errors. Finalment, es vol aconseguir aproximar, amb el mínim error en els resultats, la simulació a la situació real, utilitzant diferents procediments que redueixin aquesta diferència.

### 2.2. Abast del treball

El treball es focalitza en l'extracció de les dades de força d'impacte, cabal i velocitat dels fluids principalment. S'ha seguit un procediment experimental, el qual ha donat lloc a valors teòrics del problema i una simulació utilitzant mètodes numèrics. S'han descrit els fenòmens fluids que han tingut rellevància en la situació del problema, per tant, no s'ha tingut en compte transferències de calor, una de les aplicacions que tenen les simulacions CFD, ja que no són d'interès en aquest cas.





### 3. Context teòric

Per entendre el conjunt de fenòmens que es donen en problemes relacionats amb la dinàmica de fluids, s'ha redactat aquest capítol que avarca la física subjacent del problema que s'estudia i com és aplicada en simulacions CFD.

#### 3.1. Equacions de conservació

Les equacions de conservació són aquelles on una propietat física es manté a nivell global d'un sistema, però es produeix un canvi o transferència d'aquesta propietat entre els elements interns dels quals es compona. Abans de tractar les equacions rectores, és necessària una breu descripció de les diferents característiques que són rellevants en un fluid.

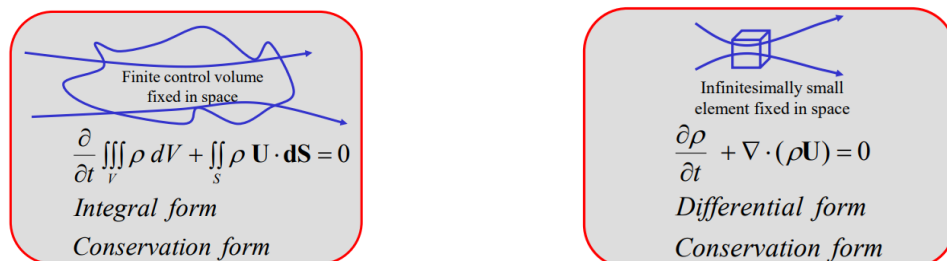
##### 3.1.1. Elements i propietats del fluid

La primera propietat a comentar respecte el problema és el tractament dels fluids com a Eulerians, és a dir, la variabilitat que experimenta un element fixat a l'espai, en comptes de seguir cadascuna de les partícules individualment.

El comportament del fluid és descrit per les propietats de velocitat ( $u$ ), pressió ( $p$ ), densitat ( $\rho$ ) i energia ( $E$ ). Aquests elements són els que componen les equacions de conservació que es descriuen als apartats Balanç de massa 3.1.2, 3.1.3 i 3.1.4.

##### 3.1.2. Balanç de massa

El balanç de massa o equació de continuïtat, descriu que la taxa d'augment de la massa en l'element fluid és igual a la taxa neta de flux de massa a l'element. Aquest balanç pot ser aplicat en forma integral per volums de control, o diferencial en format infinitesimal.



**Figura 3.1.** Formes de l'Equació de continuïtat. A l'esquerra, en forma integral per un volum de control fixat a l'espai. A la dreta en forma diferencial per elements infinitesimals (Font: André Bakker, 2008)

### 3.1.3. Conservació de moment

L'equació de conservació de moment prové de la Segona llei de Newton ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ). Les força neta que actua és la resultant de les anomenades tensions viscoses, les quals es mostren a la Figura 3.2 per un cos tridimensional.

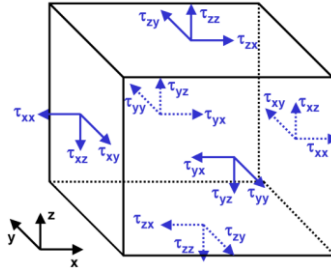


Figura 3.2. Tensions viscoses que actuen sobre un cos infinitesimal (Font: André Bakker, 2008)

En general, les equacions de moment s'expressen per cadascuna de les direccions com:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

On,  $p$  representa la tensió de compressió,  $\tau_{ii}$  és l'esforç de tracció i  $S_{Mi}$  el sumatori de les forces externes.

### 3.1.4. Equacions de Navier-Stokes

A partir de les lleis de conservació prèvies, s'obté les equacions de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

## 3.2. Condicions de contorn

A l'hora de resoldre les equacions de Navier-Stokes i l'equació de continuïtat, és necessari indicar en el software de simulació unes condicions inicials de contorn concretes, per tal de poder realitzar el càlcul.

### 3.2.1. Entrades i sortides

Les entrades o sortides d'un volum de control aplicat a la simulació CFD es troben limitades per dos paràmetres: velocitat i pressió. Les entrades de pressió, segons el fluid sigui incompressible o compressible, defineix la pressió respectivament com:

$$p_{total} = p_{estàtica} + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$p_{total} = p_{estàtica} + \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

On,  $k$  és la taxa de calor específic  $\left(\frac{c_p}{c_v}\right)$  i  $M$  representa el nombre de Mach.

Les pressions a la sortida, en canvi, consisteixen en la pressió estàtica, al medi on tenen lloc els escapaments.

Quan es tracta d'una entrada de fluid incompressible, com aigua, l'ús de entrades de velocitat són molt habituals, ja que, únicament es requereix el valor escalar de la velocitat.

### 3.2.2. Límits de paret

El límit de paret s'aplica principalment per indicar la condició de no lliscament sobre una superfície, és a dir, en quina zona el fluid és igual a la velocitat de la paret i la component normal de la velocitat s'anul·la.

### 3.2.3. Zona de fluid

La zona de fluid consisteix en el grup de cel·les on té lloc la resolució de les equacions, les quals es troben delimitades per la resta d'entrades i sortides.

### 3.3. Capes límit

#### 3.3.1. Força de resistència

La força de resistència o drag force és aquella força que un fluid exerceix sobre un objecte degut a la pressió i les forces viscoses. Segons la component sobre la que tenen efecte, es distingeix entre resistència i sustentació. La magnitud d'aquestes forces depèn de la forma que prengui el flux al voltant del cos i per tant de la forma del cos, de les condicions del flux i de la posició relativa del cos respecte el flux (l'angle d'atac).

#### 3.3.2. Capa límit viscosa

Es denomina capa límit a la regió al voltant d'un cos en la qual els efectes viscous ( $\tau$ ) no són menyspreables. Les partícules fluides, tal i com s'ha comentat a l'apartat 3.2.2, en contacte amb un cos tenen la mateixa velocitat del cos. Això indica que hi ha una diferència de velocitats entre el contorn del cos i el flux lliure lluny del cos. Fora de la capa límit es pot considerar el flux com a ideal.

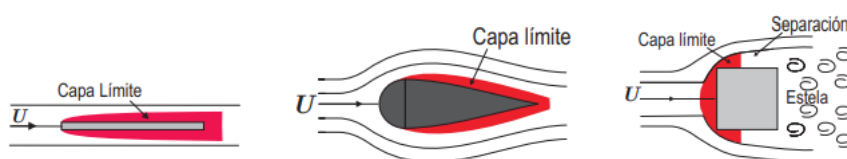


Figura 3.3. Interacció del fluid amb diferents cossos (Font: C. Gherardelli, Universidad de Chile)

La determinació del gruix d'aquesta capa límit prové de les equacions de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Es dedueix la solució exacta del perfil de velocitats:

$$U = U_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{y}{2\sqrt{\nu t}} \right) \right) \quad (\text{Eq. 3.20})$$

On  $\operatorname{erf}$  és l'error de la funció, definit com:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Dit això, es pot aproximar la capa límit com:

$$\frac{U_0}{t} \approx v \frac{U_0}{\delta^2} ; \delta \approx \sqrt{\nu t} \quad (\text{Eq. 3.42})$$

### 3.4. Models de turbulència

Els models de turbulències són equacions de transport semiempírica que modelen el mesclat i la difusió, que s'incrementen a causa de remolins turbulents, els quals són funció de la viscositat del fluid i de la viscositat turbulenta, entre altres variables. Els models de turbulència clàssics basats en les equacions de Navier-Stokes promitjades per Reynolds (RANS) inclouen:

- Models de zero equacions: model de longitud de mescla
- Models d'una equació: Spalart-Allmaras.
- Models de dues equacions: models k-ε (standard, realizable) i model k-ω.
- Models de set equacions: model de tensió de Reynolds (RSM).

Els models d'equacions es classifiquen segons el nombre d'equacions en derivades parcials (PDE) addicionals que s'han de resoldre. La Taula 4.1 mostra una comparativa dels models rellevants que s'observaran en aquest estudi. La formulació matemàtica es veu descrita a l'Annex 1.

| Model de turbulència | Avantatges   | Inconvenients  |
|----------------------|--|--|
| Spalart-Allmaras     | Econòmic, només resol una equació PDE.   | Provat insuficientment encara.<br>Manca de submodels.  |
| k-ε Standard         | Sòlid, econòmic, raonablement precís.  | Resultats pobres en remolins, separacions fortes de fluid, dolls axisimètrics i fluxos no confinats. |
| k-ε realitzable      | Bo per comportament del fluid moderadament complexos com separació de fluxos o remolins. | Resultats pobres en dolls axisimètrics i fluxos no confinats.  |
| SST k-ω              | Senzill d'implementar, convergència ràpida i estable dels càlculs.                       | Subjecte a la hipòtesi de viscositat de remolí com isotròpica.                                       |

Taula 3.1. Comparativa models de turbulència (Font: André Bakker, 2008)

### 3.5. Fluids multifàsics

Els problemes on coincideixen fluids en diferents estats (gas, líquid o sòlid) o on les propietats químiques varien en un mateix estat de la matèria són anomenats com multifàsics. S'introdueix el concepte de fracció de volum que es calcula segons l'Equació 3.13:

$$\text{Fracció de volum d'una fase} = \frac{\text{Volum de la fase en un domini}}{\text{Volum del domini}} \quad (\text{Eq. 3.53})$$

Seguint aquest concepte, quan la fracció de volum d'un fluid és d'una unitat, significa que el 100% d'aquell domini està format pel fluid en qüestió.

Les fases es classifiquen en primàries i secundàries. Una fase es considera primària que és manté al llarg del temps, mentre que és secundària quan es dispersa dins de la fase primària.

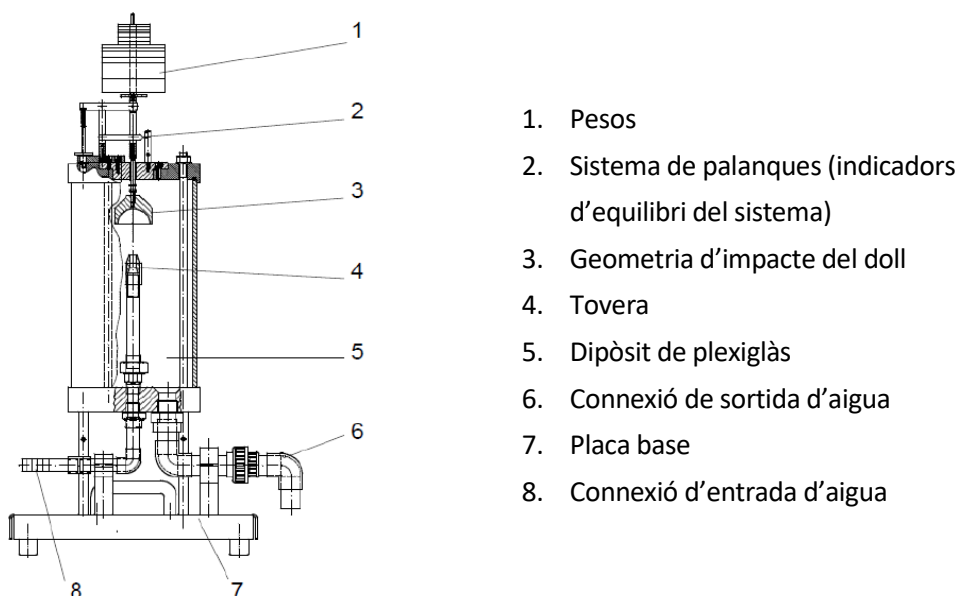
## 4. Experimentació

### 4.1. Característiques del banc d'assaig

El banc d'assaig sobre el que s'ha realitzat l'estudi experimental es troba al laboratori de màquines tèrmiques (Aula AS1.6) de l'EEBE.

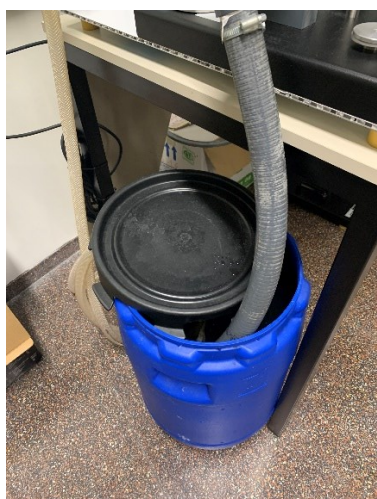
#### 4.1.1. Material i equips

- Banc hidràulic i equip experimental d'impacte d'un doll (especificacions tècniques a l'Annex B.1).



**Figura 4.1.** Elements del banc d'assaig (Font: EEBE)

L'aigua, inicialment es troba a un dipòsit el qual, en el seu interior, conté una bomba submergida que s'acciona manualment polsant un interruptor connectat a la corrent. La bomba transporta el fluid, a través del sistema de tubs, fins la connexió d'entrada. En un punt determinat del sistema de tubs, es troba instal·lat una vàlvula reguladora de cabal i un cabalímetre (especificacions tècniques a l'Annex B.2) connectat a un display que mostra en litres/segon la quantitat d'aigua que circula pel sistema. Les figures 4.2, 4.3, 4.4 i 4.5 mostren el recorregut que segueix l'aigua previ a l'entrada a l'equip experimental.



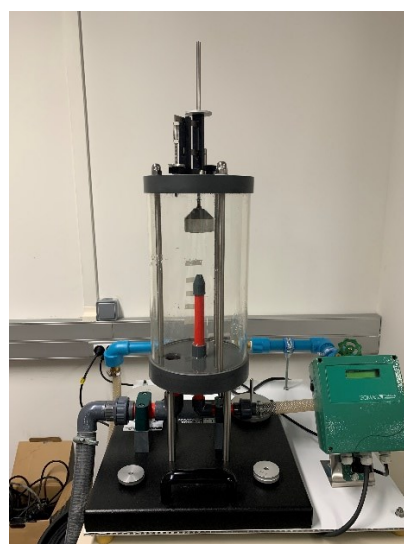
**Figura 4.2.** Dipòsit amb bomba. Inici del recorregut.  
(Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.3.** Avanç a través dels tubs i cabalímetre  
(Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.4.** Vàlvula, display de cabal i entrada al sistema  
(Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.5.** Vista frontal general del banc d'assaig  
(Font: Oriol Rodríguez)

Cal destacar que es tracta d'un circuit tancat, és a dir, que tota l'aigua utilitzada per dur a terme l'impacte és retornada, a través de la connexió de sortida, cap el dipòsit inicial.

- Geometries o àleps: "Placa plana", "Placa inclinada", "Copa cònica" i "Copa hemisfèrica" (Figures 4.6, 4.7, 4.8, 4.9).
- Flexòmetre



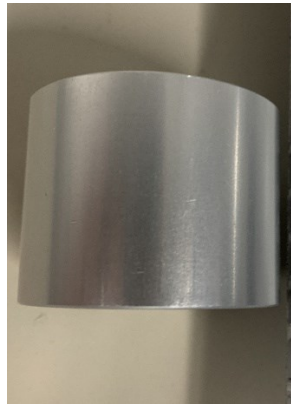


Figura 4.6. Placa plana (Font: Oriol Rodríguez)



Figura 4.7. Placa inclinada (Font: Oriol Rodríguez)



Figura 4.8. Copa cònica (Font: Oriol Rodríguez)



Figura 4.9. Copa hemisfèrica (Font: Oriol Rodríguez)

#### 4.1.2. Dades del banc d'assaig i geometries

Prèviament a l'inici de l'assaig s'han pres mesures transcendents per tal de poder efectuar els càlculs necessaris. Aquestes dades es mostren a les següents taules (Taula 4.1 i Taula 4.2).

|  |                     |
|--|---------------------|
| Distància de l'extrem superior de la tovera fins el punt d'impacte de l'aigua amb la geometria | $s = 90 \text{ mm}$ |
| Diàmetre de la tovera a la sortida del fluid   | $D = 10 \text{ mm}$ |

Taula 4.1 Mesures del banc d'assaig (Font: EEBE)

El conjunt de les geometries tenen un diàmetre de 5 cm. La taula 4.2 mostra l'angle de sortida del doll d'aigua respecte l'eix vertical (direcció del doll previ a l'impacte amb la geometria).

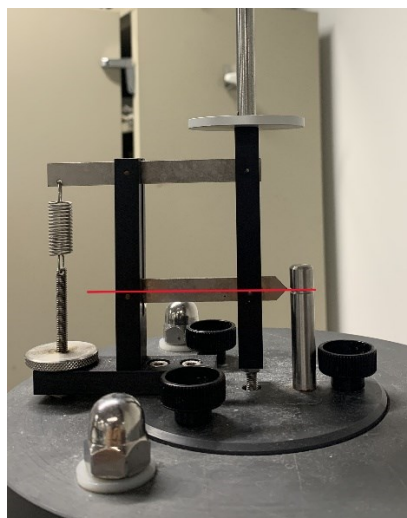
|             |                    |
|-------------|--------------------|
| Placa plana | $\beta = 90^\circ$ |
|-------------|--------------------|

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| Placa inclinada 45° | $\beta_1 = 135^\circ$ |
|                     | $\beta_2 = -45^\circ$ |
| Copa cònica         | $\beta = 135^\circ$   |
| Copa hemisfèrica    | $\beta = 180^\circ$   |

**Taula 4.2.** Angle de sortida del doll d'aigua respecte l'impacte (Font: EEBE)

## 4.2. Procediment experimental

En primer lloc, s'ha col·locat la geometria "Placa plana" enroscant-la en la posició corresponent. Un cop assegurat que la tapa queda ben tancada gràcies als tres cargols situats a la tapa superior, és necessari calibrar l'aparell. Per fer-ho, s'ha comprovat que l'indicador (veure Figura 4.7) es troba completament horitzontal. Quan no ha estat el cas, s'ha regulat l'alçada de la molla o bé afegit discs de pes (els quals no comptabilitzen per la presa de dades). A continuació, s'ha posat en marxa l'equip.



**Figura 4.7.** Punt de calibratge i equilibri del sistema (Font: Oriol Rodríguez)

A continuació, s'ha obert la vàlvula reguladora de cabal fins assegurar que el doll d'aigua ha impactat contra la geometria i afegit els pesos necessaris fins retornar l'indicador a la posició horitzontal previ a l'impacte del doll. S'han anotat a la següent taula (Taula 4.3) les dades de cabal indicat al display i la quantitat de pes col·locat. Per tal d'obtenir dades fiables, s'han realitzat 8 sèries de dades, augmentant el cabal i, per tant, la velocitat de l'aigua, agregant en cada sèrie la quantitat de pes necessari per equilibrar la força d'impacte.

Un cop realitzat el primer dels assaigs amb la geometria "Placa plana", s'ha intercanviat i procedit d'igual manera per les geometries "Placa inclinada", "Copa cònica" i "Copa hemisfèrica".



**Figura 4.8.** Assaig Placa plana (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.9.** Assaig Placa inclinada (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.10.** Assaig Copa cònica (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 4.11.** Assaig Copa hemisfèrica (Font: Oriol Rodríguez)

Les imatges (Figures 4.8, 4.9, 4.10 i 4.11) capturades durant l'assaig han permès mostrar la dinàmica de l'aigua en quant el seu recorregut, i com s'adhereix a les parets dels àleps per prendre una forma determinada un cop produït el xoc.

### 4.3. Resultats de l'assaig

Per poder avaluar la qualitat i exactitud dels resultats, en primera instància, s'ha calculat el valor de la força teòrica, a partir dels caudals registrat en cadascuna de les sèries de dades. Aquesta força, s'ha utilitzat com a referència, no únicament pels valors empírics, sinó també per la simulació en pròxims apartats del projecte.

#### 4.3.1. Valor teòric de la força d'impulsió

La força teòrica s'ha obtingut mitjançant l'aplicació de l'equació de quantitat de moviment en la seva forma integral, en la qual es considera menyspreable l'altura piezomètrica. És a dir, la força teòrica d'impacte s'ha calculat tal i com es mostra a continuació (Eq. 4.1).

$$F_{teòrica} = \dot{m} c = \rho \dot{V} c = \rho \dot{V} (c_0 - c_1 \cos\beta) = \rho \dot{V} c_0 (1 - \cos\beta) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On  $c_0$  representa la velocitat del fluid just l'instant previ a l'impacte amb la geometria (o àlep), i  $\beta$  l'angle amb el que varia el doll d'aigua provocat per la geometria, mostrat a la Taula 4.2. Com es pot apreciar, s'ha considerat  $c_1$  de mateix valor a  $c_0$ , ja que són menyspreables les pèrdues per fregament degut a les forces viscoses.

La velocitat del fluid que circula a la sortida de la tovera s'ha obtingut a partir de l'Equació de Continuitat, en funció del diàmetre expressat a la Taula 4.1.

$$c = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

D'altra banda, per conèixer  $c_0$ , s'ha seguit la equació de Bernouilli en funció de les dades de la velocitat de l'aigua i la altura fins impactar amb l'àlep (Taula 4.1).

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho c_0^2 + \rho g h_0 = P_1 + \frac{1}{2} \rho c_1^2 + \rho g h_1 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\frac{1}{2} \rho c_0^2 = \frac{1}{2} \rho c_1^2 + \rho g h_1 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$c_0 = \sqrt{c_1 - 2gh_1} = \sqrt{c_1 - 2gs} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

En un primer assaig, s'han obtingut els següents valors de la força d'impulsió experimental (Taula 4.3):

| Placa plana | Cabal (l/s) | Pes (N) | Cabal (m <sup>3</sup> /s) | Velocitat fluid (m/s) | Velocitat impacte (m/s) | Força teòrica (N) |
|-------------|-------------|---------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| 1           | 0,1808      | 0,6     | 0,0001808                 | 2,3020                | 1,8798                  | 0,3399            |
| 2           | 0,2316      | 1       | 0,0002316                 | 2,9488                | 2,6324                  | 0,6097            |
| 3           | 0,2865      | 1,3     | 0,0002865                 | 3,6478                | 3,3972                  | 0,9733            |
| 4           | 0,3427      | 2       | 0,0003427                 | 4,3634                | 4,1561                  | 1,4243            |
| 5           | 0,3736      | 2,2     | 0,0003736                 | 4,7568                | 4,5674                  | 1,7064            |
| 6           | 0,434       | 2,7     | 0,000434                  | 5,5259                | 5,3637                  | 2,3278            |
| 7           | 0,4755      | 3,3     | 0,0004755                 | 6,0543                | 5,9066                  | 2,8086            |
| 8           | 0,502       | 3,8     | 0,000502                  | 6,3917                | 6,2520                  | 3,1385            |

Taula 4.3. Taula resultats per la geometria Placa plana i càlcul força d'impulsió teòrica

| Copa cònica | Cabal (l/s) | Pes (N) | Cabal (m <sup>3</sup> /s) | Velocitat fluid (m/s) | Velocitat impacte (m/s) | Força teòrica (N) |
|-------------|-------------|---------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| 1           | 0,1885      | 1       | 0,0001885                 | 2,4001                | 1,9986                  | 0,6431            |
| 2           | 0,2336      | 1,5     | 0,0002336                 | 2,9743                | 2,6609                  | 1,0611            |
| 3           | 0,2875      | 2,2     | 0,0002875                 | 3,6606                | 3,4109                  | 1,6740            |
| 4           | 0,3227      | 2,8     | 0,0003227                 | 4,1087                | 3,8879                  | 2,1418            |
| 5           | 0,3596      | 3,3     | 0,0003596                 | 4,5786                | 4,3815                  | 2,6897            |
| 6           | 0,3832      | 3,6     | 0,0003832                 | 4,8791                | 4,6946                  | 3,0710            |

|          |        |            |           |        |        |               |
|----------|--------|------------|-----------|--------|--------|---------------|
| <b>7</b> | 0,4181 | <b>4,3</b> | 0,0004181 | 5,3234 | 5,1549 | <b>3,6793</b> |
| <b>8</b> | 0,4501 | <b>5</b>   | 0,0004501 | 5,7309 | 5,5747 | <b>4,2834</b> |

**Taula 4.4.** Taula resultats per la geometria Copa cònica i càlcul força d'impulsió teòrica

| <b>Copa hemisfèrica</b> | <b>Cabal (l/s)</b> | <b>Pes (N)</b> | <b>Cabal (m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>Velocitat fluid (m/s)</b> | <b>Velocitat impacte (m/s)</b> | <b>Força teòrica (N)</b> |
|-------------------------|--------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| <b>1</b>                | 0,1802             | <b>1</b>       | 0,0001802                      | 2,2944                       | 1,8704                         | <b>0,6741</b>            |
| <b>2</b>                | 0,2106             | <b>1,3</b>     | 0,0002106                      | 2,6814                       | 2,3290                         | <b>0,9810</b>            |
| <b>3</b>                | 0,2493             | <b>1,8</b>     | 0,0002493                      | 3,1742                       | 2,8826                         | <b>1,4373</b>            |
| <b>4</b>                | 0,2895             | <b>2,6</b>     | 0,0002895                      | 3,6860                       | 3,4382                         | <b>1,9907</b>            |
| <b>5</b>                | 0,35               | <b>3,6</b>     | 0,00035                        | 4,4563                       | 4,2536                         | <b>2,9775</b>            |
| <b>6</b>                | 0,377              | <b>4</b>       | 0,000377                       | 4,8001                       | 4,6125                         | <b>3,4778</b>            |
| <b>7</b>                | 0,395              | <b>4,5</b>     | 0,000395                       | 5,0293                       | 4,8506                         | <b>3,8319</b>            |
| <b>8</b>                | 0,4215             | <b>5</b>       | 0,0004215                      | 5,3667                       | 5,1996                         | <b>4,3833</b>            |

**Taula 4.5.** Taula resultats per la geometria Copa hemisfèrica i càlcul força d'impulsió teòrica

En quant a la placa inclinada 45°, donat la seva asimetria, s'ha procedit de manera diferent en els càlculs. En primera instància, s'ha dividit a la meitat el caudal, ja que trobem dos angles de sortida de fluid diferents (tal i com es mostra en la Taula 4.6), per després sumar les forces obtingudes.

A més, únicament s'han pogut obtenir 3 sèries de dades, ja que, com es demostrarà a continuació, no és possible obtenir valors coherents amb les característiques d'aquest aparell. Degut a la component horitzontal de força que es genera en la geometria quan el doll d'aigua impacta, l'eix mòbil que subjecta l'àlep contacta amb el costat de l'orifici que travessa, i provoca que la quantitat de pes necessari per equilibrar el sistema es vegi alterat.

| Placa inclinada | Cabal total (l/s) | Pes (N) | Cabal dividit (m <sup>3</sup> /s) | Velocitat fluid (m/s) | Velocitat impacte (m/s) | Força $\beta_1$ i $\beta_2$ (N) |        | Força teòrica (N) |
|-----------------|-------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|--------|-------------------|
| 1               | 0,1268            | 0,2     | 0,0000634                         | 1,6145                | 0,9169                  | 0,0992                          | 0,0170 | 0,1163            |
| 2               | 0,2832            | 0,4     | 0,0001416                         | 3,6058                | 3,3520                  | 0,8103                          | 0,1390 | 0,9493            |
| 3               | 0,3764            | 0,8     | 0,0001882                         | 4,7925                | 4,6046                  | 1,4793                          | 0,2538 | 1,7332            |

Taula 4.6. Taula resultats per la geometria Placa inclinada i càlcul força d'impulsió teòrica

#### 4.3.2. Gràfics

En els següents gràfics (Figures 4.12,4.13,4.14 i 4.15) es mostren els valors experimentals de la força (expressat com a Pes en les taules de l'Apartat 4.3.1) i el seu valor teòric, respecte el cabal d'aigua que hi circula.

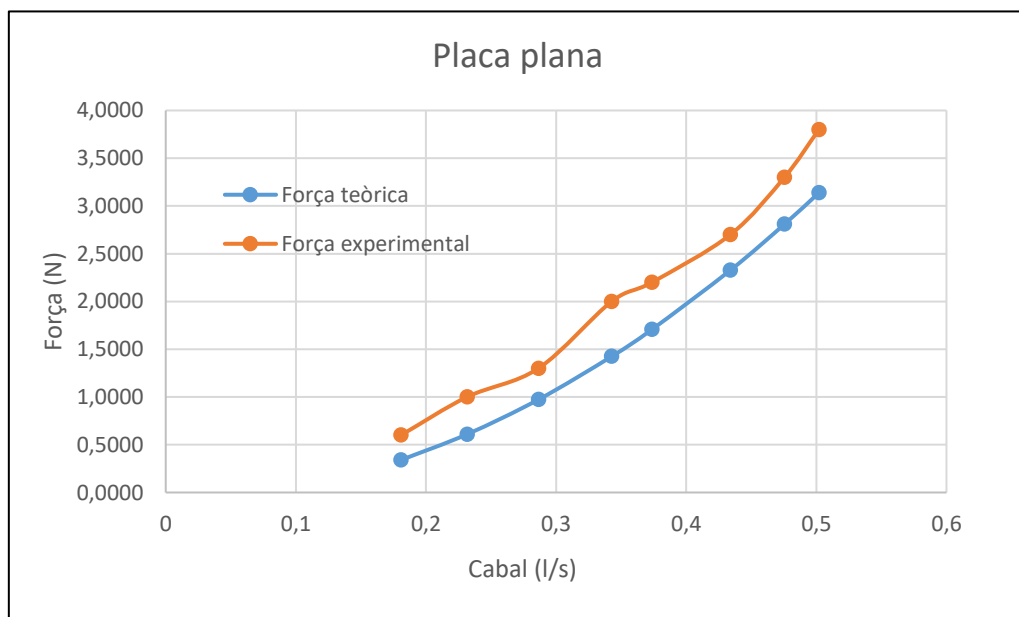


Figura 4.12. Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Placa plana

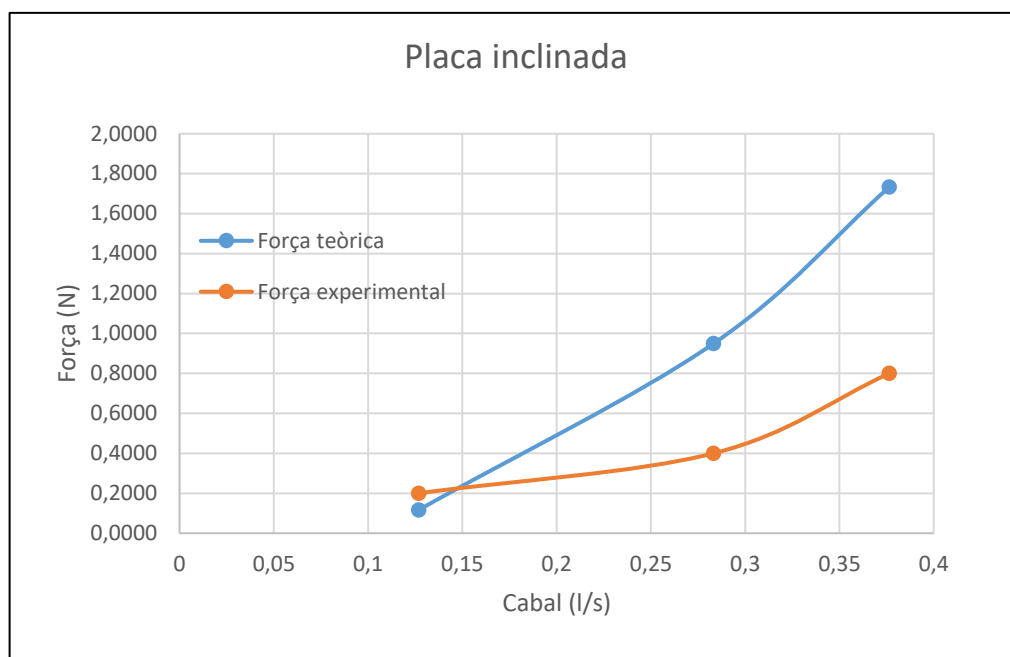


Figura 4.13. Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Placa inclinada

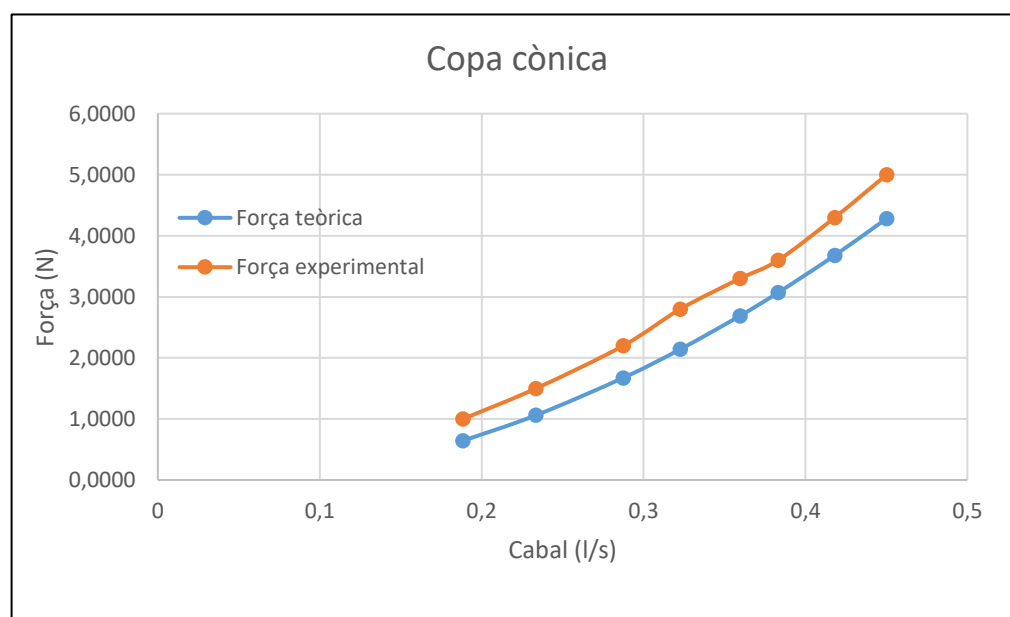
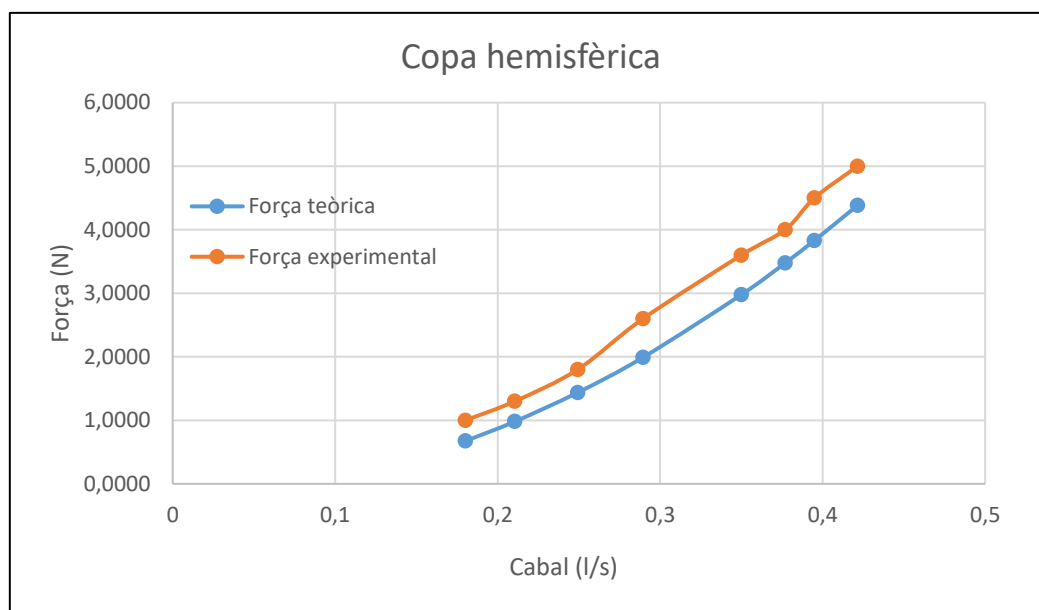


Figura 4.14. Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Copa cònica





**Figura 4.15.** Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Copa hemisfèrica

Respecte els gràfics obtinguts, s'ha confirmat que la placa inclinada 45°, degut a les característiques geomètriques de l'àlep i el banc d'assaig, no permet realitzar un estudi comparatiu dels valors teòrics i reals, ja que varia completament la tendència del gràfic segons el cabal que hi circula. Per tant, un cop s'ha arribat a aquesta conclusió, s'ha decidit descartar definitivament l'estudi d'aquesta geometria, motivat per la incompatibilitat entre l'àlep i el banc d'assaig.

D'altra banda, la tendència del gràfic amb la resta dels àleps són prou similars per tal de considerar-se raonables respecte els resultats teòrics. Cal destacar que, per aquests casos però, els valors experimentals sempre es mantenen per sobre dels teòrics, la qual cosa indica que la calibratge de l'aparell no ha estat correcte en un inici.

A més, tal i com s'intueix en vista dels resultats obtinguts en el conjunt d'assaigs, a major velocitat del fluid, la força exercida pel doll d'aigua augmenta. Es visualitza també que la geometria juga un paper important en quant a la força d'impulsió que el doll exerceix. La geometria que aparentment més força realitza amb un caudal similar és la copa hemisfèrica, seguida de la cònica i, finalment la placa plana. Per tant, es pot afirmar que l'angle  $\beta$  (veure Taula 4.2) afecta a la força d'impulsió exercida sobre l'àlep.

#### 4.4. Repetició de l'assaig

A causa dels errors obtinguts en cadascun dels resultats experimentals, s'ha optat per enregistrar de nou les dades, en busca d'una major precisió, reduint així les diferències del valor real i teòric.

#### 4.4.1. Taules de resultats

A continuació es mostren els resultats de la segona experiència, que es faran servir de referència per pròxims apartats, on s'ha inclòs l'error de cadascuna de les sèries.

| Placa plana | Cabal (l/s) | Pes (N)     | Cabal (m <sup>3</sup> /s) | Velocitat fluid (m/s) | Velocitat impacte (m/s) | Força teòrica (N) | Error (%) |
|-------------|-------------|-------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-----------|
| 1           | 0,1808      | <b>0,3</b>  | 0,0001808                 | 2,3020                | 1,8798                  | <b>0,3399</b>     | 11,7283   |
| 2           | 0,1944      | <b>0,4</b>  | 0,0001944                 | 2,4757                | 2,0889                  | <b>0,4062</b>     | 1,5203    |
| 3           | 0,2194      | <b>0,5</b>  | 0,0002194                 | 2,7941                | 2,4578                  | <b>0,5394</b>     | 7,2971    |
| 4           | 0,2444      | <b>0,6</b>  | 0,0002444                 | 3,1124                | 2,8144                  | <b>0,6880</b>     | 12,7871   |
| 5           | 0,2778      | <b>0,85</b> | 0,0002778                 | 3,5368                | 3,2776                  | <b>0,9105</b>     | 6,6404    |
| 6           | 0,3056      | <b>1</b>    | 0,0003056                 | 3,8905                | 3,6565                  | <b>1,1173</b>     | 10,4951   |
| 7           | 0,4167      | <b>2</b>    | 0,0004167                 | 5,3052                | 5,1360                  | <b>2,1400</b>     | 6,5429    |
| 8           | 0,4972      | <b>3</b>    | 0,0004972                 | 6,3308                | 6,1898                  | <b>3,0777</b>     | 2,5248    |

**Taula 4.7.** Taula resultats per la geometria Placa plana i càlcul força d'impulsió teòrica

| Copa cònica | Cabal (l/s) | Pes (N)    | Cabal (m <sup>3</sup> /s) | Velocitat fluid (m/s) | Velocitat impacte (m/s) | Força teòrica (N) | Error (%) |
|-------------|-------------|------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-----------|
| 1           | 0,1885      | <b>0,8</b> | 0,0001885                 | 2,4001                | 1,9986                  | <b>0,6431</b>     | 24,3908   |
| 2           | 0,213       | <b>1</b>   | 0,000213                  | 2,7120                | 2,3641                  | <b>0,8596</b>     | 16,3287   |
| 3           | 0,2848      | <b>2</b>   | 0,0002848                 | 3,6262                | 3,3739                  | <b>1,6404</b>     | 21,9250   |
| 4           | 0,36        | <b>3</b>   | 0,00036                   | 4,5837                | 4,3868                  | <b>2,6960</b>     | 11,2778   |
| 5           | 0,4161      | <b>4</b>   | 0,0004161                 | 5,2979                | 5,1286                  | <b>3,6430</b>     | 9,8002    |

|          |        |            |           |        |        |               |         |
|----------|--------|------------|-----------|--------|--------|---------------|---------|
| <b>6</b> | 0,4405 | <b>4,5</b> | 0,0004405 | 5,6086 | 5,4489 | <b>4,0975</b> | 9,8234  |
| <b>7</b> | 0,465  | <b>5</b>   | 0,000465  | 5,9206 | 5,7695 | <b>4,5799</b> | 9,1735  |
| <b>8</b> | 0,4852 | <b>5,5</b> | 0,0004852 | 6,1778 | 6,0331 | <b>4,9972</b> | 10,0619 |

**Taula 4.8.** Taula resultats per la geometria Copa cònica i càlcul força d'impulsió teòrica

| <b>Copa hemisfèrica</b> | <b>Cabal (l/s)</b> | <b>Pes (N)</b> | <b>Cabal (m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>Velocitat fluid (m/s)</b> | <b>Velocitat impacte (m/s)</b> | <b>Força teòrica (N)</b> | <b>Error (%)</b> |
|-------------------------|--------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>1</b>                | 0,1802             | <b>1,1</b>     | 0,0001802                      | 2,2944                       | 1,8704                         | <b>0,6741</b>            | 63,1831          |
| <b>2</b>                | 0,2553             | <b>2</b>       | 0,0002553                      | 3,2506                       | 2,9666                         | <b>1,5147</b>            | 32,0372          |
| <b>3</b>                | 0,3175             | <b>3</b>       | 0,0003175                      | 4,0425                       | 3,8179                         | <b>2,4244</b>            | 23,7439          |
| <b>4</b>                | 0,3492             | <b>3,5</b>     | 0,0003492                      | 4,4462                       | 4,2429                         | <b>2,9633</b>            | 18,1130          |
| <b>5</b>                | 0,3695             | <b>4</b>       | 0,0003695                      | 4,7046                       | 4,5131                         | <b>3,3351</b>            | 19,9348          |
| <b>6</b>                | 0,3972             | <b>4,5</b>     | 0,0003972                      | 5,0573                       | 4,8796                         | <b>3,8764</b>            | 16,0883          |
| <b>7</b>                | 0,4168             | <b>5</b>       | 0,0004168                      | 5,3069                       | 5,1378                         | <b>4,2829</b>            | 16,7441          |
| <b>8</b>                | 0,4405             | <b>5,5</b>     | 0,0004405                      | 5,6086                       | 5,4489                         | <b>4,8005</b>            | 14,5713          |

**Taula 4.9.** Taula resultats per la geometria Copa hemisfèrica i càlcul força d'impulsió teòrica

#### 4.4.2. Estudi d'errors

S'ha realitzat un estudi dels errors produïts en el procés experimental. Es classifiquen en dos tipus les dades expressades a les taules anteriors (Taula 4.7, Taula 4.8, Taula 4.9): mesures directes i indirectes.

En primer lloc, les dades directes són les mesurades durant l'assaig, sense la necessitat de cap càlcul. Aquestes únicament es tracten del cabal (en litres/segon) i el Pes (N). La incertesa per cadascuna de les mesures s'ha avaluat de la següent fórmula:

$$\delta x = p \tag{Eq. 4.6}$$

On  $p$  es tracta de la precisió de l'aparell de mesura, el cabalímetre i els pesos respectivament. A més, degut a la oscil·lació del valor del cabal a l'hora de prendre les dades, s'ha decidit augmentar aquest marge d'error, tot i treballar amb un cabalímetre amb precisió de quatre decimals. En aquest cas, seguint aquesta teoria, per la mesura de la primera sèrie utilitzant la geometria "Placa plana" queda expressat com:

$$\mathbf{Cabal} = (0,1808 \pm 0,001) \frac{1}{s} \quad \text{(Eq. 4.7)}$$

$$\mathbf{Pes} = (0,3 \pm 0,2) \text{ N} \quad \text{(Eq.4.8)}$$

Les mesures indirectes que s'han considerat són aquelles que han estat necessàries per trobar la força teòrica d'impulsió (Apartat 4.3.1). Pel que respecta aquest càlcul, tal i com s'indica a l'equació 4.1, s'observa una propagació de l'error. Seguint la teoria d'errors, el cabal  $\dot{V}$  (en metres cúbics/segon) i la velocitat d'impacte del doll  $c_0$  són aquells valors que afecten a l'error comès. Les altres variables venen indicats pel fabricant, motiu pel qual no han de suposar cap desviació.

Pel tractament de l'error del cabal, al ser únicament una transformació d'unitats, és a dir, el producte d'una mesura per una constant, s'ha procedit aplicant la regla del producte:

$$\frac{\delta q}{|q|} \approx \frac{\delta A}{|A|} + \frac{\delta x}{|x|} = \frac{\delta x}{|x|} \quad \text{(Eq. 4.9)}$$

$$\delta q = |A| \delta x \quad \text{(Eq. 4.60)}$$

On  $x$  és la mesura del cabal en litres/segon i  $\delta x$  la desviació de la mesura;  $q$  el valor del cabal en metres cúbics per segon i  $\delta q$  la seva desviació i, finalment,  $A$  el valor de la constant. Per tant, la desviació per la primera sèrie de dades de la geometria "placa plana" queda de la següent forma:

$$q = Ax = 0,001 \cdot 0,1808 = 0,0001808 \frac{m^3}{s} \quad \text{(Eq. 4.71)}$$

$$\delta q = 0,001 \cdot 0,001 = 1e - 6 \quad \text{(Eq. 4.82)}$$

Finalment, el cabal queda expressat com:

$$\dot{V} = (0,00018 \pm 1e - 6) \frac{m^3}{s} \quad \text{(Eq. 4.93)}$$

Per tal d'esbrinar la desviació de la velocitat d'impacte del doll, tal i com s'expressa en l'equació 4.5, s'ha hagut de calcular la desviació de la velocitat del fluid. Aquest procediment és equivalent al realitzat

anteriorment, tractant-se així del producte d'una constant per una mesura, en aquest cas indirecta. Es demostra en l'equació 4.10, on l'àrea és un valor constant, ja que el diàmetre del tub ve donat pel fabricant. Seguint les equacions 4.14 i 4.15, la velocitat per la primera sèrie de dades de la geometria "placa plana", s'ha calculat de la següent manera:

$$q = Ax = \frac{1}{\frac{\pi \cdot 0,01^2}{4}} \cdot 0,00018 = 2,302 \frac{m}{s} \quad (\text{Eq. 4.104})$$

$$\delta q = \frac{1}{\frac{\pi \cdot 0,01^2}{4}} \cdot 1e-6 = 0,01273 \quad (\text{Eq. 4.115})$$

Resultant la velocitat del fluid com:

$$c = (2,30 \pm 0,01) \frac{m}{s} \quad (\text{Eq. 4.126})$$

Un cop s'ha obtingut el valor acceptat de velocitat del fluid amb la seva desviació, s'ha realitzat el càlcul de la velocitat d'impacte expressat amb termes d'errors. S'ha utilitzat l'equació 4.17, la qual indica la desviació d'una mesura que és funció d'una altra variable amb error:

$$\delta q = \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x + \left| \frac{\partial q}{\partial y} \right| \delta y + \left| \frac{\partial q}{\partial z} \right| \delta z \quad (\text{Eq. 4.137})$$

Aplicat a l'equació 4.5, per tal d'obtenir la velocitat d'impacte, on l'única variable que conté error és la velocitat del fluid  $c$ :

$$\delta c_0 = \left| \frac{\partial c_0}{\partial c} \right| \delta c = \left| \frac{\partial(\sqrt{c^2 - 2gs})}{\partial c} \right| \delta c \quad (\text{Eq. 4.148})$$

On  $g$  és la gravetat, tractada com una constant, i  $s$  és el paràmetre d'altura senyalat pel fabricant (Taula 4.1), raó per la que no se li atribueixen errors. Finalment, s'ha operat i substituint els valors de les variables s'obté la següent desviació per la primera sèrie de dades de la geometria "placa plana":

$$\delta c_0 = \left| \frac{c}{(\sqrt{c^2 - 2gs})} \right| \delta c = \left| \frac{2,30}{(\sqrt{2,30^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,09})} \right| \cdot 0,01 = 0,01225 \quad (\text{Eq. 4.159})$$

Per tant, la velocitat d'impacte queda indicada en aquest exemple com:

$$c_0 = (1,88 \pm 0,01) \frac{m}{s} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Finalment, amb les dades d'incertesa obtingudes, ja s'ha pogut obtenir la desviació de la força teòrica d'impacte del doll en la primera sèrie de dades de la geometria "placa plana" segons l'equació 4.21:

$$\begin{aligned} \delta F_{teòrica} &= \left| \frac{\partial F_{teòrica}}{\partial \dot{V}} \right| \delta \dot{V} + \left| \frac{\partial F_{teòrica}}{\partial c_0} \right| \delta c_0 = \\ &= \left| \frac{\partial (\rho \dot{V} c_0 (1 - \cos \beta))}{\partial \dot{V}} \right| \delta \dot{V} + \left| \frac{\partial (\rho \dot{V} c_0 (1 - \cos \beta))}{\partial c_0} \right| \delta c_0 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.216})$$

On  $\rho$  i  $\beta$  són constants, ja que es tracten dels valors de densitat i angle de la geometria respectivament i, per tant, no s'acumula error en el càlcul. Un cop se substitueixen els valors s'ha obtingut el resultat en l'equació 4.22:

$$\begin{aligned} \delta F_{teòrica} &= \left| \frac{\partial (1000 \dot{V} \cdot 1,88)}{\partial \dot{V}} \right| \cdot 1e-6 + \left| \frac{\partial (1000 \cdot 0,00018 \cdot c_0)}{\partial c_0} \right| \cdot 0,01 = \\ &= 1880 \cdot 1e-6 + 0,18 \cdot 0,01 = 0,00368 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Llavors, el valor de la força teòric en aquesta primera sèrie de dades queda expressat com:

$$F_{teòrica} = (0,340 \pm 0,004) N \quad (\text{Eq. 4.23})$$

#### 4.4.3. Gràfics

A continuació, les figures 4.16, 4.17, 4.18 mostren els resultats obtinguts en aquest segon assaig, incloent les barres d'errors de cadascuna de les mesures.

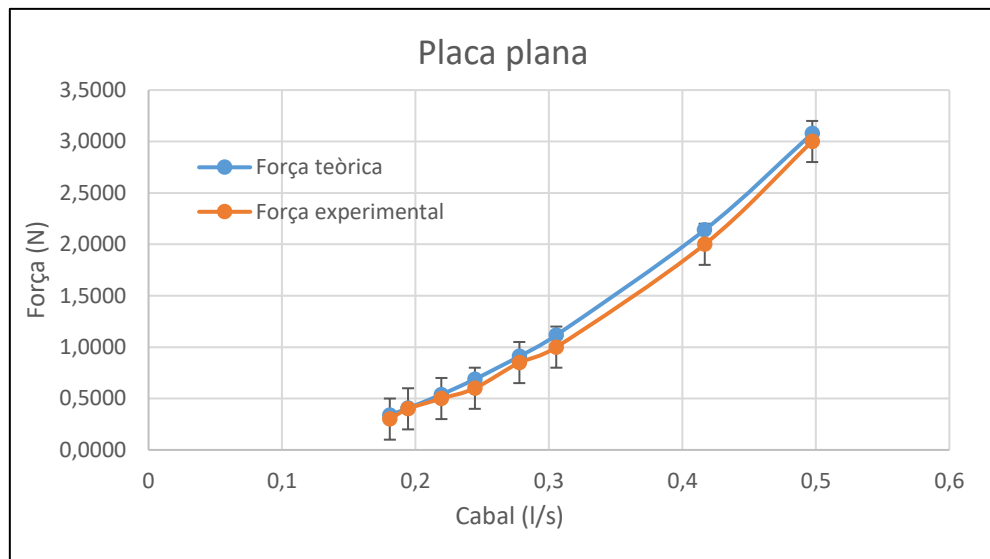


Figura 4.16. Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Placa plana

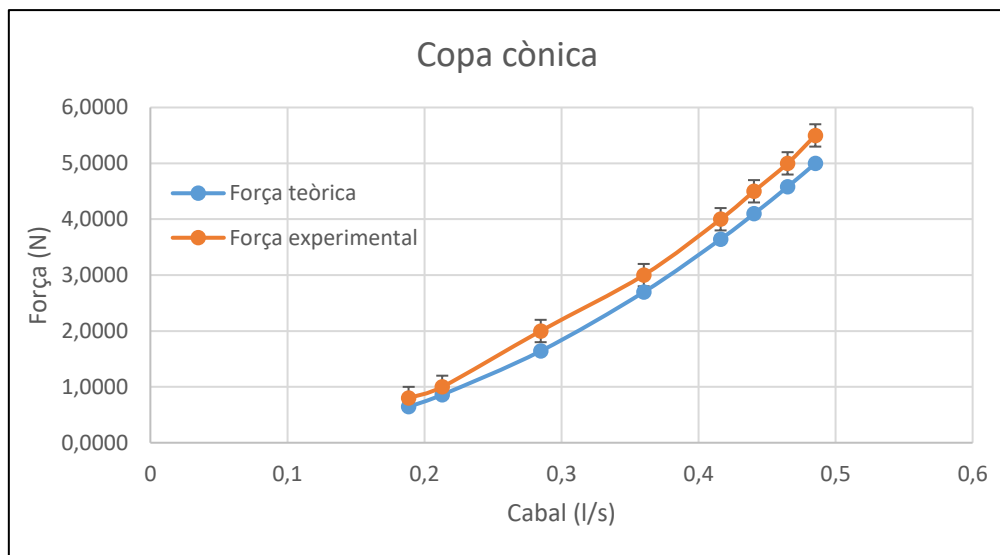
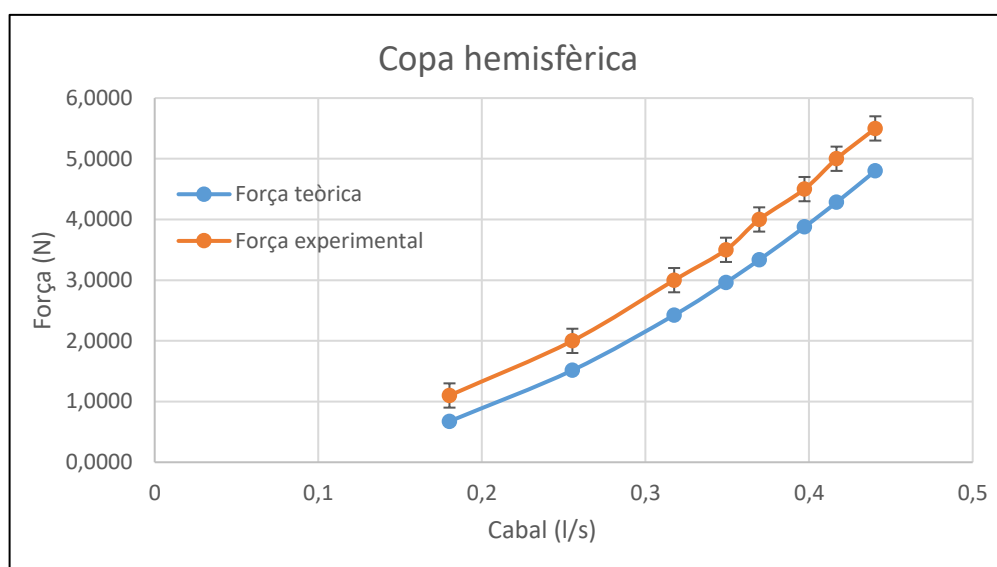


Figura 4.17. Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Copa cònica



**Figura 4.18.** Comparativa força teòrica i experimental en funció del cabal per la geometria Copa hemisfèrica

A partir dels gràfics s'han pogut extreure diverses conclusions. En primer lloc, s'observa com s'ha reduït de manera molt significativa l'error per la placa plana en aquesta segona experiència. Aquest fet pot considerar-se molt positiu ja que es compleix el marge d'error. En canvi, les altres dues geometries, tot i haver reduït l'error, encara s'observa cert desfasament en els valors experimentals respecte els teòrics.

La raó darrere d'aquest fet consisteix en que, la segona experiència realitzada amb l'àlep "placa plana" ha estat fet amb un banc d'assaig diferent, tot i que a priori amb iguals característiques que la resta d'assaigs. És per aquest motiu que es pot afirmar que l'error comès en les mesures és degut a un error sistemàtic de l'aparell del primer banc d'assaig.



## 5. Simulació

En aquesta secció s'ha recreat mitjan simulacions numèriques els casos estudiats experimentalment en el capítol 4. Aquest mètode es coneix com a CFD o dinàmica de fluids computacional. L'objectiu de la simulació ha estat observar de manera gràfica el recorregut del doll d'aigua al entrar en el sistema del banc d'assaig i determinar la força d'impacte amb cadascuna de les geometries corresponents.

### 5.1. Eina de càlcul

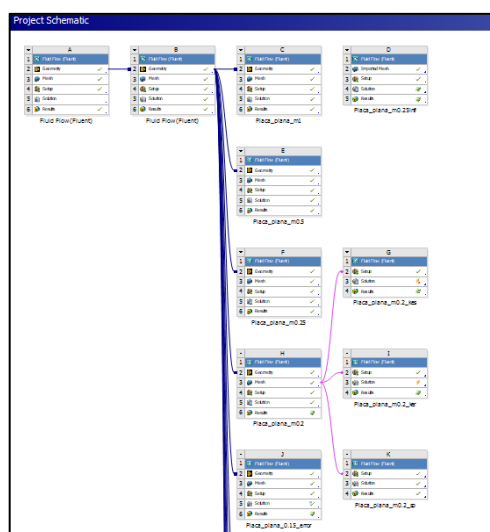
El software utilitzat per dur a terme ha estat Ansys 2022 R2 Student, la qual es tracta d'una versió amb llicència gratuïta per estudiants. Ansys és el sistema operatiu líder en simulació CAE per l'anàlisi, utilitzant la teoria d'elements finits.

### 5.2. Procediment

Per aconseguir uns resultats correctes en quant a l'error de càlcul s'han hagut de realitzar diferents estudis que han permès reduir aquest. D'altra banda, a continuació s'explica el recorregut a través de les opcions que ofereix Ansys, des de la creació de la geometria fins la finalització del càlcul.

#### 5.2.1. Ansys Workbench

Aquesta sessió és la pàgina principal des d'on es gestiona el tipus de problema que s'ha de resoldre. Per cadascuna de les geometries a analitzar s'ha creat un projecte diferent. A la figura 5.1, es mostra una imatge de com s'ha distribuït els diferents blocs al "Project Schematic" per poder analitzar cadascuna de les simulacions necessàries equivalents als casos teòrics i experimentals.



**Figura 5.1.** Project Schematic d'Ansys Workbench (Font: Oriol Rodríguez)

Per tal d'identificar cadascun dels blocs s'ha seguit la nomenclatura *Geometria\_VX\_mY\_Model de turbulència*. En el qual X fa referència a la velocitat una sèrie determinada de l'experiència, i Y la mida de malla utilitzat per dur a terme la simulació en mil·límetres. Per exemple, el bloc *Copa\_hemisfèrica\_V1\_m0.2\_SST* representa el càlcul de la geometria "Copa hemisfèrica" per la velocitat de la sèrie 1 (2,2944 m/s, indicat a la Taula 4.9), amb una mida de malla de 0,2 mm i el model de turbulència SST k- $\omega$ . Aquestes variables han estat les essencials per realitzar els diferents estudis necessaris a l'hora de trobar el mètode de càlcul més acurat respecte el teòric.

### 5.2.2. Disseny de les geometries

Cadascuna de les geometries ha requerit un disseny propi. Ansys ofereix varies possibilitats, en aquest projecte s'han creat mitjançant SpaceClaim. En les propietats, s'ha hagut d'indicar que es tracta d'un problema 2D, ja que es pot considerar axisimètric.

Principalment, s'han fet dues tasques dins de SpaceClaim, crear el plànol amb les respectives cotes i posar nom a les diferents parts. El primer que s'ha tingut en compte és que el problema pot ser tractat com axisimètric, el qual significa que només s'ha de recrear una meitat de la figura, a partir de l'eix central longitudinal. Per l'anàlisi del problema, s'ha tingut en compte un volum de control determinat, que conté una entrada i una sortida de fluid. Els dissenys han estat realitzats d'acord amb les dades de mesura de l'aparell i els àleps utilitzats a l'assaig. Les figures 5.2, 5.3 i 5.4 mostren la modelització de les diferents geometries.

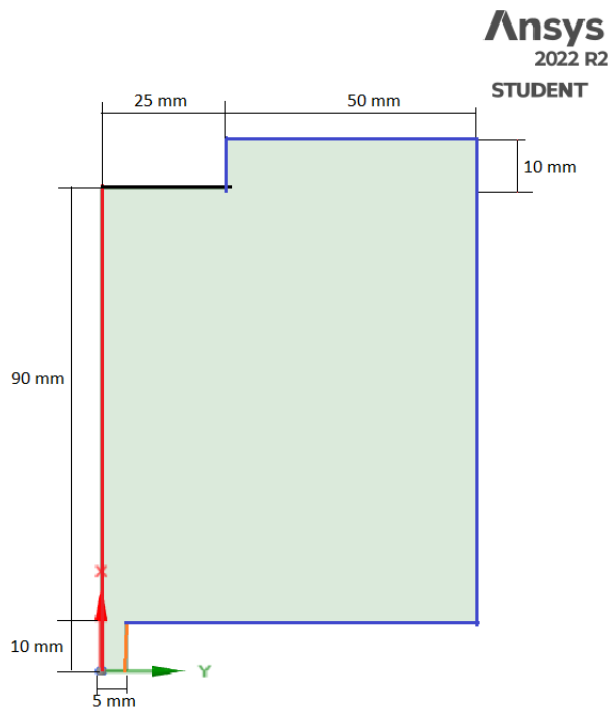


Figura 5.2. Placa plana amb SpaceClaim (Font: Oriol Rodríguez)

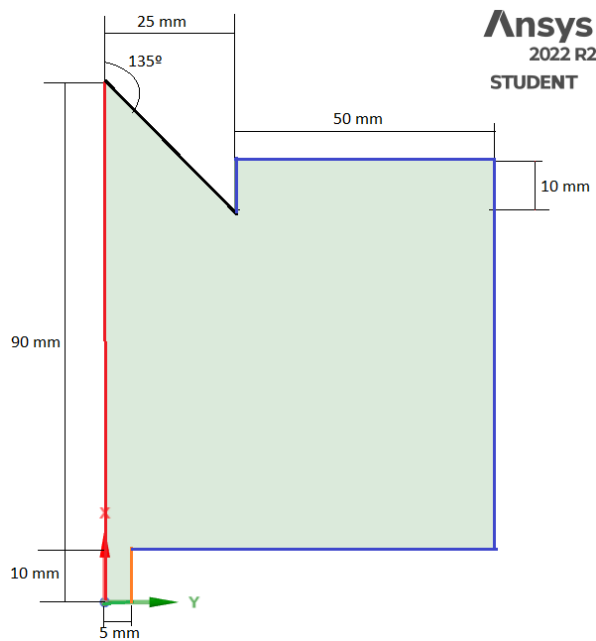
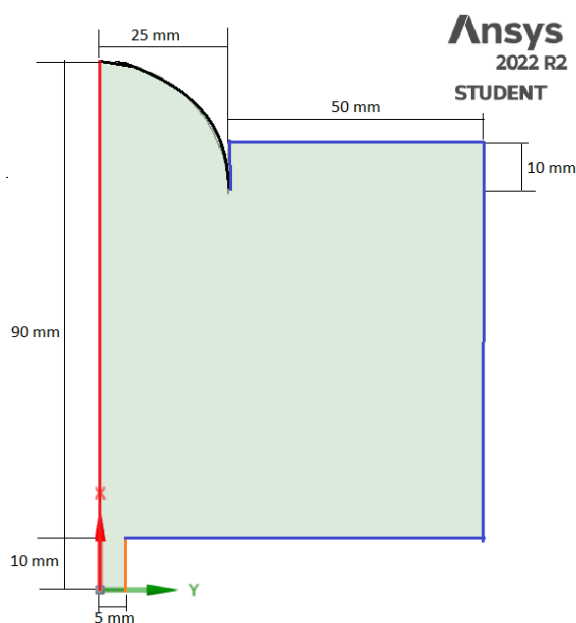


Figura 5.3. Copa cònica amb SpaceClaim (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 5.4.** Copa hemisfèrica amb SpaceClaim (Font: Oriol Rodríguez)

La nomenclatura consisteix en: color vermell per l'eix de revolució de la figura; negre per la paret de l'alep; carbassa és la paret del tub; en verd l'entrada d'aigua al sistema i blau la sortida a pressió atmosfèrica.

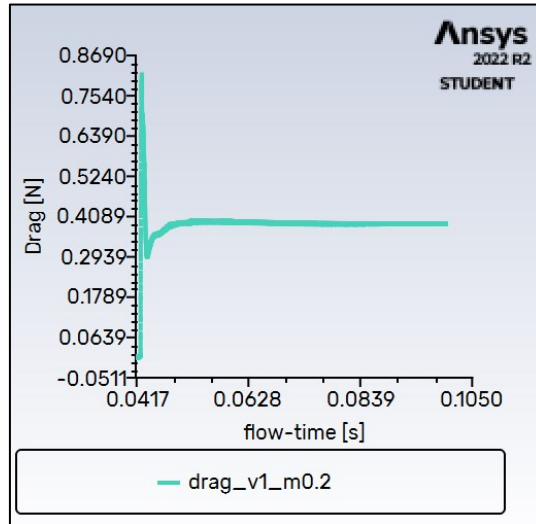
Es pot observar en les figures 5.2, 5.3 i 5.4 que s'ha augmentat la superfície d'aire 50 mm de radi i 10 mm en l'eix longitudinal per tal de reflectir en la simulació fins a on pot arribar l'aigua en les diferents condicions de velocitat.

### 5.2.3. Ansys Fluent

Fluent consisteix en l'extensió d'Ansys per problemes CFD (Computational Fluid Dynamics). Permet calcular i avaluar mitjançant volums finits aquest tipus de problemes aplicant multitud de variables.

El programari d'Ansys Fluent es pot dividir en tres blocs principals: Setup, Solutions i Results. Inicialment, a l'apartat de Setup s'introdueixen variables relacionades amb les característiques del tipus de problema que s'ha de resoldre. S'ha indicat que el problema és transitori, axisimètric i s'ha introduït la interacció de la gravetat. També s'ha hagut d'indicar que el problema és bifàsic, és a dir, que hi ha interacció de dos fluids, aire i aigua en estat líquid, propietats dels quals es troben a la base de dades del propi software. Seguidament s'han introduït les condicions de contorn, la velocitat d'entrada al sistema, sent 100% aigua i la pressió atmosfèrica a la sortida del sistema. L'últim que s'ha hagut d'introduir són alguns valors de referència, com ara l'àrea de la geometria on impacta el doll d'aigua, la densitat de l'aigua i la velocitat.

A l'apartat de Solutions s'ha indicat que el software realitzi un report del la força sobre la paret de la geometria on incideix el doll d'aigual. Es mostra un exemple a la figura 5.5 de la variació de la força de drag al llarg del temps, un cop finalitzat el procés iteratiu.



**Figura 5.5.** Evolució de la força sobre l'àlep al llarg del càlcul (Font: Oriol Rodríguez)

Previ a l'inici del càlcul, Ansys requereix la inicialització del problema, on comprova que el càlcul pugui ser realitzat en primera instància. El software demana introduir el valor d'algunes variables, on s'inclouen la pressió relativa (Gauge), les velocitats axials i radials, l'energia cinètica de turbulència, el rati específic de dissipació i el volum d'aigua o fase 2.

Un cop indicades totes les variables relacionades amb el problema, s'ha indicat les característiques del procés iteratiu. Aquestes poden ser paràmetres com el valor del salt de temps (timestep), el número de salt de temps a realitzar i el nombre d'iteracions màxim en cada timestep. Han sigut comú en el conjunt de càlculs duts a terme els valors de 10.000 timesteps amb una durada de 1e-5 segons i 20 iteracions màximes. S'ha comprovat que un cop completat el procés iteratiu s'hagués calculat la figura completa analitzant cadascun dels elements de la malla corresponent.

Finalment, a la secció de Results s'han extret els gràfics de fracció d'aigua en el sistema i un report del valor de la força aplicat a la paret de la geometria, mostrat a la consola.

#### 5.2.4. Estudi de convergència de malla

L'estudi de convergència de malla ha consistit en, amb una geometria i una velocitat determinades, esbrinar a partir de quina mesura dels elements no varia l'error de la força d'impulsió al reduir la mesura dels esmentats elements. Per portar a terme l'estudi, la geometria seleccionada ha estat la

“Placa plana” amb velocitat del fluid de 2,302 m/s. Es mostren els resultats de les simulacions a la taula 5.1.

| Velocitat fluid (m/s) | Dimensió de la malla (mm) | Nº de nodes | Nº d'elements | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%) |
|-----------------------|---------------------------|-------------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| 2,302                 | 1                         | 7.486       | 7.300         | 0,3399            | 0,3066        | 9,7970    |
|                       | 0,5                       | 29.571      | 29.200        |                   | 0,3176        | 6,5608    |
|                       | 0,25                      | 117.541     | 116.800       |                   | 0,3202        | 5,7958    |
|                       | 0,2                       | 183.426     | 182.500       |                   | 0,3209        | 5,5899    |

Taula 5.1. Estudi convergència de malla

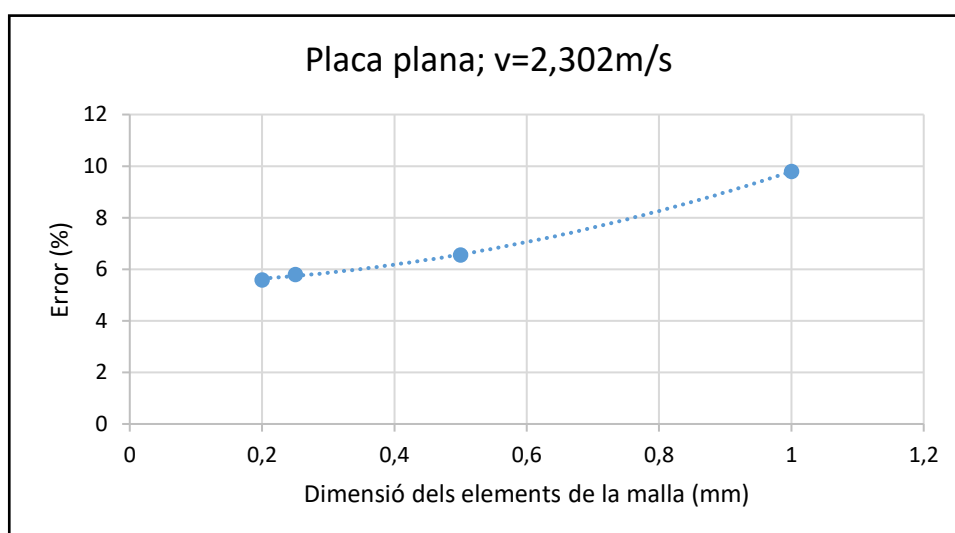


Figura 5.6. Convergència de l'error respecte la dimensió de la malla

Tal i com s'observa, l'error del valor teòric de la força d'impulsió disminueix a mesura que la dimensió dels elements es veu reduïda. Cal esmentar que, tractant-se Ansys d'una versió per estudiants, el nombre d'elements que permet calcular és limitat, afectant així al valor de mida aplicat al mallat. Pel fet que, a partir d'una mesura de 0,15 mm el software no pot portar a terme el càlcul i que l'error pot ser considerat prou acurat, s'ha decidit realitzar el conjunt de les simulacions amb una mida de malla de 0,2 mm.

Per demostrar que aquest fet és comú per les dues geometries restants s'ha comprovat que l'error per la primera sèrie de valors sigui prou correcte amb un mallat de 0,2 mm. S'expressen a continuació els resultats obtinguts.

| Geometria   | Velocitat fluid (m/s) | Nº de nodes | Nº d'elements | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%)     |
|-------------|-----------------------|-------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
| Cònica      | 2,4001                | 145.898     | 145.044       | 0,6431            | 0,6371        | <b>0,9383</b> |
| Hemisfèrica | 2,2944                | 148.766     | 147.941       | 0,6741            | 0,6519        | <b>3,2918</b> |

**Taula 5.2.** Resultats de l'error per la primera sèrie de valors i dimensió de malla 0,2 mm

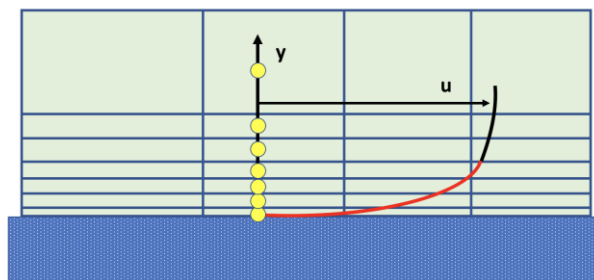
En vista de que l'error obtingut per la primera sèrie de dades en totes les geometries pot ser considerat prou correcte, tenint en compte que en la simulació no es tenen en compte les possibles pèrdues per fregament, s'ha pres la determinació de realitzar la resta de simulacions amb una dimensió de malla de 0,2 mm.

### 5.2.5. Aplicació de capa límit

Amb l'objectiu de minimitzar més l'error comès en la simulació, s'ha aplicat el concepte de placa límit sobre les parets del tub d'aigua i la geometria. L'aplicació d'aquesta, ha estat realitzada mitjançant l'eina "inflation". Convé destacar que l'alteració en model de malla per quadrilàters ha provocat un augment considerable de temps a l'hora de renderitzar el mallat. Mitjançant aquesta eina, també es podrà observar el perfil de velocitats en la parets amb major claredat. Un dels paràmetres més destacats a l'hora aquesta eina és l'anomenada distància de paret adimensional  $y^+$  (Schlichting and Gersten, 2001):

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \tag{Eq. 5.1}$$

On  $u_\tau$  la velocitat de fricció,  $y$  la distància absoluta des de la paret, i  $\nu$  la viscositat cinemàtica.



**Figura 5.7.** Evolució del perfil de velocitats en capa límit (Font: SimScale)

Respecte el paràmetre velocitat de fricció  $u_\tau$ , la viscositat i l'esforç de cisalla de la paret  $\tau_w$  són paràmetres importants. A partir d'aquestes variables i la densitat  $\rho$  es defineixen les escales viscoses i les escales de longitud adequades a la regió propera a la paret.

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Sent  $u_\tau$ :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

I,  $\tau_w$ :

$$\tau_w = \rho \nu \left( \frac{d \langle U \rangle}{dy} \right)_{y=0} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Els paràmetres finalment utilitzats es mostren a la Taula 5.3.

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| Mida y de la primera cel·la | 2,3E-5 m |
| Nº de capes                 | 8        |
| Factor de creixement        | 1,15     |

**Taula 5.3.** Resultats estudi aplicació capa límit

Un cop finalitzada la simulació s'han obtingut els resultats mostrats a la Taula 5.4 per la primera sèrie de dades de la geometria "Placa plana" on el valor 0,25\* correspon a la malla amb inflation.



| Velocitat fluid (m/s) | Dimensió de la malla (mm) | Nº de nodes | Nº d'elements | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%) |
|-----------------------|---------------------------|-------------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| 2,302                 | 0,25                      | 117.541     | 116.800       | 0,3399            | 0,32          | 5,7958    |
|                       | 0,25*                     | 121.617     | 120.910       |                   | 0,3186        | 6,2665    |

Taula 5.4. Resultats estudi aplicació capa límit

Amb aquests resultats i seguint el criteri d'error, es confirma que l'aplicació de capa límit en les parets del tub i la geometria no és necessària per obtenir un millor resultat en aquest tipus de problema, degut a l'augment de complexitat de la malla. A més, com s'ha comentat anteriorment, el nombre d'elements en la versió Ansys Student és limitat, provocant que la mínima mida en la que es pot aplicar sigui a una dimensió de 0,25 mm, obtenint així major precisió usant la malla de 0,2 mm.

### 5.2.6. Estudi del model de turbulència

L'últim estudi que s'ha realitzat ha consistit en l'anàlisi del model de turbulència més correcte pel tipus de problema plantejat. Per la primera sèrie de dades de la geometria "Placa plana", s'ha fet la simulació seguint quatre models de turbulència diferents: SST  $k - \omega$ ,  $k - \epsilon$  (Standard),  $k - \epsilon$  (Realizable) i Spalart-Allmaras.

Els resultats de l'estudi es mostren a la Taula 5.5.

| Model                       | Força resistència (N) | Error (%) |
|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Teòric                      | 0,3399                | -         |
| SST $k - \omega$            | 0,3209                | 5,5899    |
| $k - \epsilon$ (Standard)   | 0,32                  | 5,8547    |
| $k - \epsilon$ (Realizable) | 0,3191                | 6,1194    |
| Spalart-Allmaras            | 0,3215                | 5,4134    |

Taula 5.5. Comparativa d'errors pels diferents models de turbulència

A partir dels valors de força i l'error obtingut, s'observa que l'error més baix ha estat obtingut en el model Spalart-Allmaras. Però, al tractar-se d'un model d'una sola equació, s'ha optat per utilitzar el SST  $k - \omega$ , el qual avalua amb major precisió la física del problema.

### 5.3. Resultats de la simulació

Un cop determinades i demostrades totes les variables que tenen rellevància al sistema d'impacte del doll amb els diferents àleps, s'han realitzat les simulacions per totes les sèries de dades i comparat amb els resultats teòrics i experimentals mostrats prèviament.

#### 5.3.1. Taules de resultats

S'expressen a taules 5.6, 5.7 i 5.8 els valors donats en la simulació per cadascuna de les geometries.

| Placa plana | Velocitat fluid (m/s) | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%) |
|-------------|-----------------------|-------------------|---------------|-----------|
| 1           | 2,3020                | 0,3309            | <b>0,3209</b> | 5,5787    |
| 2           | 2,9488                | 0,4062            | <b>0,3876</b> | 4,5732    |
| 3           | 3,6478                | 0,5394            | <b>0,5209</b> | 3,4221    |
| 4           | 4,3634                | 0,688             | <b>0,6692</b> | 2,7285    |
| 5           | 4,7568                | 0,9105            | <b>0,8908</b> | 2,1592    |
| 6           | 5,5259                | 1,1173            | <b>1,0966</b> | 1,8489    |
| 7           | 6,0543                | 2,14              | <b>2,1133</b> | 1,2486    |
| 8           | 6,3917                | 3,0777            | <b>3,0738</b> | 0,1269    |

Taula 5.6. Taula resultats de la simulació per la geometria Placa plana

| Copa cònica | Velocitat fluid (m/s) | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%) |
|-------------|-----------------------|-------------------|---------------|-----------|
| 1           | 2,4001                | 0,6431            | <b>0,6371</b> | 0,9383    |
| 2           | 2,7120                | 0,8596            | <b>0,8508</b> | 1,0275    |

|   |        |        |                |        |
|---|--------|--------|----------------|--------|
| 3 | 3,6262 | 1,6404 | <b>1,6324</b>  | 0,4848 |
| 4 | 4,5837 | 2,6960 | <b>2,6859</b>  | 0,373  |
| 5 | 5,2979 | 3,6430 | <b>3,6258</b>  | 0,4716 |
| 6 | 5,6086 | 4,0975 | <b>4,106</b>   | 0,2077 |
| 7 | 5,9206 | 4,5799 | <b>4,5894</b>  | 0,2082 |
| 8 | 6,1778 | 4,9972 | <b>4,96512</b> | 0,6417 |

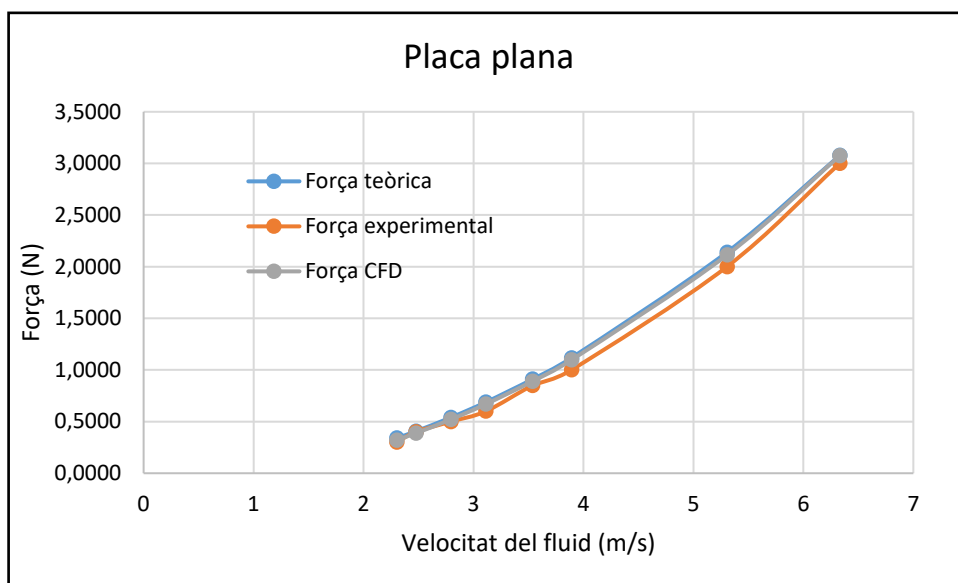
**Taula 5.7.** Taula resultats de la simulació per la geometria Copa cònica

| Copa hemisfèrica | Velocitat fluid (m/s) | Força teòrica (N) | Força CFD (N) | Error (%) |
|------------------|-----------------------|-------------------|---------------|-----------|
| 1                | 2,2944                | 0,6741            | <b>0,6519</b> | 3,2918    |
| 2                | 3,2506                | 1,5147            | <b>1,4794</b> | 2,3321    |
| 3                | 4,0425                | 2,4244            | <b>2,3727</b> | 2,1309    |
| 4                | 4,4462                | 2,9633            | <b>2,9032</b> | 2,0269    |
| 5                | 4,7046                | 3,3351            | <b>3,2684</b> | 2,0013    |
| 6                | 5,0573                | 3,8764            | <b>3,8009</b> | 1,9467    |
| 7                | 5,3069                | 4,2829            | <b>4,2</b>    | 1,9349    |
| 8                | 5,6086                | 4,8005            | <b>4,7078</b> | 1,9312    |

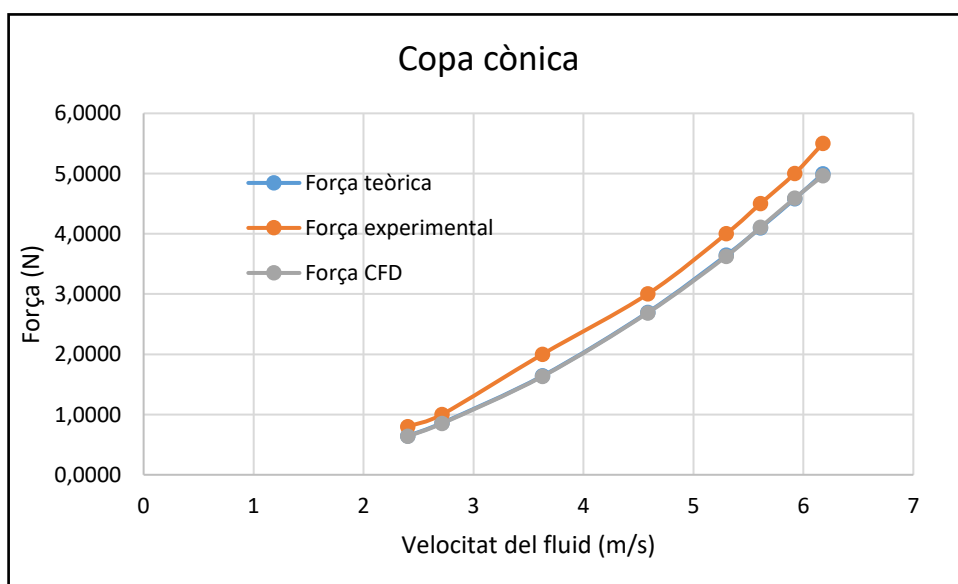
**Taula 5.8.** Taula resultats de la simulació per la geometria Copa hemisfèrica

### 5.3.2. Gràfics

A continuació es mostren els gràfics (figures 5.8, 5.9 i 5.10) comparatius de la força d'impulsió respecte la velocitat del fluid per cadascun dels àleps analitzats.



**Figura 5.8.** Comparativa de resultats de força teòrica, experimental i simulació respecte la velocitat per la geometria Placa plana.



**Figura 5.9.** Comparativa de resultats de força teòrica, experimental i simulació respecte la velocitat per la geometria Copa cònica.

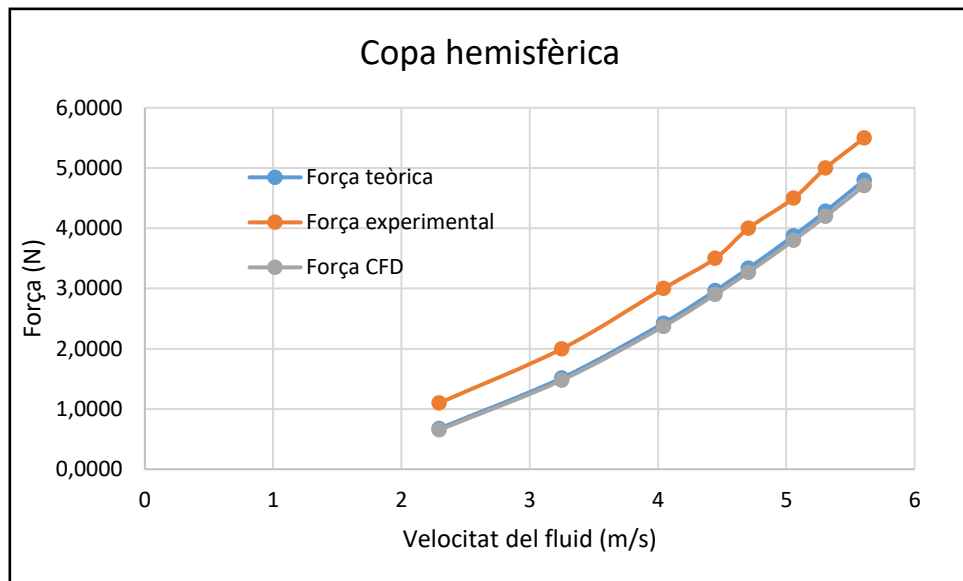


Figura 5.10. Comparativa de resultats de força teòrica, experimental i simulació respecte la velocitat per la geometria Copa hemisfèrica

### 5.3.3. Volum d'aigua al sistema

Les següents figures 5.11, 5.12, 5.13 mostren, per la primera sèrie de dades de velocitat de cadascuna de les geometries, l'evolució del doll d'aigua en el volum de control. La resta d'imatges s'han inclòs a l'Annex C1.

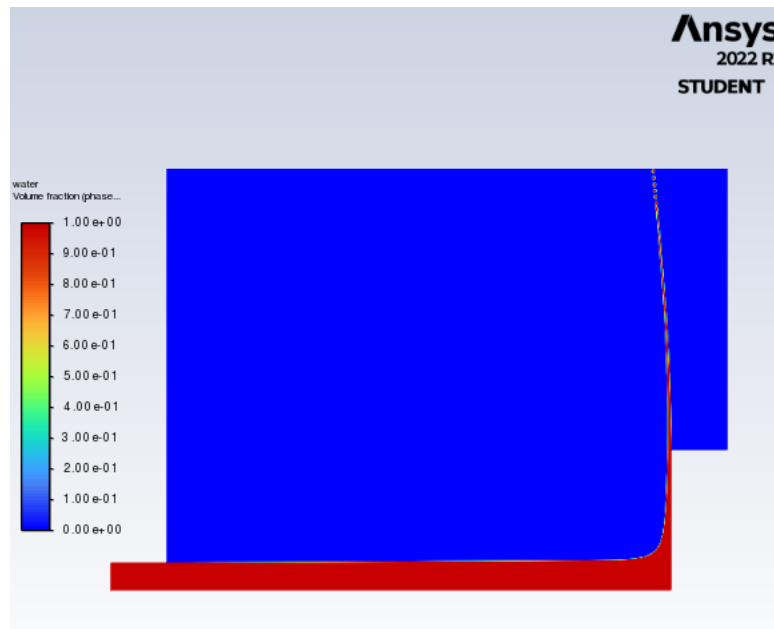
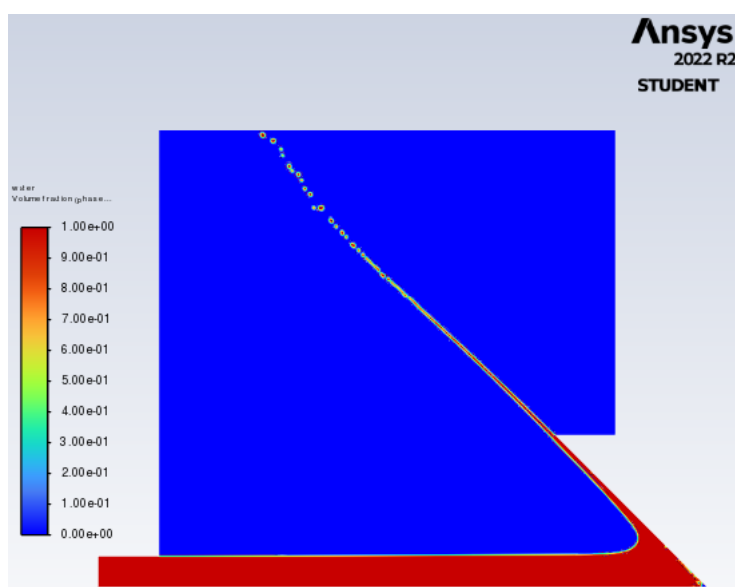
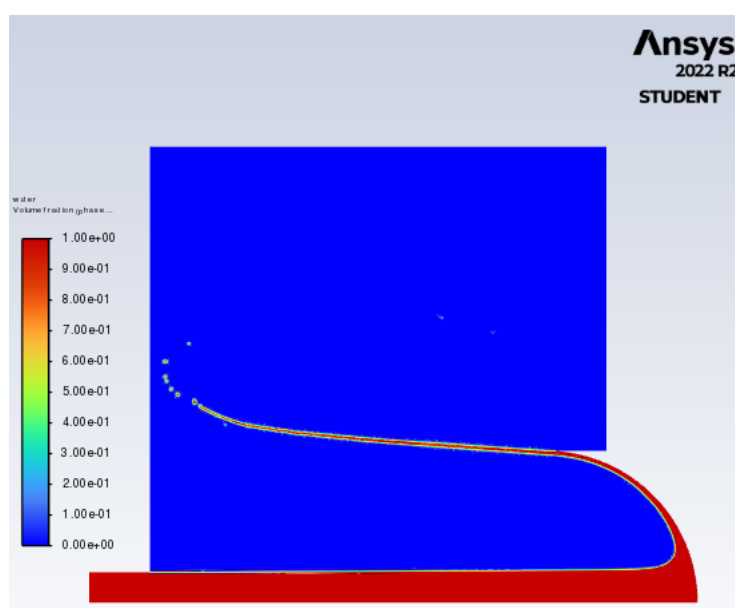


Figura 5.11. Fracció de volum d'aigua en el volum de control Placa plana (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 5.12.** Fracció de volum d'aigua en el volum de control Copa cònica (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 5.13.** Fracció de volum d'aigua en el volum de control Copa hemisfèrica (Font: Oriol Rodríguez)

Tenint en compte l'axisimetria i la rotació dels eixos, pot observar-se com la trajectòria del doll a partir de l'impacte de la geometria coincideix amb les figures 4.8, 4.10 i 4.11 capturades durant l'experimentació.

### 5.3.4. Velocitat dels fluids

Seguidament, les figures 5.14, 5.15 i 5.16 mostren la velocitat en cada element de malla del sistema, independentment de la fase, ja sigui aigua líquida o aire, per la primera sèrie de dades de cadascun dels àleps. La resta de representacions es troben representades a l'Annex C2.

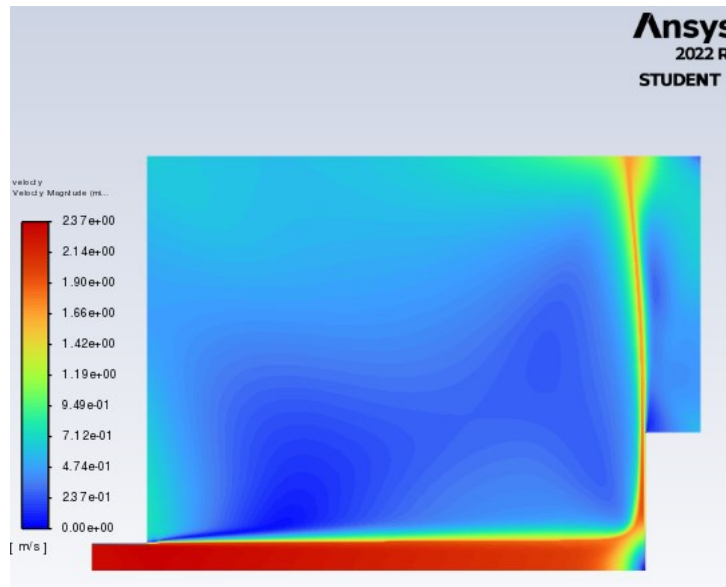


Figura 5.14. Velocitat del fluid en el volum de control Placa plana (Font: Oriol Rodríguez)

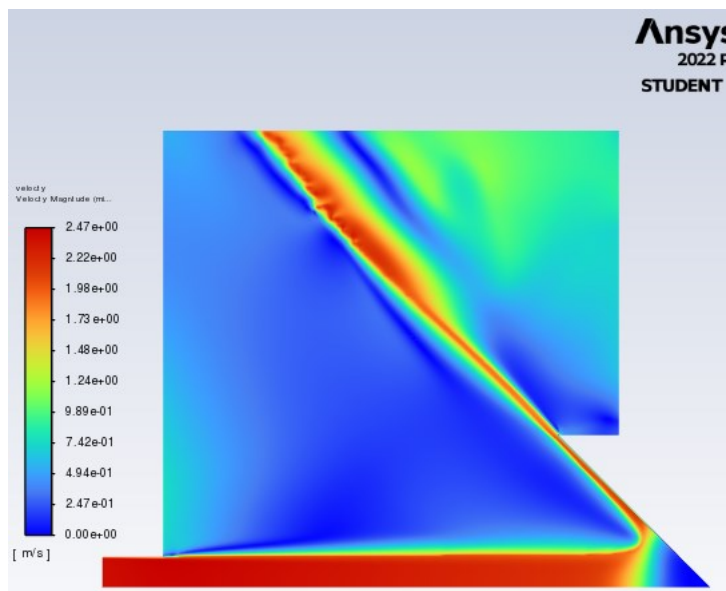
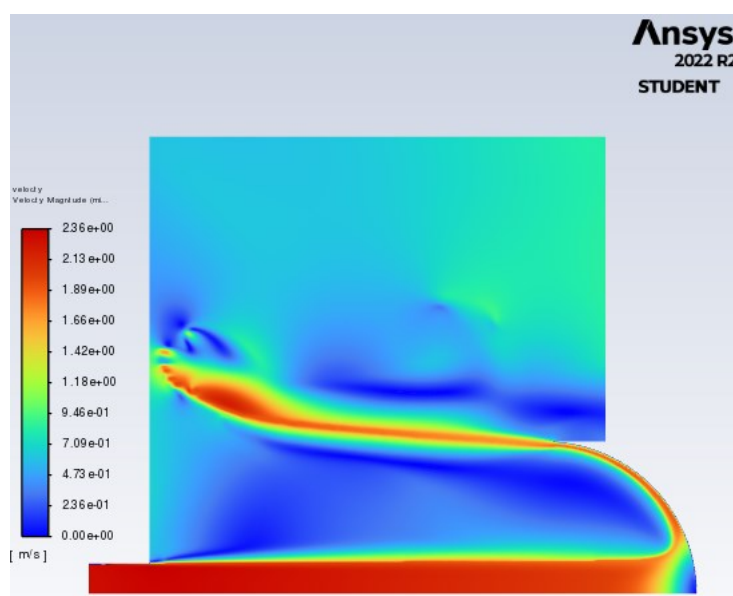


Figura 5.15. Velocitat del fluid en el volum de control Copa cònica (Font: Oriol Rodríguez)



**Figura 5.16.** Velocitat del fluid en el volum de control Copa hemisfèrica (Font: Oriol Rodríguez)

Les imatges permeten observar l'evolució de velocitat, des de la sortida del fluid pel tub, variable la qual és indicada inicialment fins com va disminuint conforme va aproximant-se al moment del xoc, degut a l'efecte de la gravetat. S'observa, també, com en el punt d'impacte la velocitat és nul·la i es manté al llarg de tot el contorn de la geometria, per l'efecte del fregament. Finalment, és remarcable com el doll d'aigua provoca moviment en l'entorn que l'envolta, aire en aquest cas, per efecte de la interacció entre les dues fases.



## 6. Anàlisi de resultats

Observant amb perspectiva dels resultats obtinguts a les diferents seccions que han compost el treball, s'han pogut extreure diverses conclusions:

En primer lloc, tal i com mostren els gràfics (Figures 5.8, 5.9 i 5.10) es pot afirmar l'error sistemàtic comès en els assaigs duts a terme per les geometries "Copa cònica" i "Copa hemisfèrica". La raó d'aquest, és demostrat gràcies que a l'assaig restant, realitzat amb el deflector "Placa plana" en un equip experimental equivalent en característiques, els valors teòric i experimentals són molt més propers entre sí, independentment de les dades inicials de les sèries.

També es pot afirmar, a partir dels resultats obtinguts en les simulacions i experimentalment, que la força rebuda per l'àlep depèn no només de la velocitat del fluid en el moment de l'impacte, sinó que també de la pròpia geometria. Tal i com s'observen a les diferents taules de resultats (Taulas 5.6, 5.7 i 5.8), la "Copa hemisfèrica" és l'àlep que menys velocitat d'impacte del fluid requereix per exercir una força determinada, seguit de la "Copa cònica" i, per últim, la "Placa plana". Dit això, queda demostrat que l'angle  $\beta$ , juga un paper principal en quant a la força de sustentació.

Respecte a les simulacions, pot dir-se que els diferents estudis han estat satisfactoris per tal d'aproximar-se als valors teòrics. Tot i les limitacions degudes a la versió "estudiant" d'Ansys, l'estudi realitzat per observar a partir de quina dimensió de malla convergia el resultat, s'ha arribat a reduir significativament l'error comès. L'estudi dels models de turbulència, ha permès d'igual manera, seleccionar quin dels possibles era el més proper a la situació real, sent el model SST  $k-\omega$  l'idoni per dur a terme la simulació. En canvi, degut a les característiques del problema, la incorporació d'una capa límit no ha suposat una millora en els resultats tal i com s'esperava inicialment. La raó d'aquest fet s'atribueix a que no era possible d'introduir un número tan elevat d'elements en aquesta versió d'Ansys, per una malla amb dimensió de 0,2 mm. A més, afegir aquest element al mallat ha provocat una alteració del mètode utilitzat per quadrilàters que ha pogut causar algun element no desitjat pel càlcul.

A més, fent una comparació entre el recorregut de l'aigua a les imatges experimentals (Figures 4.8, 4.10 i 4.11), i les simulacions (Figures 5.11, 5.12 i 5.13), pot ser observada la similitud en el comportament de l'aigua i de quina manera s'adhereix a les parets dels àleps segons la seva forma i la trajectòria que prenen posteriorment. D'aquesta manera, pot confirmar-se que les simulacions, des del disseny de les geometries fins el càlcul, representen amb molta fiabilitat la realitat.



## 7. Anàlisi de l'impacte ambiental

L'impacte ambiental del treball es basa en l'energia consumida durant les hores de càlcul en les simulacions, el funcionament de l'equip experimental i el laboratori. També s'ha comptabilitzat la petjada de carboni generada en el trajecte per acudir a les reunions de seguiment i realitzar les experimentacions a la universitat.

En l'hipotètic cas de fuga en el banc d'assaig, s'ha afegit l'impacte de reomplir d'aigua el dipòsit.

### 7.1. Consum energètic experimentació

L'impacte ambiental durant l'experimentació és, en conjunt, el consum elèctric del laboratori on s'han realitzat els assaigs i el consum del banc d'assaig en sí.

#### 7.1.1. Laboratori

El consum elèctric degut a la il·luminació és l'únic factor que s'ha comptabilitzat. S'ha considerat que la lluminària del laboratori, formada per 5 tubs LED de 120 cm, tenen un consum de 90 W. Per tant, si el temps emprat al laboratori ha estat de 4 hores aproximadament, s'ha consumit 0,45 kWh.

#### 7.1.2. Banc d'assaig

El banc d'assaig, tal i com s'ha comentat a l'Apartat 4.1.1, es troba connectat a la xarxa elèctrica. En primer lloc la bomba d'aigua submergible, consumeix una potència de 550 W, tal i com indica el fabricant (GUNT). Comptant que l'ús d'aquest ha estat d'aproximadament 3 hores i 30 minuts, ja que s'han descomptat els temps de desmuntatge i muntatge dels àleps, el consum de l'equip experimental és de 1,93 kWh. També, s'ha comptabilitzat la quantitat d'aigua que requereix el sistema per funcionar, aproximadament 25 L, tenint en compte que el dipòsit d'aigua és de 30 L.

### 7.2. Consum energètic simulació

La simulació ha requerit una gran quantitat d'hores per completar l'estudi de convergència de malla, l'aplicació de la capa límit, l'estudi del model de turbulència i les simulacions de la resta de les sèries un cop determinades les dades dels estudis en qüestió. En total, s'han completat 31 simulacions amb una durada mitjana de 17,84 hores per cadascuna. Tenint en compte que durant el càlcul, l'ordinador consumeix aproximadament un 63% dels recursos i la potència és de 65 W, s'ha consumit un total de 22,65 kWh.

### 7.3. Possibles contratemps

En aquest apartat s'ha considerat una hipotètica fuga del banc d'assaig que malbarati tota l'aigua del dipòsit, suposant la pèrdua de 25 litres d'aigua que no poden ser utilitzat en cas que s'hagin contaminat i, per tant, que no es poden reaprofitar, ja que podria suposar conseqüències més greus en el sistema.

També es vol destacar els errors informàtics, actualitzacions, etc. que han aturat i tancat el càlcul durant les simulacions, provocant la pèrdua d'aquestes dades i havent de reiniciar de nou la simulació. Aquest fet, ha tingut lloc en dues ocasions durant aquest projecte, tallant la simulació a mitges a les 5 i a les 12 hores de càlcul. Seguint les dades de l'Apartat 7.2, les pèrdues han estat de 0,7 kWh.

## 8. Conclusions

En el present treball s'ha completat l'estudi d'impacte d'un doll d'aigua sobre àleps amb diferents geometries, inicialment de manera experimental i, després, realitzant les simulacions CFD amb les dades adquirides.

De l'apartat experimental, s'extreu com a conclusió l'error sistemàtic d'un dels equips experimental, en el qual s'han obtingut les mesures dels àleps "Copa cònica" i "Copa hemisfèrica", gràcies a una segona sessió d'obtenció de dades experimentals, on s'ha pogut observar aquest fet. Per tant, en cas de voler realitzar un estudi d'aquests equips experimentals, serà més òptim basar-se en dades de l'equip on s'han pres les mesures de la geometria "Placa plana" en segona instància. En aquest mateix apartat, s'ha decidit descartar l'estudi respecte l'àlep "Placa inclinada", ja que s'ha demostrat la incompatibilitat de la geometria amb l'equip experimental en la obtenció de les dades. També, cal destacar la transcendència del càlcul dels valors teòrics l'hora d'esbrinar la desviació en l'adquisició de dades, sent la raó principal per la que s'ha decidit repetir l'experiència, aconseguint així disminuir la diferència entre els resultats teòrics i experimentals.

De la simulació, es conclou que s'ha aconseguit aproximar la situació real, tot i que pot ser millorable en unes condicions on el software permeti major nombre d'elements, aconseguint així una major precisió en els resultats. S'ha confirmat, també, que l'estudi de convergència de malla ha permès aproximar els resultats fins una desviació molt acceptable, però no arribant a convergir completament. L'estudi d'aplicació de capa límit no ha estat rellevant per la situació que s'ha plantejat, degut a que la seva introducció en el mallat no ha reduït l'error dels resultats finals, sinó que ha augmentat, a més de comportar un major temps a la malla per ser generada. L'últim estudi realitzat ha estat respecte els models de turbulència. Tot i que el model que menor error respecte els valors teòrics era el model Spalart-Allmaras, s'ha decidit decantar-se pel model SST  $k - \omega$ , el qual contempla un major nombre d'equacions, sense afectar significativament als resultats obtinguts.

En termes generals, es pot concloure que el treball ha estat un èxit en quant a l'objectiu inicial plantejat, ja que, s'ha realitzat una comparativa molt propera entre les mesures teòriques, empíriques i els resultats generats a través de simulacions de software, obtenint així un estudi clarificador de l'impacte d'un doll d'aigua sobre àleps de diferents geometries. S'ha pogut confirmar que, la forma geomètrica d'aquests àleps afecta sobre la força de sustentació generada, obtenint que, l'augment de l'angle de sortida de l'àlep respecte l'entrada (des de 90° fins a 180°), provoca que aquesta sigui major a igual velocitat d'impacte del fluid sobre la paret.

En pròxims estudis, seria interessant tractar més varietat de models de turbulència, els quals no s'han pogut avaluar en aquest estudi. També, un cop conegut l'error sistemàtic d'un dels equips

experimentals, seria una bona opció realitzar l'estudi de les geometries "Copa cònica" i "Copa hemisfèrica" en l'equip experimental on s'han obtingut els valors de l'àlep "Placa plana" en la repetició de l'assaig.

## 9. Pressupost i/o Anàlisi Econòmic

El pressupost per la realització del treball s'ha dividit en tres seccions: mà d'obra, lloguer d'espais i equip experimental i Llicències de software.

### 9.1. Costos d'enginyeria

El pressupost de mà d'obra s'ha dividit en costos d'enginyeria i de supervisió, els quals suposen el cost que es mostra a la Taula 9.1.

| Tipus de mà d'obra | Quantitat (hores) | Cost unitari (€/h) | Cost total (€)   |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| Enginyeria         | 600               | 20,00              | 12.000,00        |
| Supervisió         | 16                | 24,00              | 384,00           |
| <b>Subtotal</b>    |                   |                    | <b>12.384,00</b> |

Taula 9.1. Pressupost de mà d'obra

### 9.2. Lloguer d'espais i equip experimental

Una part del pressupost contempla les hores d'ús del Laboratori de Màquines tèrmiques de l'EEBE i dels equips experimentals d'assaig d'impacte d'un doll d'aigua (GUNT HM 150.08). El desglossament dels costos es mostra detallat a la Taula 9.2.

| Tipus de lloguer | Quantitat (unitats) | Temps (hores) | Cost unitari (€/h) | Cost total (€)  |
|------------------|---------------------|---------------|--------------------|-----------------|
| Laboratori EEBE  | 1                   | 4             | 123,00             | 492,00          |
| Banc d'assaig    | 2                   | 4             | 200,00             | 1.600,00        |
| <b>Subtotal</b>  |                     |               |                    | <b>2.092,00</b> |

Taula 9.2. Pressupost de lloguers

El preu de lloguer de laboratori es troba assignat al portal web de l'EEBE (Tarifes de cessió d'espais). El lloguer d'equips de laboratori depèn del contracte acordat amb el proveïdor. En aquest cas, és obligatori complir un mínim de 2 mesos a un preu de 800 € per equip.

### 9.3. Costos de software

El programa Ansys i l'extensió Ansys Fluent poden ser adquirits segons les característiques de l'usuari. Per la realització d'aquest treball s'ha utilitzat la versió Ansys Student, la qual és gratuïta però, per qualsevol altre usuari el preu mínim de lloguer un any es de 41.710 € .

D'altra banda, s'ha requerit el software de Microsoft Office per realitzar taules i gràfics d'Excel i la memòria (Word).

La Taula 9.3. mostra el pressupost de software.

| Software             | Tipus de llicència | Quantitat | Cost unitari (€/u) | Cost total (€)   |
|----------------------|--------------------|-----------|--------------------|------------------|
| Ansys 2022 R2        | Lloguer anual      | 1         | 13.903,34          | 13.903,34        |
| Microsoft Office 365 | Estudiant          | 1         | 49,67              | 49,67            |
| <b>Subtotal</b>      |                    |           |                    | <b>13.953,01</b> |

Taula 9.3. Costos de software

### 9.4. Pressupost final

| Tipus de cost    | Cost total (€)   |
|------------------|------------------|
| Enginyeria       | 12.384,00        |
| Lloguer material | 2.092,00         |
| Software         | 13.953,01        |
| <b>TOTAL</b>     | <b>28.429,01</b> |

Taula 9.4. Pressupost final



## Bibliografia

- [1] «Measurement of jet forces Description • investigation of jet forces on de-flectors • demonstration of the principle of linear momentum • four interchangeable deflectors with different deflection angles». [En línia]. Available: [www.gunt.de](http://www.gunt.de)
- [2] R. A. Pieritz, R. Mendes, R. F. A. F. da Silva, i C. R. Maliska, «CFD studio: An educational software package for CFD analysis and design», *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 12, núm. 1, p. 20-30, 2004, doi: 10.1002/cae.10055.
- [3] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, Inc, 1993.
- [4] A. Bakker, «Lectures on Applied», 2008. [En línia]. Available: [www.bakker.org](http://www.bakker.org).
- [5] S. L. B. Tolentino Masgo, «Evaluación de modelos de turbulencia para el flujo de aire en una tobera plana», *Ingenius*, núm. 22, p. 25-37, juny 2019, doi: 10.17163/ings.n22.2019.03.
- [6] J. M. O, A. v Johansson, H. M. Nagib, i M. H. Hites, «A note on the overlap region in turbulent boundary layers», 2000. [En línia]. Available: <http://www.mech.kth.se/>
- [7] M. B. Giles i N. A. Pierce, «Adjoint equations in CFD: duality, boundary conditions and solution behaviour».
- [8] «Capa Límite».
- [9] «RechAerosp\_1994\_SpalartAllmaras».
- [10] C. E. (Christopher E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge University Press, 2005.
- [11] W. K. George, «Lectures in Turbulence for the 21st Century», 2013. [En línia]. Available: [www.turbulence-online.com](http://www.turbulence-online.com)
- [12] «Técnicas experimentales de Física General Propagación de Errores».
- [13] «Cálculo de incertidumbres».

## Annex A. Formulació dels models de turbulència

La formulació matemàtica complementària ha estat extreta de la font CFD\_Online.

### A1. Model Spalart-Allmaras

- Viscositat de remolí turbulent

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi := \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla \cdot [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + C_{b2} |\nabla \tilde{\nu}|^2 \} - [C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2}] \left( \frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

On:

$$S \equiv \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$$

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$f_w = g \left[ \frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}, \quad g = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}$$

$$f_{t1} = C_{t1} g_t \exp \left( -C_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} [d^2 + g_t^2 d_t^2] \right)$$

$$f_{t2} = C_{t3} \exp(-C_{t4} \chi^2)$$

- Constants:

$$\begin{aligned} \sigma &= 2/3 \\ C_{b1} &= 0.1355 \\ C_{b2} &= 0.622 \\ \kappa &= 0.41 \\ C_{w1} &= C_{b1}/\kappa^2 + (1 + C_{b2})/\sigma \\ C_{w2} &= 0.3 \\ C_{w3} &= 2 \\ C_{v1} &= 7.1 \\ C_{t1} &= 1 \\ C_{t2} &= 2 \\ C_{t3} &= 1.1 \\ C_{t4} &= 2 \end{aligned}$$

## A2. Model SST k- $\omega$

- Viscositat cinètica de remolí

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

- Energia cinètica de turbulència

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

- Taxa de dissipació específica

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

- Coeficients i relacions auxiliars

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{C D_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}$$

$$C D_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

### A3. Model SST k-ε Standard

- Energia cinètica de turbulència

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

- Dissipació

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

- Viscositat turbulenta

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

- Producció d'energia cinètica de turbulència

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$P_k = \mu_t S^2$$

On,  $S$  és el mòdul del tensor de velocitat de deformació mitjana, definit com:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

- Efecte de la flotabilitat

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

On,  $Pr_t$  és el número de Prandtl turbulent per l'energia (0,85 per defecte) i  $g_i$  és la component del vector gravitacional.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

- Constants

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad C_{3\epsilon} = -0.33$$

## A4. Model SST k-ε Realizable

- Energia cinètica de turbulència

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

- Dissipació

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon$$

- Viscositat turbulenta

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

On:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\epsilon}}$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \epsilon_{ijk} \omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k$$

$\overline{\Omega}_{ij}$  és el tensor de velocitat de rotació mitjana vist en un marc de referència rotatiu amb velocitat angular  $\omega_k$ . Les constants  $A_0$  i  $A_s$  venen donades per:

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

- Constants

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.2$$

## Annex B. Especificacions tècniques banc d'assaig

### B1. Especificacions GUNT HM 150.08

|                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| <b>Tank</b>      | ∅ inner: 200mm              |
|                  | height: 340mm               |
| <b>Nozzle</b>    | ∅ 10mm                      |
| <b>Deflector</b> | flat surface: 90°           |
|                  | oblique surface: 45°/135°   |
|                  | semi-circular surface: 180° |
|                  | conical surface: 135°       |
| <b>Weights</b>   | 4x 0,2N                     |
|                  | 3x 0,3N                     |
|                  | 2x 1N                       |
|                  | 2x 2N                       |
|                  | 2x 5N                       |
| <b>L x W x H</b> | 400x400x880mm               |
| <b>Weight</b>    | approx. 23kg                |

Taula B1. Especificacions tècniques GUNT HM 150.08 (Font: GUNT)

### B2. Especificacions tècniques ISOIL MS 501

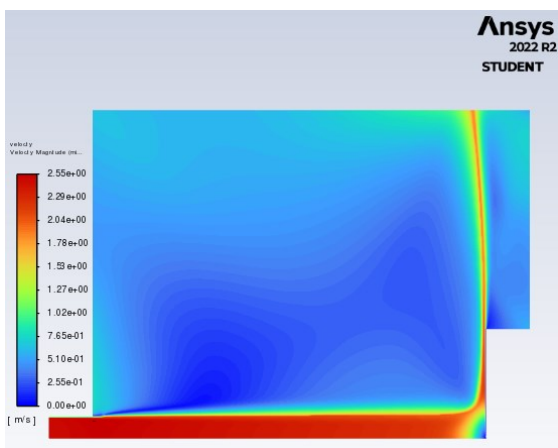
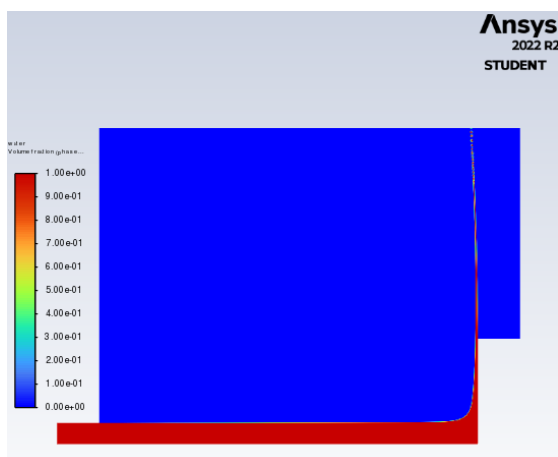
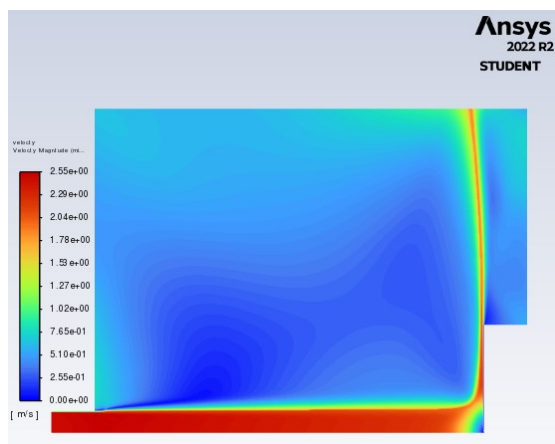
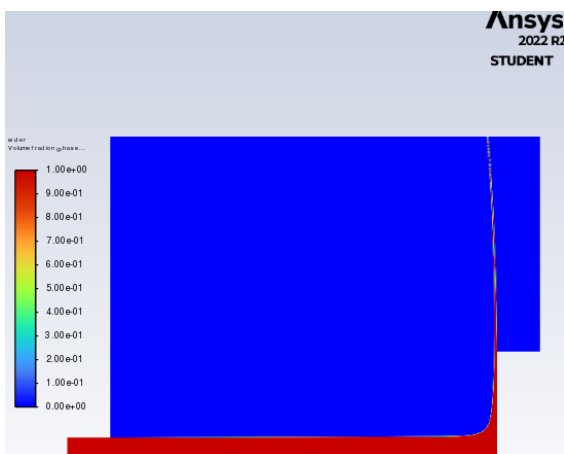
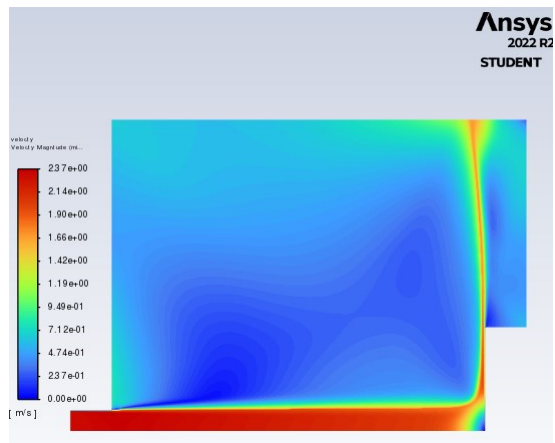
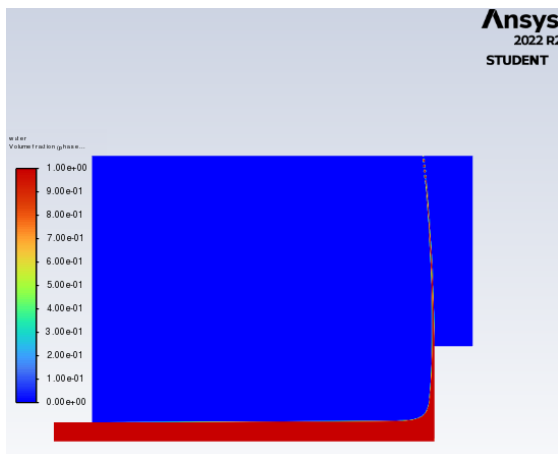
|                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| <b>Body material</b>     | AISI304/316 stainless steel |
| <b>Nominal diameters</b> | from DN 3 to DN 20          |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>Connections</b>       | Threaded / DIN11851 / Tri-clamp / Tri-clover / SMS / Flanges UNI / ANSI / JIS    |
| <b>Flow rate</b>         | 0..12.500 l / h  |
| <b>Nominal pressure</b>  | from PN 16 to PN 40  |
| <b>Coatings</b>          | Polypropylene / PTFE   |
| <b>Body</b>              | AISI304  |
| <b>Electrodes</b>        | AISI316 / Hastelloy C276 / Platinum / Tantalum / Titanium – Pressure: Up to PN40 |
| <b>Fluid temperature</b> | -20 ÷ 130 ° C  |

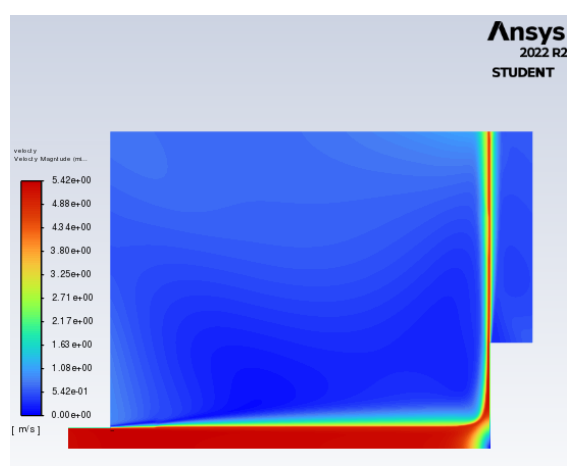
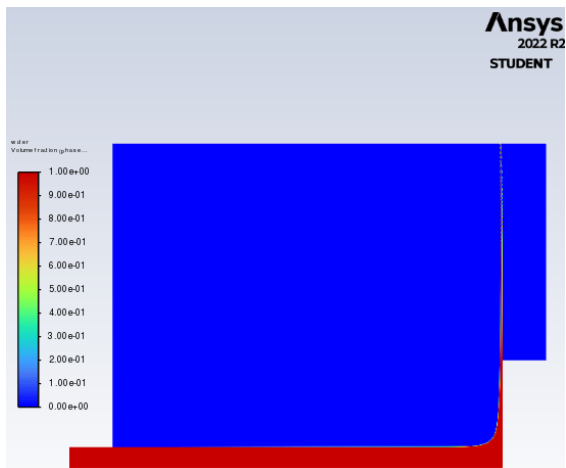
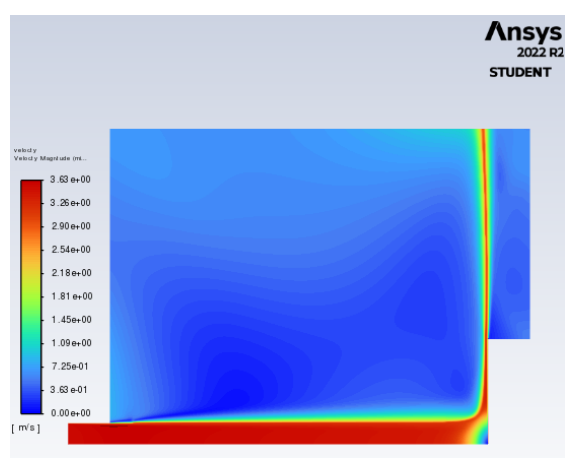
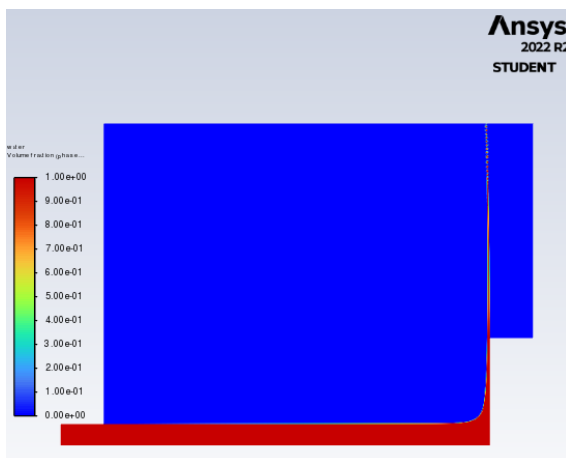
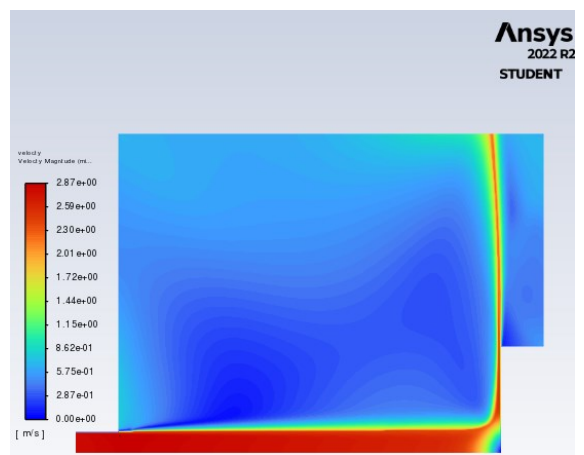
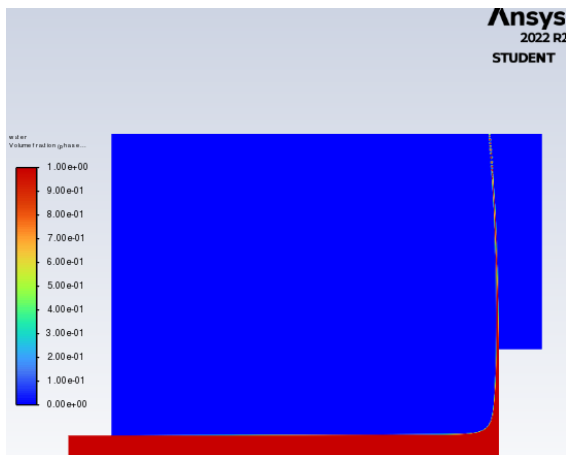
**Taula B2.** Especificacions tècniques ISOIL 501 (Font: ISOIL)

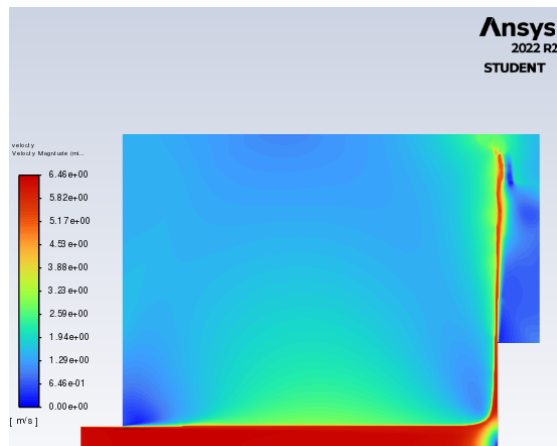
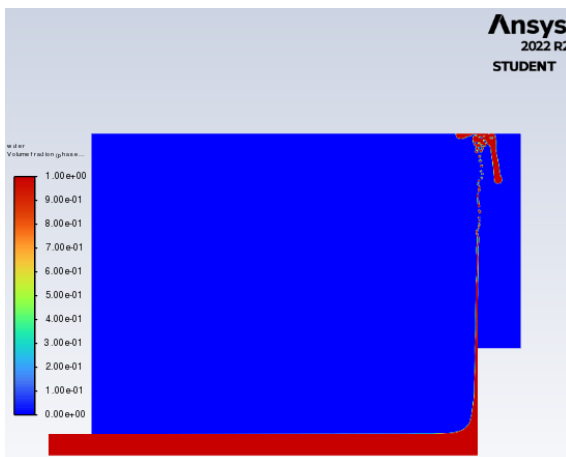
## Annex C. Imatges de resultats de la simulació

C1. Placa plana. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats.

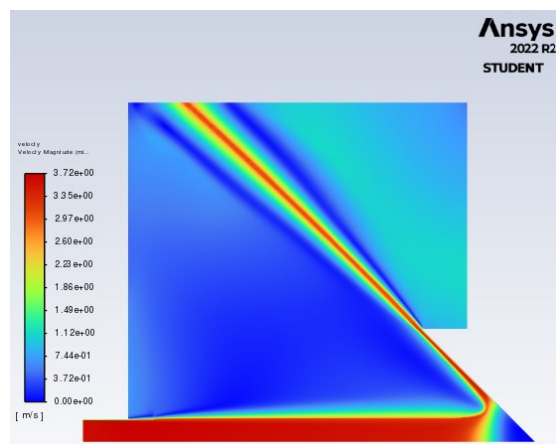
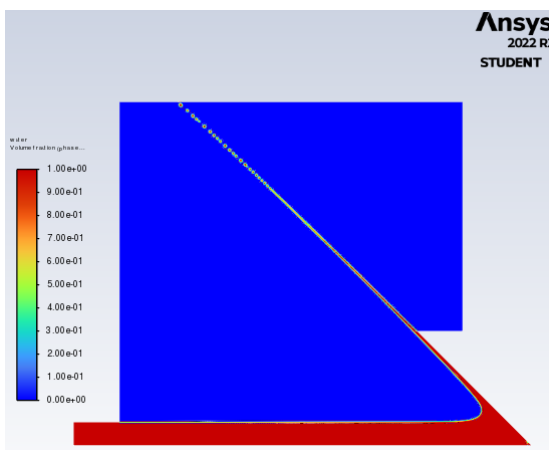
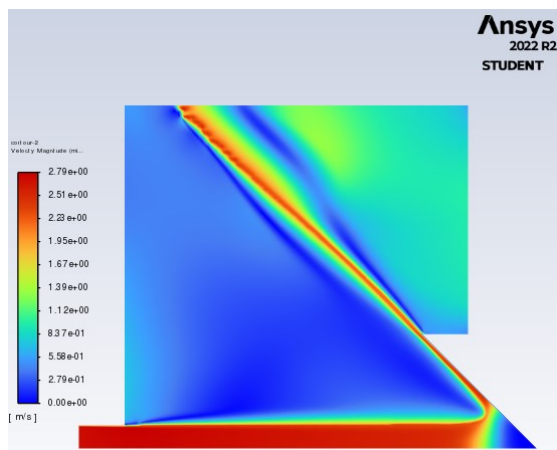
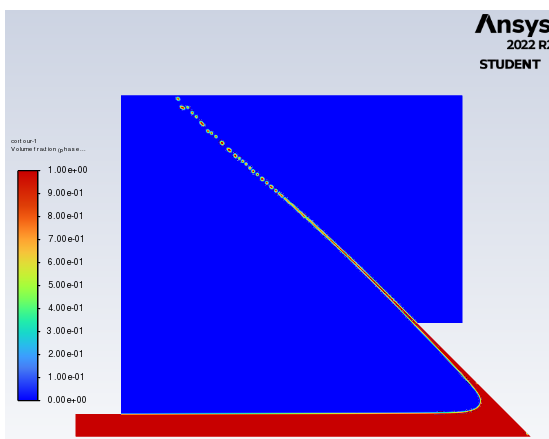


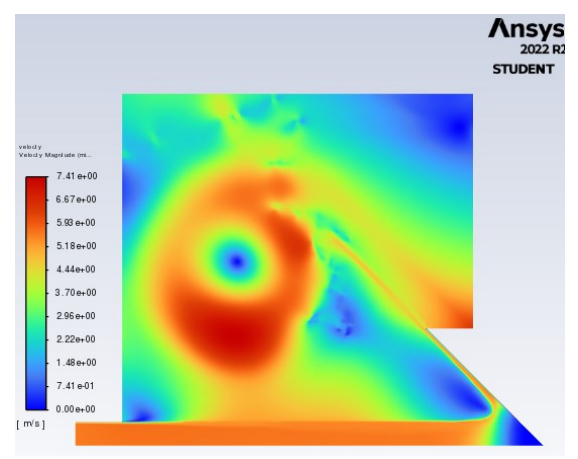
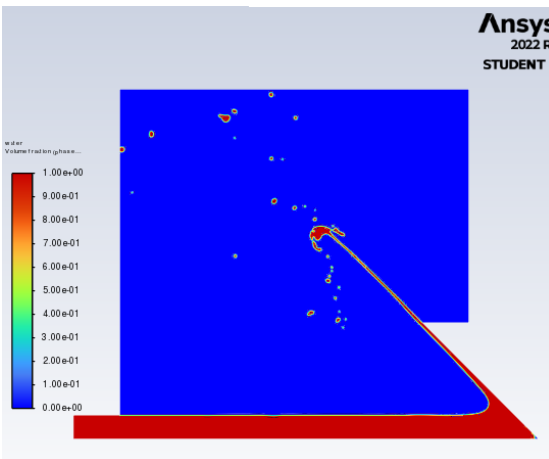
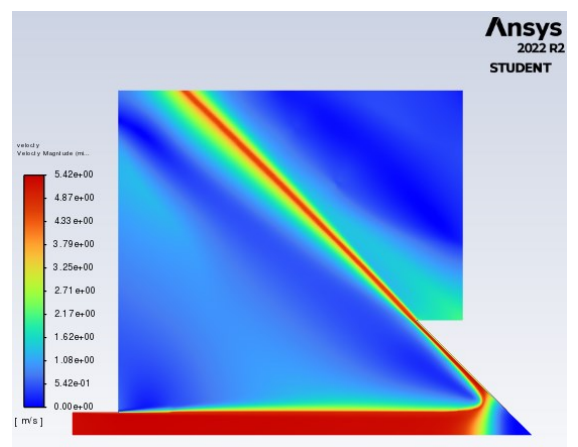
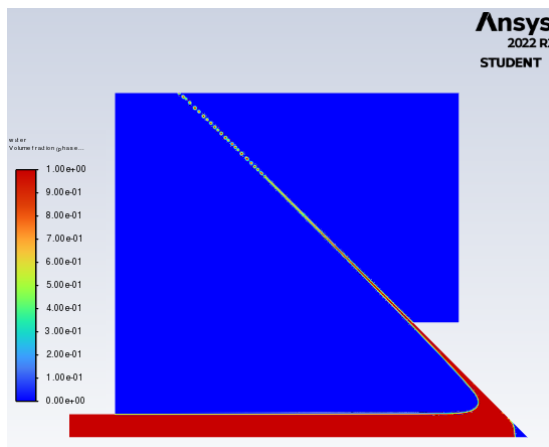
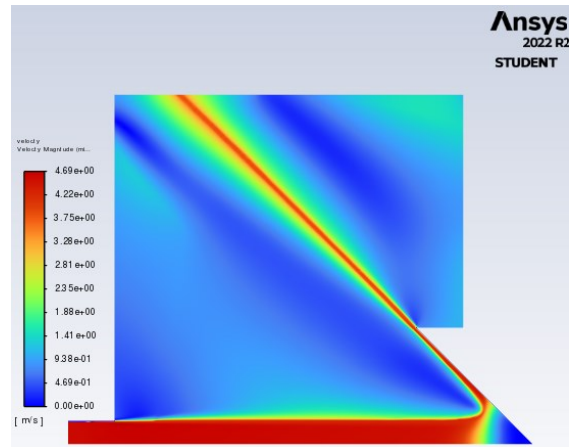
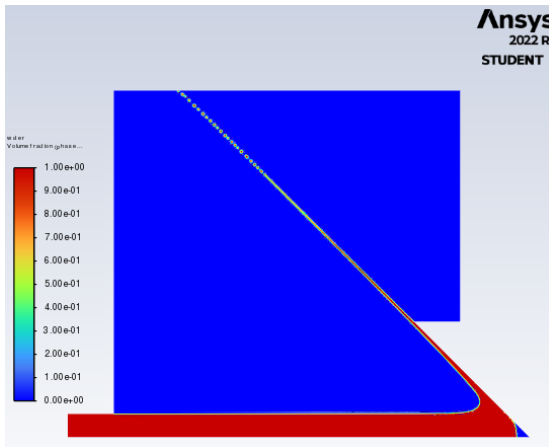


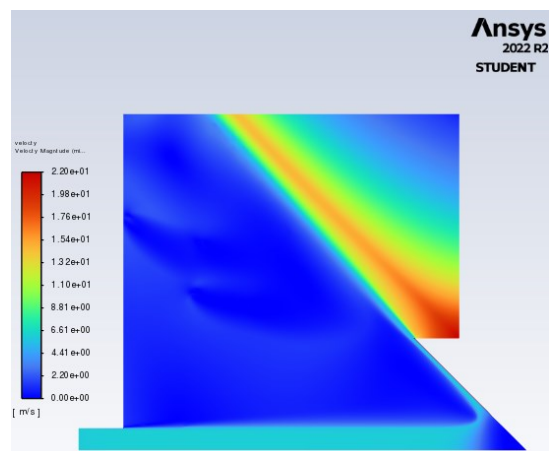
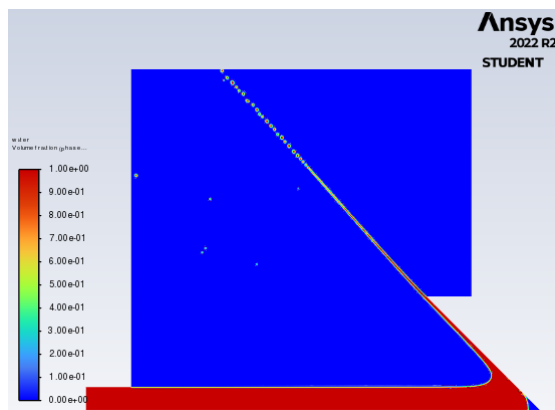
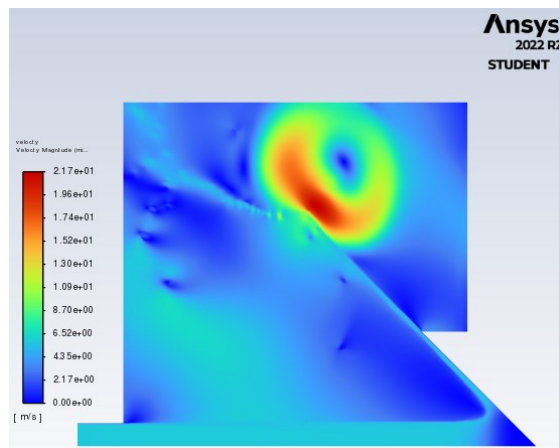
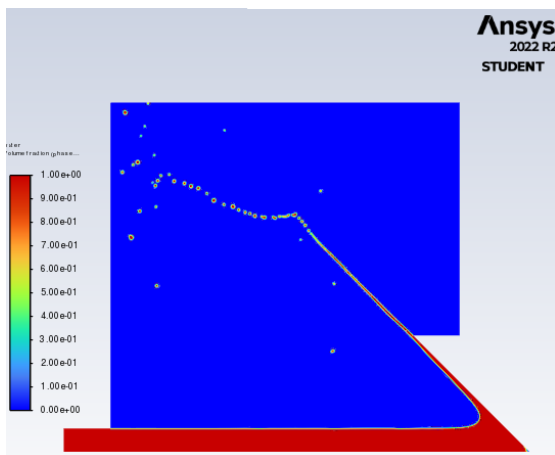




**C2. Copa cònic. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats.**







### C3. Copa hemisfèrica. A l'esquerra, el volum de fracció d'aigua, a la dreta les velocitats.

