



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Estudi numèric-experimental de la interacció fluid-estructura d'un cilindre sota un flux d'aire

**Document:**

Memòria

**Autor:**

Pau Canals Campoy

**Director - Codirector:**

Lluís Gil Espert - Roberto Castilla López

**Titulació:**

Grau en Enginyeria en Vehicles Aeroespacials

**Convocatòria:**

Pròrroga, 2022

TREBALL DE FI D'ESTUDIS

# Resum

L'estudi de la interacció fluid-estructura (FSI) d'un cilindre circular recte i elàstic disposat en vertical i en voladís sotmès a flux d'aire creuat constant i uniforme s'ha realitzat tant experimentalment com numèricament amb l'objectiu principal de validar el model numèric en base a les mesures experimentals.

Primerament, l'estudi experimental s'ha realitzat en el túnel de vent del laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'ESEIAAT. Aquest s'ha basat en el processament d'imatges obtingudes de la gravació de vídeos gravats a càmera super-lenta considerant sis velocitats diferents del flux d'aire. La finalitat del processament de les imatges ha sigut el de captar el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre (de niló Ertalon) en la direcció del flux d'aire i en el transcurs del temps per tal d'obtenir en cada cas la seva posició d'equilibri, l'amplitud d'oscil·lació, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació. Addicionalment, en l'experimentació s'ha observat el fenomen de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV), resultant en un augment substancial de l'amplitud d'oscil·lació del cilindre en l'instant en que es compleix la condició de ressonància en el qual la freqüència d'oscil·lació del cilindre s'igualava amb la seva freqüència natural. Tot i així, aquesta amplitud ressonant no ha resultat significativament a causa del gran amortiment estructural del niló.

En segon lloc, l'estudi numèric s'ha dut a terme utilitzant l'eina solids4Foam d'OpenFOAM, que permet realitzar anàlisis d'interacció fluid-estructura. Atribuïnt per al sòlid un model de geometria lineal juntament amb la llei elàstica lineal de Hooke i per al fluid un model per a flux incompressible, transitori i turbulent s'han realitzat dues tandes de simulacions numèriques: en les primeres considerant les propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica i en les segones considerant les propietats obtingudes experimentalment per al material de niló Ertalon. La diferència principal existent ha estat en el valor del mòdul de Young del material, que segons la fitxa tècnica és de 3300 MPa i segons l'assaig a tracció efectuat és de 741 MPa.

Segons la comparació entre resultats experimentals i numèrics, s'ha conclòs que a causa de limitacions en el model numèric i concretament en el model del sòlid, aquest no es capaç de reproduir correctament el que succeeix en la realitat experimentalment. En les simulacions el cilindre no es manté en una posició d'equilibri i oscil·la respecte aquest punt amb una petita amplitud (tal com esdevé experimentalment) sinó que en cada oscil·lació torna a la seva posició inicial. Per tant, no ha sigut possible validar acuradament el model numèric. Tot i així, segons el model numèric utilitzat considerant les propietats físiques i mecàniques obtingudes experimentalment per al niló Ertalon, algunes de les comparacions han resultat relativament similars, indicant que aquestes són les propietats adequades per al material en el cas d'estudi i que en principi l'únic problema existent és a causa de la limitació ja explicada del model numèric.

# Abstract

Fluid-structure interaction (FSI) study between an elastic and straight circular vertical cantilevered cylinder and a constant and uniform cross airflow has been performed experimentally and numerically mainly in order to validate the numerical model based on the experimental measurements.

First of all, the experimental study has been performed on the wind tunnel of the ESEIAAT's Fluid Mechanics Department. This study has been based on image processing obtained from videos recorded in slow motion considering six different velocities for the airflow. The main objective of the image processing has been the cylinder's free end displacement capture (of nylon Ertalon material) in the airflow direction and during time in order to obtain in each case its equilibrium position, oscillation amplitude, bending angle and oscillation frequency. Additionally, during the experimentation the vortex induced vibration (VIV) phenomena has been observed by a substantial increase in the cylinder's oscillation amplitude at the point where resonance condition is accomplished by an approximation of the cylinder's oscillation frequency with its natural frequency. However, this resonant amplitude has not been significant because of nylon's great damping factor.

Secondly, the numerical study has been done by using an OpenFOAM toolbox called solids4Foam, capable to perform fluid-structure interaction analysis. Considering a linear geometry model together with the linear elastic Hooke's law for the solid and an incompressible, transitory and turbulent model for the fluid, two simulation rounds have been executed: the first ones considering technical datasheet physical and mechanical properties and the second ones considering experimental properties obtained for the nylon Ertalon material. The principal difference has been in the material Young's modulus because according to the technical datasheet is of 3300 MPa and according to the tensile test performed is of 741 MPa.

In agreement with the comparison between experimental and numerical results, it has been concluded that due to limitations in the numerical model and in particular in the solid model, the numerical model is not capable to reproduce correctly what happens in reality experimentally. The explanation to this fact is that in the simulations the cylinder instead of staying in its equilibrium position and oscillate around this point with low amplitude (such as it results experimentally) it returns in every oscillation to its initial position. Then, it has not been possible to validate accurately the numerical model. However, according to the numerical model where physical and mechanical properties obtained experimentally have been considered, some of the comparisons have resulted similar showing that these properties are the appropriate ones for the material in the study case and that in principle the only problem is due to the numerical model limitation explained.

# Índex

<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>1</b>
1.1	Objecte . . . . .	1
1.2	Abast . . . . .	1
1.3	Requeriments . . . . .	2
1.4	Justificació . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisió de l'estat de l'art</b>	<b>4</b>
2.1	Estudis experimentals d'estructures flexibles en voladís . . . . .	4
2.2	Estudis numèrics d'estructures flexibles en voladís . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>9</b>
3.1	Estudi experimental . . . . .	9
3.2	Estudi numèric . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Estudi experimental</b>	<b>13</b>
4.1	Descripció general del cas d'estudi . . . . .	13
4.2	Preparació de l'estudi experimental al túnel de vent . . . . .	14
4.2.1	Muntatge del dispositiu d'encastament del cilindre . . . . .	15
4.2.2	Mesura de la velocitat al túnel de vent . . . . .	16
4.2.3	Mètode d'obtenció de les dades experimentals . . . . .	17
4.3	Estudis experimentals inicials amb cilindres de diferents materials . . . . .	18
4.3.1	Dades experimentals a obtenir mitjançant el processament de les imatges . . . . .	20
4.3.2	Processament d'imatges . . . . .	22
4.3.3	Resultats experimentals i decisió del material del cilindre a estudiar . . . . .	30

4.4	Estudi experimental definitiu amb el cilindre de niló Ertalon . . . . .	33
4.4.1	Càlcul de la densitat i el mòdul de Young experimentals . . . . .	37
4.4.2	Anàlisi adimensional de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Estudi numèric</b>	<b>48</b>
5.1	Estructura del cas d'estudi amb solids4Foam . . . . .	48
5.2	Pre-processament . . . . .	49
5.2.1	Creació de les malles . . . . .	49
5.2.1.1	Sòlid . . . . .	49
5.2.1.2	Fluid . . . . .	51
5.2.2	Selecció dels models . . . . .	56
5.2.2.1	Sòlid . . . . .	56
5.2.2.2	Fluid . . . . .	58
5.2.2.3	Turbulència . . . . .	59
5.2.3	Metodologia de resolució de la interacció fluid-estructura . . . . .	60
5.2.4	Condicions inicials i de contorn . . . . .	63
5.2.4.1	Sòlid . . . . .	63
5.2.4.2	Fluid . . . . .	64
5.2.4.3	Turbulència . . . . .	66
5.3	Processament de les simulacions numèriques . . . . .	67
5.3.1	Paràmetres generals de les simulacions numèriques . . . . .	67
5.3.2	Instruccions per a executar les simulacions numèriques . . . . .	70
5.4	Càlcul analític previ de la posició d'equilibri i l'angle de flexió . . . . .	71
5.5	Post-processament dels resultats numèrics . . . . .	74
5.5.1	Primeres simulacions: propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica del niló Ertalon	74
5.5.2	Segones simulacions: propietats físiques i mecàniques experimentals del niló Ertalon .	78
<b>6</b>	<b>Comparació entre els resultats experimentals i els numèrics</b>	<b>82</b>
6.1	Comparació amb les primeres simulacions: propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica del niló Ertalon . . . . .	82

6.2	Comparació amb les segones simulacions: propietats físiques i mecàniques experimentals del niló Ertalon . . . . .	85
<b>7</b>	<b>Resum del pressupost</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Conclusions</b>	<b>91</b>

# Llista de figures

2.1	Esquema del muntatge experimental al canal d'aigua recirculant. (a) Vista de perfil, (b) Vista en planta. (Font: <i>Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Case Study on Elastic Beam</i> [6]). . . . .	5
2.2	Muntatge experimental al canal d'aigua recirculant. (A) Presentació esquemàtica de la vista de perfil del muntatge al canal, (B) Fotografia del canal d'aigua juntament amb l'equipament necessari. (Font: <i>Experimentally investigated vortex-induced vibration of a high aspect ratio and small mass ratio circular cylinder oscillating in low reduced velocity flows</i> [7]). . . . .	6
2.3	Comparació entre la deformació total de la biga flexible en forma de T per un $Re = 42500$ i l'instant de temps $t = 6$ s. (a) Experiment amb la càmera d'alta velocitat (HSC), (b) Experiment amb el programa per a processar les imatges, (c) Numèric. (Font: <i>Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Case Study on Elastic Beam</i> [6]). . . . .	7
2.4	Esquema del domini computacional amb detalls de les condicions de contorn (Font: <i>On the fluid-structure interaction of a flexible cantilever cylinder at low Reynolds numbers</i> [9]). . . . .	8
4.1	Representació gràfica del cas d'estudi. . . . .	14
4.2	Túnel del vent del laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'ESEIAAT. . . . .	14
4.3	Dispositiu d'encastament del cilindre. . . . .	15
4.4	Encastament del cilindre pel seu extrem inferior. . . . .	15
4.5	Sistema de mesura de la velocitat al túnel de vent. . . . .	16
4.6	Sistema d'obtenció de dades experimentals mitjançant la gravació del moviment del cilindre sotmès a un flux d'aire, amb una càmera Sony RX100 IV. . . . .	18
4.7	Representació gràfica de la posició d'equilibri ( $p$ ) i l'angle de flexió ( $\theta$ ) considerant el primer fotograma del vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon sotmès a una velocitat del flux d'aire de 21 m/s. . . . .	21

4.8	Representació gràfica de la posició d'equilibri ( $p$ ), l'amplitud ( $A$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) del desplaçament en la direcció $x$ de l'extrem lliure del cilindre en el transcurs del temps. Anotació: els dos eixos no tenen assignats valors numèrics perquè la única intenció és representar gràficament les variables a obtenir mitjançant el processament d'imatges. . . . .	22
4.9	Primer fotograma obtingut per al vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon sotmès a una velocitat del flux d'aire de 21 m/s. . . . .	24
4.10	Fotogrames originals i binaritzats per als tres cilindres en estudi sotmesos a un flux d'aire amb una velocitat de 21 m/s. . . . .	26
4.11	Ampliació de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre (superior) utilitzada per a obtenir experimentalment el desplaçament del cilindre de niló Ertalon en el transcurs del temps. . . . .	27
4.12	Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en funció del temps de gravació per al vídeo del cilindre de niló Ertalon sotmès a un flux d'aire amb una velocitat de 21 m/s. . . . .	29
4.13	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat del flux d'aire per als tres cilindres en estudi. . . . .	32
4.14	Fotogrames inicials del cilindre de niló Ertalon per a les sis velocitats estudiades. . . . .	34
4.15	Representacions gràfiques del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció $x$ en el transcurs del temps per a les sis velocitats en estudi. . . . .	35
4.16	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon. . . . .	37
4.17	Massa del cilindre de niló Ertalon utilitzat en el procés d'experimentació al túnel de vent. . . . .	38
4.18	Prova experimental a tracció realitzada sobre el cilindre circular de niló Ertalon amb l'objectiu de determinar el mòdul de Young del material. . . . .	39
4.19	Diagrama tensió ( $\sigma$ ) - deformació ( $\varepsilon$ ) per al niló Ertalon. . . . .	40
4.20	Règims del flux de fluid al llarg de cilindres circulars llisos (Font: <i>Eight(y) mathematical questions on fluids and structures</i> [21]). . . . .	42
4.21	Nombre de Strouhal ( $St$ ) en funció del nombre de Reynolds ( $Re$ ). . . . .	43
4.22	Amplitud adimensional ( $A^*$ ) en color blau i freqüència adimensional ( $f^*$ ) en color vermell, en funció de la velocitat reduïda ( $U^*$ ). La línia discontinua vermella únicament indica la condició de ressonància ( $f^* = 1$ ). . . . .	45
5.1	Esquema de la creació de la malla completa del sòlid en 4 blocs editant el <i>blockMeshDict</i> . . . . .	50
5.2	Malla definitiva del sòlid (considerant la simetria del cas d'estudi) visualitzada amb ParaView. . . . .	51



5.3	Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 0 al nivell 1 editant el <i>blockMeshDict</i> . . . . .	52
5.4	Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 1 al nivell 2 editant el <i>blockMeshDict</i> . . . . .	53
5.5	Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 1 al nivell 2 justament damunt de la cara superior del sòlid editant el <i>blockMeshDict</i> . . . . .	54
5.6	Malla definitiva del fluid (considerant la simetria del cas d'estudi) visualitzada amb ParaView.	56
5.7	Esquema de resolució del mètode particionat i del monolític (Font: <i>solids4foam training</i> [26]).	62
5.8	Representació gràfica de la càrrega repartida ( $q_0$ ) sobre el cilindre i de la corresponent secció transversal. . . . .	71
5.9	Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció $x$ en el transcurs del temps, per a les sis velocitats en estudi. . . . .	75
5.10	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon. . . . .	76
5.11	Visualització amb ParaView del desplaçament ( <i>pointD</i> ) del cilindre i del camp de velocitat ( $U$ ) al seu voltant a l'instant de temps de 0,025 s per a les sis velocitats del flux d'aire estudiades.	78
5.12	Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció $x$ en el transcurs del temps, per a les sis velocitats en estudi. . . . .	79
5.13	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon. . . . .	80
5.14	Visualització amb ParaView del desplaçament ( <i>pointD</i> ) del cilindre i del camp de velocitat ( $U$ ) al seu voltant a l'instant de temps de 0,05 s per a les sis velocitats del flux d'aire estudiades.	81
6.1	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat obtingudes a partir dels resultats experimentals (color blau) i numèrics (color vermell), per al cilindre de niló Ertalon. . . . .	83
6.2	Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat obtingudes a partir dels resultats experimentals (color blau) i numèrics (color vermell), per al cilindre de niló Ertalon. . . . .	85

# Llista de taules

4.1	Materials i dimensions de les barres escollides inicialment. . . . .	19
4.2	Dimensions dels dos prototips de cilindre per als quatre materials escollits. . . . .	19
4.3	Dimensions dels tres cilindres circulars rectes a estudiar. . . . .	20
4.4	Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de niló Ertalon. . . . .	30
4.5	Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de PVC. . . . .	31
4.6	Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de metacrilat. . . . .	31
4.7	Resultats experimentals definitius del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de niló Ertalon. . . . .	36
4.8	Nombres de Reynolds ( $Re$ ) i Strouhal ( $St$ ) a les diferents velocitats del flux d'aire i freqüències d'oscil·lació del cilindre. . . . .	42
4.9	Nombres adimensionals d'interès per a l'anàlisi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV). . . . .	45
5.1	Tipus de contorn per a les cares externes de la malla del sòlid. . . . .	50
5.2	Tipus de contorn per a les cares externes de la malla del fluid. . . . .	55
5.3	Propietats físiques i mecàniques del niló Ertalon 6 SA segons la fitxa tècnica i segons els càlculs experimentals. . . . .	57
5.4	Propietats físiques de l'aire. . . . .	59
5.5	Condicions inicials i de contorn per al desplaçament total ( $D$ ) del sòlid. . . . .	63
5.6	Condicions inicials i de contorn per a la velocitat ( $U$ ) del fluid. . . . .	64
5.7	Condicions inicials i de contorn per a la pressió cinemàtica ( $p$ ) del fluid. . . . .	65
5.8	Condicions inicials i de contorn per al <i>pointMotionU</i> del fluid. . . . .	65
5.9	Càlcul de l'energia cinètica de turbulència ( $k$ ) i de la dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ). . . . .	67
5.10	Càlcul de l'increment de temps ( $\Delta t$ ) necessari segons la velocitat del flux d'aire ( $U$ ). . . . .	68
5.11	Càlcul analític de la posició d'equilibri ( $p$ ) per a les sis velocitats en estudi ( $U$ ). . . . .	73

5.12	Càlcul analític de l'angle de flexió ( $\theta$ ) per a les sis velocitats en estudi (U).	74
5.13	Resultats numèrics del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre per a una densitat de 1140 kg/m <sup>3</sup> i un mòdul de Young de 3300 MPa per al cilindre de niló Ertalon.	76
5.14	Resultats numèrics del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre per a una densitat de 1265 kg/m <sup>3</sup> i un mòdul de Young de 741 MPa per al cilindre de niló Ertalon.	79
6.1	Errors relatius entre els valors experimentals i numèrics per a la posició d'equilibri ( $\varepsilon_{r,p}$ ), l'amplitud d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,A}$ ), l'angle de flexió ( $\varepsilon_{r,\theta}$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,f}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.	84
6.2	Errors relatius entre els valors experimentals i numèrics per a la posició d'equilibri ( $\varepsilon_{r,p}$ ), l'amplitud d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,A}$ ), l'angle de flexió ( $\varepsilon_{r,\theta}$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,f}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.	86
6.3	Errors relatius entre els valors experimentals de la posició d'equilibri i els numèrics per a la posició d'equilibri més l'amplitud ( $\varepsilon_{r,p+A}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.	87
7.1	Cost total de l'estudi.	88

# Nomenclatura

A - Amplitud d'oscil·lació de l'extrem lliure del cilindre	$I_z$ - Segon moment d'inèrcia
$A^*$ - Amplitud adimensional	k - Energia cinètica de turbulència
$A_{min}$ - Mínima àrea de les cel·les de la malla (en el pla x-z)	L - Longitud del cilindre des del punt d'encastament al seu extrem lliure
b - Força volumètrica del cos per unitat de massa	$L_B$ - Longitud de la barra
$C_\mu$ - Constant de turbulència	$L_T$ - Longitud total del cilindre
$Co$ - Nombre de Courant	l - Longitud natural de l'extensòmetre
D - Diàmetre del cilindre circular	$\Delta l$ - Increment en la longitud del cilindre
$d_h$ - Diàmetre hidràulic del conducte o diàmetre del túnel de vent	$l_t$ - Escala de longitud de turbulència
$E_s$ - Mòdul de Young del sòlid	M - Nombre de Mach
F - Força de tensió	m - Massa estructural per unitat de longitud
$F_d$ - Força total sobre el cilindre causada per la pressió dinàmica del fluid	$m_s$ - Massa del cilindre
f - Freqüència d'oscil·lació de l'extrem lliure del cilindre	n - Vector normal
$f^*$ - Freqüència adimensional	$n_0$ - Vector normal inicial
$f_N$ - Freqüència natural del cilindre encastat	P - Pressió
$f_{vs}$ - Freqüència de despreniment de vòrtexs	$P_T$ - Pressió total del fluid
g - Acceleració de la gravetat	$P_{atm}$ - Pressió atmosfèrica
$h_{metanol}$ - Altura de la columna de fluid metanol	$P_d$ - Pressió dinàmica del fluid
I - Intensitat de turbulència	$P_e$ - Pressió estàtica del fluid
$I_{id}$ - Matriu identitat	$P_{metanol}$ - Pressió hidrostàtica del metanol
	p - Posició d'equilibri de l'extrem lliure del cilindre
	$p_{exp}$ - Posició d'equilibri experimental del cilindre

$(p+A)_{num}$ - Suma de la posició d'equilibri i l'amplitud numèriques del cilindre	$\mu$ - Segon paràmetre de Lamé o mòdul d'elasticitat transversal
$q_0$ - Càrrega distribuïda uniforme sobre el cilindre	$\mu_f$ - Viscositat dinàmica del fluid
$R$ - Radi del cilindre circular	$\nu_f$ - Viscositat cinemàtica del fluid
$R_g$ - Constant universal dels gasos	$\nu_s$ - Coeficient de Poisson del sòlid
$Re$ - Nombre de Reynolds	$\nu_t$ - Viscositat de turbulència
$Re_{d_h}$ - Nombre de Reynolds basat en el diàmetre hidràulic	$\xi$ - Amortiment estructural
$S$ - Superfície transversal del cilindre circular	$\rho_f$ - Densitat del fluid
$S_L$ - Meitat de la superfície lateral del cilindre circular	$\rho_{metanol}$ - Densitat del metanol
$St$ - Nombre de Strouhal	$\rho_s$ - Densitat del sòlid
$T$ - Període d'oscil·lació de l'extrem lliure del cilindre	$\rho_{s,0}$ - Densitat del sòlid inicial
$T_{amb}$ - Temperatura ambient	$\sigma$ - Tensió
$t$ - Temps	$\sigma_s$ - Tensió mecànica
$\Delta t$ - Interval de temps de la simulació	$\omega$ - Dissipació de la turbulència específica
$U$ - Velocitat del l'aire en direcció x	$\varepsilon$ - Deformació
$U^*$ - Velocitat reduïda	$\varepsilon_a$ - Error absolut
$U_{so}$ - Velocitat del so	$\varepsilon_r$ - Error relatiu
$u$ - Vector desplaçament	$\varepsilon_{r,A}$ - Error relatiu de l'amplitud d'oscil·lació
$\Delta u$ - Increment del vector desplaçament	$\varepsilon_{r,f}$ - Error relatiu de la freqüència d'oscil·lació
$u_{[m-1]}$ - Vector desplaçament a l'instant de temps anterior	$\varepsilon_{r,p}$ - Error relatiu de la posició d'equilibri
$V_s$ - Volum del cilindre	$\varepsilon_{r,p+A}$ - Error relatiu entre la posició d'equilibri experimental i la suma de la posició d'equilibri i l'amplitud d'oscil·lació numèriques del cilindre
$v$ - Vector velocitat	$\varepsilon_{r,\theta}$ - Error relatiu de l'angle de flexió
$\Delta x$ - Distància entre els elements de la malla	$\Gamma$ - Superfície de control
$\delta_r$ - Factor d'amortiment reduït	$\Gamma_0$ - Superfície de control inicial
$\epsilon$ - Tensor de deformació linealitzat	$\Omega$ - Volum de control
$\theta$ - Angle de flexió de l'extrem lliure del cilindre	$\Omega_0$ - Volum de control inicial no deformat
$\lambda$ - Primer paràmetre de Lamé	

# Capítol 1

## Introducció

### 1.1 Objecte

L'objectiu principal de l'estudi és la validació d'un model numèric realitzat amb un programari de codi obert a partir d'unes mesures experimentals obtingudes en un túnel de vent. D'aquesta manera, es realitzarà l'anàlisi experimental i numèric de la interacció fluid-estructura (FSI) d'un cilindre lleuger i elàstic amb condicions de contorn definides sotmès a un flux d'aire extern.

### 1.2 Abast

L'estudi de la interacció fluid-estructura entre el cilindre i el flux d'aire, inclourà:

- **Anàlisi de l'estat de l'art.** Breu estudi d'algunes de les tècniques utilitzades fins a l'actualitat per a dur a terme tant l'experiment com les simulacions numèriques, juntament amb els resultats obtinguts.
- **Disseny de l'experiment.** Definició de les característiques generals, les condicions de contorn i la instrumentació necessària per a mesurar les variables desitjades en l'experiment a realitzar al túnel de vent del laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT).
- **Disseny del cilindre prototip.** Definició del material, propietats i dimensions del cilindre a utilitzar en l'experimentació.
- **Realització dels experiments al túnel de vent.** Instrumentació i disposició del cilindre en el túnel de vent per tal de dur a terme correctament les mesures experimentals.
- **Modificació d'un codi obert per interacció fluid-estructura.** Determinació del pre-processament i processament necessaris per a analitzar la interacció entre el cilindre i el flux d'aire.
- **Simulació de l'experiment dissenyat amb el programari de codi obert.** Execució de la simulació dissenyada i visualització (o post-processament) dels resultats numèrics.

- **Comparació entre els resultats experimentals i el model numèric.** Procés de validació del model numèric a partir de les mesures experimentals realitzades.

Per altra banda, l'estudi no inclourà:

- **Fabricació del cilindre prototip.** El cilindre a utilitzar per a l'experimentació es comprarà d'establiments de venda de materials.
- **Disseny/fabricació dels instruments necessaris per a realitzar les mesures experimentals.** La instrumentació necessària per a realitzar l'experiment serà la disponible en la universitat o es comprarà (en cas que sigui necessari).
- **Estudi de l'error associat a les mesures experimentals.** No es realitzarà l'anàlisi de l'error ni de la propagació de l'error associat a les mesures experimentals obtingudes al túnel de vent.
- **Creació/programació dels *solvers* a utilitzar per a dur a terme la simulació numèrica.** No es programaran els *solvers* a utilitzar tant per l'anàlisi del fluid com el de l'estructura, sinó que s'utilitzaran uns de ja existents.
- **Estudi de convergència de malla.** No es durà a terme l'estudi de convergència de malla que serveix per a analitzar la qualitat de la malla creada per a les simulacions numèriques.

### 1.3 Requeriments

Per al correcte desenvolupament de l'estudi, les especificacions a complir són les següents:

- El cilindre necessari per a realitzar l'anàlisi experimental i numèric ha de ser un cilindre circular recte.
- Les dimensions i el material del cilindre escollits han de permetre que aquest sigui prou lleuger i elàstic, per tal d'observar correctament la interacció fluid-estructura.
- El flux d'aire extern ha de ser un flux creuat. És a dir, la direcció del flux d'aire ha de ser perpendicular a l'eix de simetria axial del cilindre.
- Les condicions de contorn del cilindre han de ser que aquest ha d'estar en voladís (estant fixat tan sols per un dels dos extrems). És a dir, l'extrem lliure del cilindre permetrà el desplaçament tant en la direcció del corrent d'aire com en la direcció transversal (dos graus de llibertat).
- Les mesures experimentals a obtenir han de ser les apropiades per tal de poder comparar-les adequadament amb els resultats numèrics obtinguts a partir del model numèric i d'aquesta manera extreure'n conclusions correctes.
- Per tal de simular la totalitat de la interacció fluid-estructura (FSI) es farà ús de `solids4Foam` [1] (eina per al programari de codi obert OpenFOAM).

## 1.4 Justificació

La interacció fluid-estructura (FSI) es tracta de la interacció que es dona entre una estructura deformable i el fluid que l'envolta. Les càrregues provocades pel moviment del fluid provoquen una resposta estructural que a la vegada afecta el desenvolupament del propi fluid al voltant de l'estructura [2]. D'aquesta manera, es tracta d'un problema acoblat.

Dins de la interacció fluid-estructura, l'estudi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) és de gran interès. En el cas d'una estructura cilíndrica elàstica, es tracten de les vibracions estructurals de la estructura causades per les forces fluctuants provocades pel periòdic despreniment de vòrtexs en la estela quan el flux d'aire extern flueix al voltant del cilindre. Per una banda, en direcció transversal al flux, aquestes vibracions es produeixen quan la freqüència de despreniment de vòrtexs de l'estructura (que és igual a la freqüència d'oscil·lació del cilindre) és similar o igual a la seva freqüència fonamental. Per l'altra banda, en direcció paral·lela al flux, aquestes vibracions es produeixen quan la freqüència d'oscil·lació del cilindre (que es igual al doble de la freqüència de despreniment de vòrtexs) és similar o igual a la seva freqüència fonamental. D'aquesta manera, en cas que es compleixi aquesta condició, l'amplitud de les vibracions pot arribar a ser molt elevada i provocar la fallada de l'estructura. En la realitat, aquest fenomen pot ocórrer en diverses aplicacions d'enginyeria com per exemple xemeneies, ponts o canals de petroli en alta mar, entre d'altres [2, 3, 4, 5].

En concret, l'estudi experimental centrat en un estructura cilíndrica és de gran utilitat com a base per tal de procedir a validar models numèrics i entendre el fenomen en sí. D'aquesta manera, el present estudi, centrat tant en l'anàlisi experimental com numèric d'aquest fenomen d'interacció entre el flux d'aire i el cilindre, servirà de base per tal de realitzar el procés de validació d'un model numèric i extreure les conclusions corresponents. A més a més, aquest estudi també servirà per a analitzar experimentalment les vibracions induïdes per vòrtexs, amb la finalitat principal d'observar si quan es compleixen les condicions apropiades es contempla el fenomen esmentat que resulta en un augment de l'amplitud de les vibracions de l'estructura.



## Capítol 2

# Revisió de l'estat de l'art

El cas d'una estructura o biga flexible sotmesa al flux creuat d'un fluid (ja sigui aire o aigua, per exemple) ha sigut objecte d'anàlisi tant experimental com numèric al llarg dels anys utilitzant una gran varietat de configuracions per tal d'estudiar la interacció fluid-estructura i entendre com afecten els diferents paràmetres a aquesta interacció. La majoria dels estudis duts a terme s'han centrat en l'anàlisi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV), enteses com els moviments oscil·lants de l'estructura provocats pel desprendiment de vòrtexs causats pel moviment del flux al voltant de la pròpia estructura [2, 3].

Una gran majoria de les configuracions considerades s'han basat en l'estudi de la interacció entre el fluid i el sòlid en casos en els quals l'estructura elàstica es trobava encastada pels dos extrems. Tot i així, també hi ha diversos estudis en els quals s'ha considerat el cas en el qual l'estructura elàstica es troba encastada per tan sols un dels seus dos extrems, o el que és el mateix, estant en voladís.

El present estudi es basa en l'anàlisi tant experimental com numèric d'una estructura cilíndrica circular i elàstica disposada en vertical i encastada únicament per l'extrem inferior, sotmesa a un flux d'aire perpendicular a l'eix de simetria axial del cilindre. D'aquesta manera, a continuació es presenten breument algunes de les configuracions aplicades i els resultats d'una sèrie d'articles científics similars al present estudi.

### 2.1 Estudis experimentals d'estructures flexibles en voladís

Segons l'estudi experimental de Tabatabaei et al. [6] una biga flexible en forma de T i de poliuretà es va situar en voladís en un canal d'aigua recirculant del *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering* (SKLHMRE) a la Universitat de Sichuan (SCU) de la Xina amb un flux estable i uniforme a l'entrada, per tal de captar la seva deformació en la direcció del flux d'aire. L'obtenció de dades experimentals es va realitzar amb una càmera d'alta velocitat (HSC) gravant a 1000 fps (mètode d'obtenció de dades no intrusiu) per tal de posteriorment realitzar un codi amb Python per al processament de les imatges capturades. Per a mesurar la velocitat a l'entrada es va utilitzar un velocímetre.

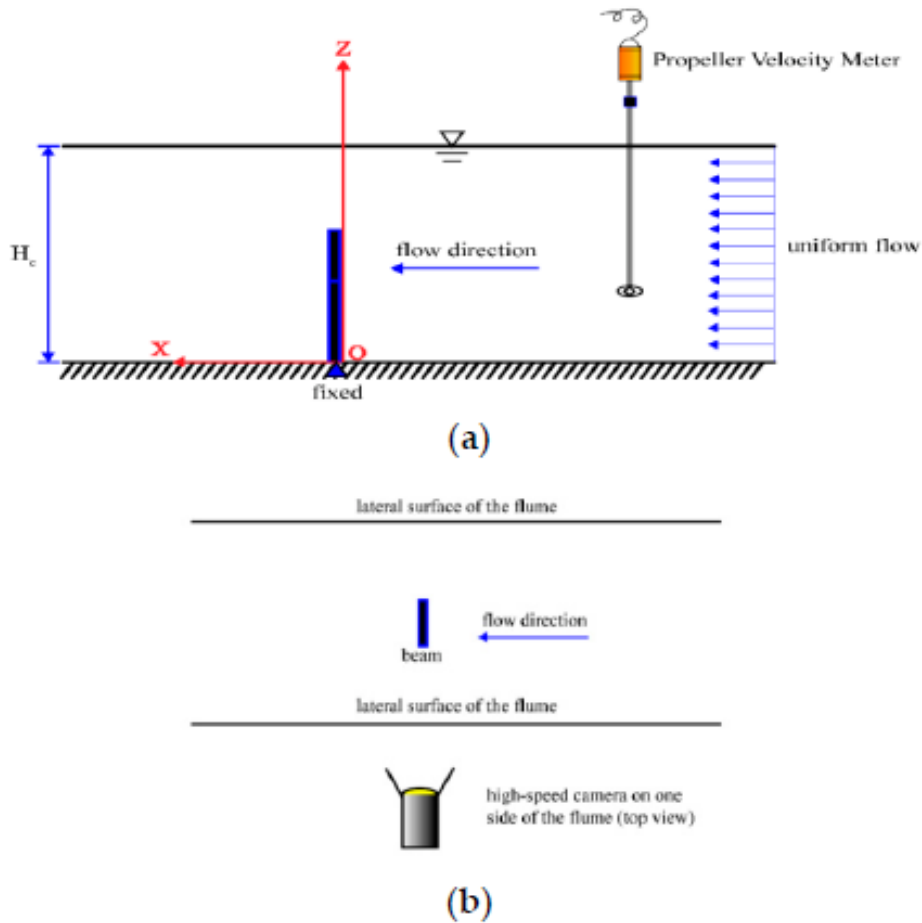


Figura 2.1: Esquema del muntatge experimental al canal d'aigua recirculant. (a) Vista de perfil, (b) Vista en planta. (Font: *Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Case Study on Elastic Beam* [6]).

El principal objectiu d'aquest estudi experimental era el d'obtenir dades experimentals relacionades amb la deformació de la biga per tal de posteriorment validar un model numèric (explicat al següent apartat 2.2).

Segons un altre estudi experimental, de Sheshtawy et al. [7] es va estudiar experimentalment la interacció fluid-estructura entre un cilindre circular encastat tan sols pel seu extrem inferior i un flux d'aigua, en un canal d'aigua recirculant. El cilindre estava disposat de manera que l'oscil·lació en el seu extrem lliure fos possible tant en direcció paral·lela com lateral (o transversal) al flux d'aigua, és a dir, amb dos graus de llibertat. Es va realitzar la investigació en un rang de flux turbulent (nombres de Reynolds d'entre  $6,38 \cdot 10^3$  i  $5,1 \cdot 10^4$ ) i per a mesurar els perfils de la velocitat a l'entrada del canal d'aigua es va utilitzar un sistema de velocimetria làser doppler. A més a més, aquest sistema calculava la intensitat de turbulència a l'entrada.

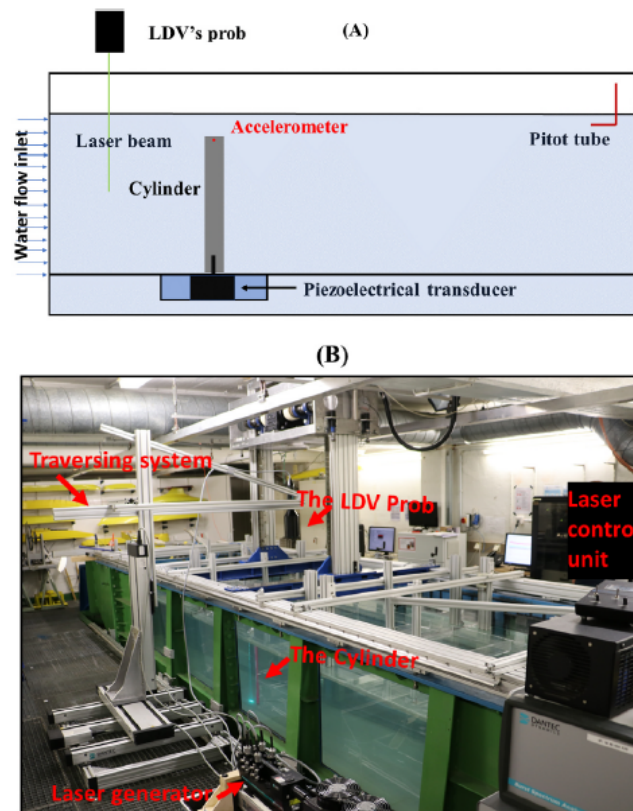


Figura 2.2: Muntatge experimental al canal d'aigua recirculant. (A) Presentació esquemàtica de la vista de perfil del muntatge al canal, (B) Fotografia del canal d'aigua juntament amb l'equipament necessari. (Font: *Experimentally investigated vortex-induced vibration of a high aspect ratio and small mass ratio circular cylinder oscillating in low reduced velocity flows* [7]).

Per a totes les diferents velocitats del flux d'aigua considerades es van calcular les acceleracions, desplaçaments i forces actuant en el cilindre tant en la direcció paral·lela com en la direcció lateral al flux. Alguns dels resultats experimentals a destacar són que es va observar que la màxima oscil·lació del cilindre va ser en la direcció lateral i igual a 0,8 vegades el seu diàmetre, moment en el qual es va observar el fenomen de ressonància del cilindre i trajectòries de Lissajous (en forma de número 8) van ser capturades. A més més, pel que fa al nombre de Strouhal universal, es va observar un comportament amb la velocitat en que aquest nombre disminueix linealment des de 0,201 (velocitat reduïda de 0,6) a 0,141 (velocitat reduïda de 5,18). Per acabar, la baixa incertesa dels valors mesurats en aquest estudi van demostrar una gran fiabilitat dels resultats experimentals obtinguts, útils per a una futura validació numèrica de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) per a un cilindre circular oscil·lant amb dos graus de llibertat.

Finalment, d'acord amb l'estudi experimental de Lee et al. [8] es va considerar un cilindre flexible de pòlidimetilsiloxà (PDMS) sotmès a un flux d'aire en un túnel de vent. En aquest cas la velocitat a l'entrada es va mesurar amb un tub de Pitot. Per a observar les oscil·lacions del cilindre es van utilitzar tècniques de processament d'imatges digitals, convertint cada imatge en una imatge binària segons un llindar de luminància determinat per l'algorisme d'Otsu. Totes aquestes imatges es van obtenir amb una càmera d'alta velocitat. Bàsicament es va procedir a determinar l'angle de flexió i el desplaçament del cilindre per a poder comparar les oscil·lacions en cada cas. Els resultats més importants i observats en aquest estudi experimental van ser

que el cilindre es flexionava fins a una certa posició i oscil·lava respecte aquesta mateixa posició, tot això sota un flux d'aire amb velocitat constant. També es va determinar segons un anàlisi de la transformada ràpida de Fourier (FFT) que a una certa freqüència l'amplitud d'oscil·lació del cilindre era més elevada que per a la resta de freqüències i, per tant, mostrava un màxim absolut. Per acabar, amb l'augment de velocitat del flux d'aire (i en conseqüència del nombre de Reynolds) en aquest experiment es va observar un augment lineal tant de l'angle de flexió mitjà com del desplaçament mitjà (que equivaldria a la posició d'equilibri del cilindre).

## 2.2 Estudis numèrics d'estructures flexibles en voladís

Segons l'estudi numèric de Tabatabaei et al. [6] (del qual l'estudi experimental ja s'ha explicat a l'apartat anterior 2.1) es va utilitzar un mètode numèric d'interacció fluid estructura (FSI) bidireccional (*two-way*) per tal de simular la deformació de l'estructura en forma de T. El sistema d'acoblament Ansys Workbench va ser utilitzat per connectar el domini del sòlid (Ansys Mechanical) i el del fluid (Ansys Fluent). En particular, per al fluid les equacions RANS amb un model de turbulència  $k-\varepsilon$  es van resoldre amb el *solver* de CFD (Ansys Fluent) i per al sòlid es va realitzar un anàlisi transitori estructural amb Ansys Mechanical. Pel que fa a la malla, es van utilitzar tetraedres i prismes amb bases triangulars per al domini del fluid i únicament tetraedres per al domini del sòlid. A més a més, es va simular un temps total de 10 s en totes les simulacions amb un increment de temps de 0,001 s, decidit havent efectuat abans estudis de refinament de la malla. Després de validar el model numèric amb els resultats obtinguts experimentalment mostrant tan sols un percentatge d'error entre els resultats experimentals i numèrics de la deformació màxima de la biga d'entre un 4%-5%, es va procedir a calcular la deformació i la tensió del cilindre per a diferents nombres de Reynolds.

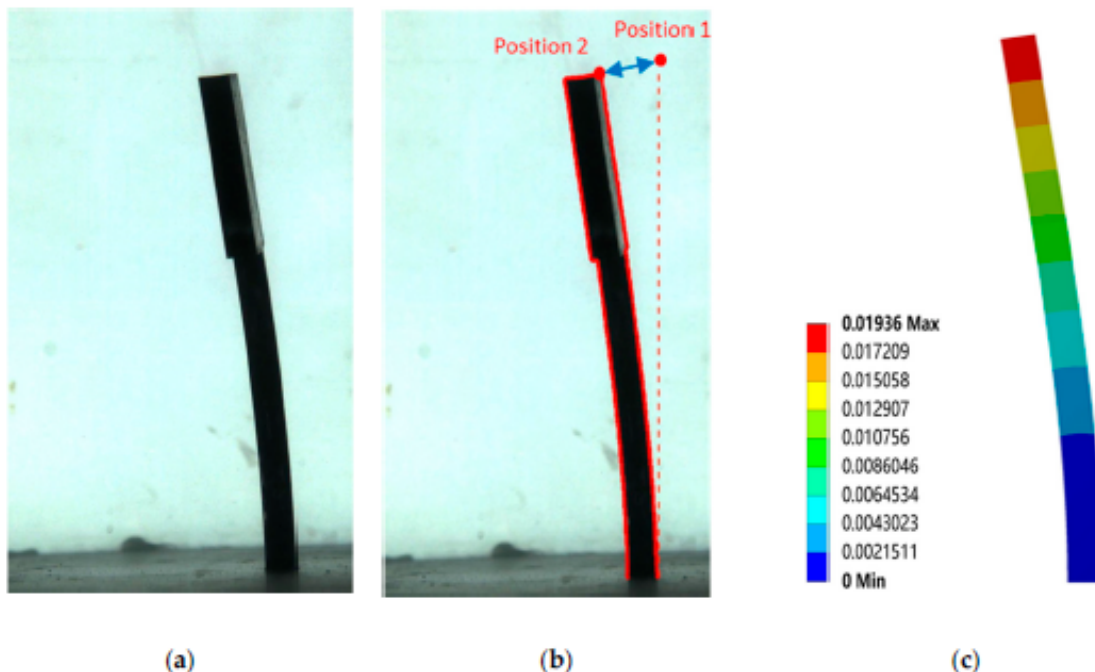


Figura 2.3: Comparació entre la deformació total de la biga flexible en forma de T per un  $Re = 42500$  i l'instant de temps  $t = 6$  s. (a) Experiment amb la càmera d'alta velocitat (HSC), (b) Experiment amb el programa per a processar les imatges, (c) Numèric. (Font: *Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Case Study on Elastic Beam* [6]).

El present cas es va validar per una velocitat a l'entrada de 0,25 m/s i en l'estudi de dues velocitats més es va observar un increment d'un 90% de la deformació del cilindre en un canvi de velocitat del flux d'aire 0,25 m/s a 0,35 m/s mentre que es va observar una disminució d'un 63% de la deformació del cilindre en un canvi de velocitat del flux d'aire de 0,25 m/s a 0,15 m/s.

Per una altra banda, conforme a l'estudi numèric de Heydari et al. [9] es va investigar numèricament la interacció fluid-estructura entre un cilindre flexible circular disposat en voladís i sotmès a un flux uniforme, en aquest cas considerant baixos nombres de Reynolds. Es va utilitzar un mètode fortament acoblat basat en les equacions tridimensionals de Navier-Stokes per al fluid i la teoria d'Euler-Bernoulli per al sòlid. En aquest cas es va examinar el comportament del cilindre variant diferents paràmetres: la velocitat reduïda, el ràtio de massa i el nombre de Reynolds.

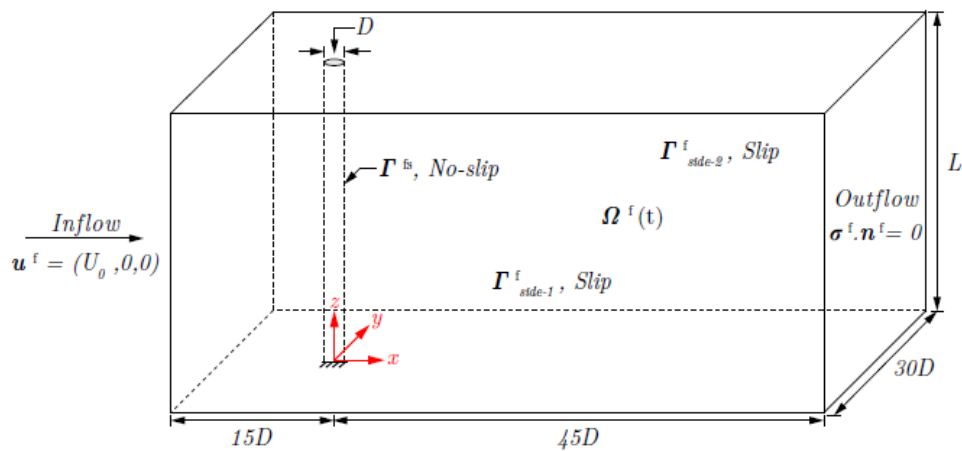


Figura 2.4: Esquema del domini computacional amb detalls de les condicions de contorn (Font: *On the fluid-structure interaction of a flexible cantilever cylinder at low Reynolds numbers* [9]).

Alguns dels resultats importants de l'estudi numèric van ser que sota unes certes condicions, el cilindre experimentava vibracions amb gran amplitud. La freqüència de les oscil·lacions coincidia amb la freqüència de les forces periòdiques del fluid en un rang particular i concret per als paràmetres del sistema, rang en el qual la freqüència de les vibracions transversals del cilindre s'igualava amb el primer mode de la seva freqüència natural, indicant l'existència del fenomen de ressonància.

Per acabar, d'acord amb l'estudi numèric de Konstantindis et al. [4] es van realitzar simulacions numèriques d'un cilindre circular experimentant vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) en la direcció del flux d'aire conjuntament amb una teoria desenvolupada per a la dinàmica de fluids. Es va observar que augmentant el nombre de Reynolds des de 100 a 250, s'incrementava 12 vegades l'amplitud pic del cilindre, tot això amb un ràtio de massa fixat i igual a 5. Atenent a la variació de l'amplitud en funció de la velocitat reduïda, tan sols es va observar una sola regió en la qual es produïen pics d'amplitud aproximadament iguals a un 1% del diàmetre del cilindre, independentment de quin fos el ràtio de massa del cilindre. Mitjançant la teoria desenvolupada van demostrar per què els pics d'amplitud, que succeeixen en el moment en el qual la freqüència de vibració del cilindre s'igualava amb la seva freqüència natural, no depenen del ràtio de massa del cilindre, també d'acord i segons succeeix en les simulacions efectuades.

## Capítol 3

# Metodologia

A fi de desenvolupar tant l'estudi experimental com l'estudi numèric de la interacció fluid-estructura d'un cilindre sotmès a un flux d'aire extern s'han seguit una sèrie de passos amb la finalitat principal d'arribar amb el major èxit possible al procés de validació del model numèric en base als resultats experimentals obtinguts. És important remarcar que en la mesura del possible els dos estudis s'han dut a terme en paral·lel de manera que es pogués avançar tot el possible per separat i alhora es pogués realitzar el corresponent contrastament entre els resultats obtinguts experimentalment i els resultats obtinguts numèricament. El fet de dur a terme els dos estudis d'aquesta manera ha permès realitzar les adaptacions, canvis i modificacions oportuns en cada cas quan ha sigut necessari per tal d'avançar adequadament i amb eficiència.

En aquest capítol es presenten tant les tècniques com les diferents eines utilitzades en els dos estudis per tal d'aconseguir l'objectiu esmentat.

### 3.1 Estudi experimental

En primer lloc, per a començar l'estudi experimental es va procedir a definir el cas d'estudi, determinant que el cilindre circular recte sotmès a un flux d'aire extern i creuat s'havia de trobar encastat per un dels seus extrems i lliure per l'altre. És a dir, disposat en voladís i en vertical.

Així mateix, també es va analitzar i estudiar la viabilitat de diferents formes i possibles aparells útils per tal d'obtenir les dades experimentals. Els tres aparells que es van plantejar van ser: una galga extensomètrica, un micròmetre d'escaneig làser d'alta velocitat (LS-5041) de la marca Keyence [10] i una càmera d'alta velocitat Sony RX100 IV [11]. Tant el micròmetre com la càmera d'alta velocitat ja s'havien fet servir anteriorment en altres experiments i es trobaven al laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT). En canvi, la galga extensomètrica s'havia de comprar. El fet d'haver de comprar la galga extensomètrica juntament amb que per tal d'observar correctament la interacció fluid-estructura el diàmetre del cilindre havia de ser relativament petit, va conduir a que aquesta opció es descartés perquè la galga hauria d'haver sigut molt petita i conseqüentment de difícil instal·lació al cilindre i difícil correcta presa de mesures. Pel que fa al

micròmetre d'escaneig làser d'alta velocitat del laboratori, després de molt de temps sense fer-se servir, els cables del propi micròmetre s'havien fet malbé i, per tant, no es trobava disponible. D'aquesta manera, la opció que es va acabar escollint va ser la de realitzar vídeos del moviment del cilindre sotmès al flux d'aire mitjançant la càmera d'alta velocitat amb l'objectiu d'efectuar un posterior processament d'imatges.

Amb l'aparell de presa de mesures experimentals decidit, l'altre aspecte important a decidir va ser el dispositiu d'encastament del cilindre per tal que aquest es trobés disposat en vertical en la secció de proves del túnel de vent. En primera instància es va pensar d'aguantar el cilindre amb el tub de Pitot present al túnel de vent i realitzar l'encastament del cilindre amb brides de manera que quedés encastat per l'extrem superior i lliure per l'extrem inferior. L'altre mètode pensat per a aconseguir l'encastament del cilindre va ser el d'obtenir un bloc massís de fusta amb la finalitat de realitzar-hi un forat d'un diàmetre igual al del cilindre i d'aquesta manera subjectar-lo per l'extrem inferior. La primera opció esmentada es va descartar perquè les vibracions del tub disposat en el túnel de vent causades pel propi flux d'aire no haguessin permès un encastament efectiu. La segona opció també va ser descartada perquè el fet de realitzar un forat al bloc de fusta hagués permès la existència d'un petit joc entre el cilindre i el forat. A més a més, aquesta segona opció tampoc hagués permès provar de manera efectiva diferents candidats de cilindre per a desenvolupar l'estudi (tenint en compte diferents diàmetres). Finalment, la decisió va ser la de muntar un dispositiu utilitzant una placa plana juntament amb dues barres d'acer inoxidable i quatre elements de subjecció en forma de L, disponibles en el laboratori del Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'ESEIAAT. Aquest dispositiu permetia assegurar correctament el cilindre per l'extrem inferior disposant el cilindre entre dos elements de subjecció i assegurant la fixació amb una clau hexagonal.

L'altre aspecte a determinar era el material i les dimensions del cilindre circular recte a estudiar. Per a poder determinar tant el material com les dimensions més òptimes per a l'estudi, es van obtenir de diferents establiments de venda de materials, quatre barres circulars rectes dels següents materials: niló Ertalon, PVC, metacrilat i acer. La barra de niló amb un diàmetre de 6 mm, el del PVC i del metacrilat de 3 mm i el de l'acer d'1,2 mm. Al disposar de barres suficientment llargues i tenint en compte que el diàmetre del túnel de vent del laboratori és de 55 cm, es van establir dos prototips per a cadascun dels materials: un amb 20 cm de longitud des del punt d'encastament fins a l'extrem lliure i l'altre amb 25 cm. Després d'efectuar unes primeres proves a diferents velocitats al túnel de vent es va decidir que la millor opció per observar millor la interacció entre el fluid i el sòlid era el segon prototip (25 cm) i es va descartar el material d'acer a causa del seu reduït diàmetre. D'aquesta manera es van escollir els cilindres de niló Ertalon, de PVC i de metacrilat amb una longitud de 25 cm, amb la finalitat de trobar el millor candidat entre aquests en base al corresponent processament d'imatges i continuar el desenvolupament de l'estudi.

Per a poder mesurar la velocitat en el túnel de vent segons la potència aplicada, es va fer ús d'un tub de Pitot acoblat a un manòmetre inclinat. D'aquesta manera amb les corresponents propietats i equacions especificades en un full de càlcul d'Excel era possible obtenir en cada cas la velocitat del flux d'aire incident segons quina fos l'altura de la columna del fluid del manòmetre, que en aquest cas era metanol. Atès que la velocitat mínima que ofereix el túnel de vent és de 6 m/s aproximadament, es va decidir que les velocitats que s'estudiarien serien des de 6 m/s a 21 m/s en intervals de 3 m/s. És a dir, un total de sis velocitats (6, 9,

12, 15, 18 i 21 m/s) per a cadascun dels tres cilindres.

En el moment de realitzar les diferents gravacions es va situar la càmera sobre un trípod i en el lateral de forma que es captés el desplaçament del cilindre en la direcció del flux d'aire. A més a més es va situar una cartolina blanca al fons i es va il·luminar la zona adequadament amb un focus per tal d'obtenir uns vídeos més nítids i s'observés clarament el contorn de cada cilindre. També es van marcar punts amb un retolador de color vermell a diferents alçades del cilindre, per a utilitzar en cas que fos necessari durant el processament de les imatges. Tot i així, aquests punts no van ser utilitzats finalment. La càmera d'alta velocitat utilitzada permetia obtenir vídeos a 250, 500 i 1000 fps. Per a cadascun dels tres cilindres i cadascuna de les sis velocitats en estudi es van realitzar vídeos a les tres freqüències d'imatge oferides per la càmera. Posteriorment, en el moment de processar els vídeos gravats, en unes primeres proves es va acabar determinant que a 1000 fps la qualitat d'imatge no era suficientment elevada i entre les freqüències d'imatge de 250 i 500 fps es va acabar seleccionant la de 500 fps per a dur a terme el processament d'imatges per la major quantitat de fotogrames oferits en un inferior interval de temps.

Per al processament de les imatges es va fer ús del programa Kdenlive [12] per a disposar de tots els fotogrames de cada gravació i d'aquesta manera amb un programa desenvolupat amb Matlab (concretament la versió R2022a) [13] poder llegir aquests fotogrames per tal de processar-los i obtenir els resultats experimentals. Bàsicament registrant el desplaçament en el transcurs del temps (i en la direcció del flux d'aire) del píxel de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre per tal d'obtenir els paràmetres experimentals de la posició d'equilibri, l'amplitud d'oscil·lació, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació del propi cilindre per a cadascuna de les sis velocitats del flux d'aire en estudi.

Una vegada decidit el niló Ertalon com material més òptim per tal de desenvolupar satisfactòriament els dos estudis, es va tornar a realitzar l'estudi experimental millorant la il·luminació de la zona d'experimentació per tal d'obtenir resultats experimentals més acurats i precisos per a la posterior comparació amb els resultats numèrics. A més a més, també es va procedir a obtenir experimentalment les propietats físiques i mecàniques del niló Ertalon, necessàries per a l'estudi numèric. Concretament, per a calcular la densitat del material va ser necessari pesar el prototip utilitzat en l'experimentació en una bàscula i per a calcular el mòdul de Young es va realitzar un assaig a tracció amb l'aparell MTS Insight Electromechanical - 10 kN per tal d'obtenir el diagrama tensió-deformació i d'aquesta manera obtenir el valor del pendent de la regressió lineal equivalent al mòdul de Young del material. Finalment, també es va realitzar un estudi adimensional de les vibracions induïdes per vòrtexs segons el llibre *Flow-Induced Vibration* de Robert D. Blevins [5] en el qual es va determinar que a una certa velocitat en la qual es compleix la condició de ressonància, el cilindre experimenta un augment substancial en la seva amplitud d'oscil·lació. Tot i així, aquesta amplitud ressonant no resulta prou significant a causa del gran amortiment estructural del niló.

## 3.2 Estudi numèric

Per a realitzar l'estudi numèric de la interacció fluid-estructura entre el cilindre circular i el flux d'aire extern es va utilitzar solids4Foam [1] que es tracta d'una eina per a OpenFOAM amb capacitats per a la mecànica



dels sòlids i per a interaccions fluid-estructura, desenvolupada principalment per Philip Cardiff i Zeljko Tukovic, amb contribucions d'altres autors, en particular de Danial Khazaei.

En aquest cas, per a configurar el cas d'estudi es va partir d'un tutorial de l'eina `solids4Foam` anomenat *linearGeometryElasticBeam*. Va ser necessari crear tant les malles per al sòlid i per al fluid, configurar tots els models i també definir les condicions inicials i de contorn del cas, d'entre les tasques més importants. En primera instància es va crear una malla sense simetria per al cas d'estudi (segons es mostra a l'Annex 2), però per a poder reduir el temps de computació es va acabar creant una malla en la qual es considerés la simetria del cas d'estudi. A més a més, es va configurar el cas numèric de manera que registrés el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en el temps i en la direcció del flux d'aire, per a poder obtenir també la posició d'equilibri, l'amplitud d'oscil·lació, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació numèriques del cilindre i d'aquesta manera poder realitzar la posterior comparació entre els resultats experimentals i els numèrics.

Per a executar les simulacions, es va utilitzar el clúster Flexicast, de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Aquest clúster consta d'un *master*/ordinador d'inici de sessió (HPE Microserver Gen 10) i de tres nodes de càlcul (Supermicro ordinadors amb 2 CPUs AMD Opteron 6100 de 16 nuclis de 21 GHz cadascun). D'aquesta manera, resulta en un total de 96 nuclis. Les tasques a Flexicast es gestionen amb el sistema SLURM i per tal d'accedir al clúster es necessari connectar-se des de les instal·lacions de la UPC o bé utilitzar el servei UPCLink [14]. Per a accedir-hi, en aquest cas es va utilitzar el servei UPCLink juntament amb el programari de codi obert PuTTY per a la plataforma de Windows (concretament la versió 0.76). Es tracta d'un emulador de terminal que suporta el protocol de xarxa SSH (*Secure SHell*) i que permet connectar-se a una màquina remota a través de la xarxa [15, 16].

Per a poder compilar correctament l'eina `solids4Foam`, en primer lloc es va instal·lar la versió d'OpenFOAM `foam-extend-4.0` (recomanada pels creadors de l'eina) al clúster i a continuació la pròpia eina `solids4Foam` es va descarregar des de Bitbucket [1] i també es va instal·lar al clúster.

Per al post-processament de resultats i la seva corresponent i correcta visualització es va fer servir l'aplicació ParaView (concretament la versió 5.6.0). ParaView és un programari de codi obert que permet la visualització i l'anàlisi de dades en 3D o mitjançant tècniques de programació [17]. A més a més, per a obtenir l'arxiu creat després d'acabar la simulació en el qual es guardava el desplaçament del cilindre en cada instant de temps, es va utilitzar FileZilla [18] per tal d'accedir a Flexicast i descarregar l'arxiu esmentat.

## Capítol 4

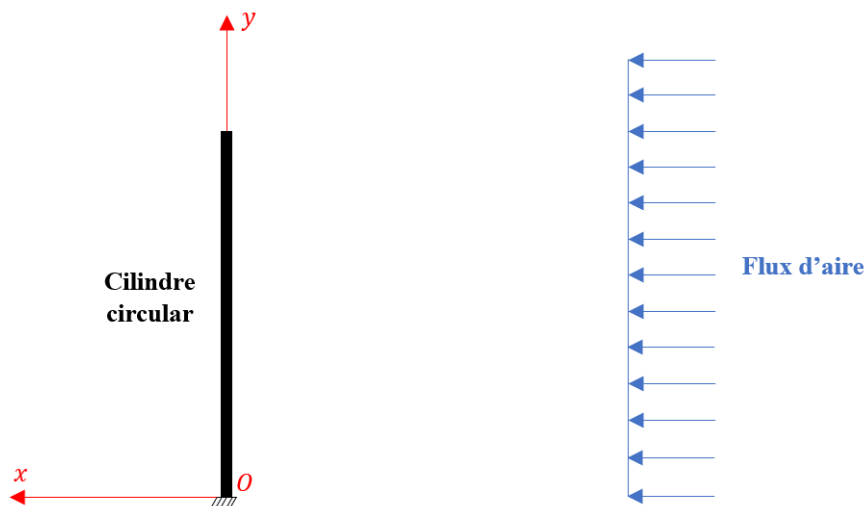
# Estudi experimental

En aquest capítol es presenta l'estudi experimental dut a terme fent ús d'una càmera d'alta velocitat per tal de captar el desplaçament en el transcurs del temps (i en la direcció del flux d'aire) de l'extrem lliure d'un cilindre elàstic, disposat en voladís i sotmès a un flux d'aire emès per un túnel de vent.

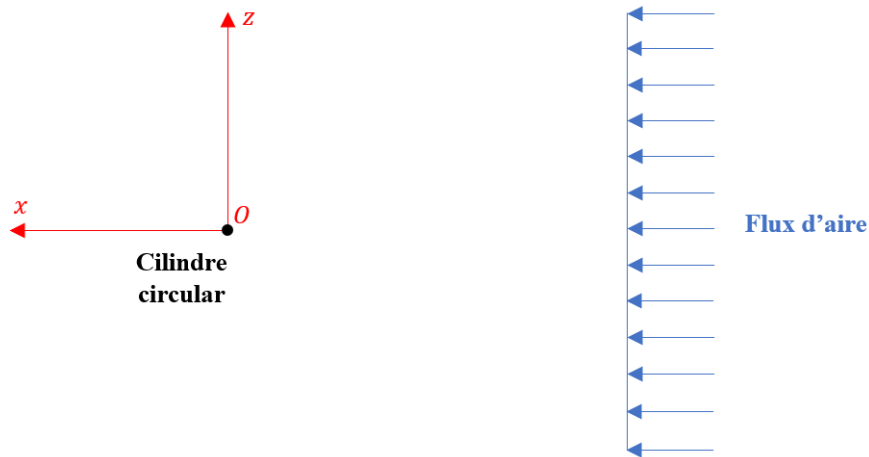
L'objectiu d'aquest mètode d'obtenció de la informació experimental ha sigut el de realitzar el corresponent processament d'imatges per tal d'obtenir les dades experimentals d'interès útils i així poder comparar-les amb les obtingudes posteriorment a partir d'un model numèric.

### 4.1 Descripció general del cas d'estudi

El cas d'estudi tracta sobre l'anàlisi de la interacció fluid-estructura d'un cilindre circular recte i elàstic disposat en vertical i en voladís (encastat únicament per l'extrem inferior) sotmès a un flux d'aire extern creuat constant i uniforme, tal com es representa en la figura 4.1.



(a) Vista de perfil.

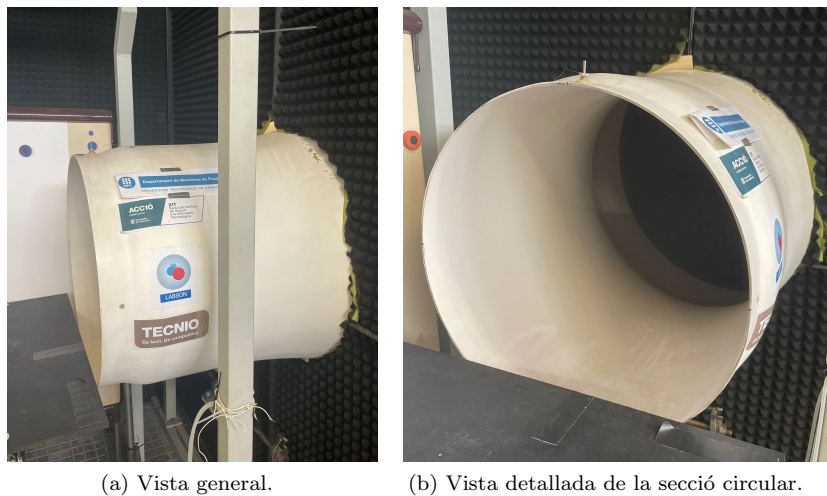


(b) Vista en planta.

Figura 4.1: Representació gràfica del cas d'estudi.

## 4.2 Preparació de l'estudi experimental al túnel de vent

L'estudi experimental s'ha dut a terme al túnel de vent present a les instal·lacions de l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT). Aquest es troba ubicat al laboratori del Departament de Mecànica de Fluids. Es tracta d'un túnel de vent amb una secció circular de 55 cm de diàmetre capaç d'oferir aproximadament una velocitat màxima de 30 m/s (el que equival a 108 km/h).



(a) Vista general.

(b) Vista detallada de la secció circular.

Figura 4.2: Túnel del vent del laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'ESEIAAT.

Per a la realització de l'estudi experimental, en primer lloc s'ha procedit a muntar un dispositiu capaç de permetre l'encastament del cilindre per l'extrem inferior de manera que aquest quedi disposat en vertical i en voladís. A continuació, ha sigut necessari poder calcular i obtenir la velocitat que ofereix el túnel de vent en cada cas (segons la potència aplicada) mitjançant un tub de Pitot i un manòmetre inclinat. Finalment, l'adquisició de les dades experimentals s'ha basat en l'obtenció de vídeos amb una càmera capaç de crear vídeos a càmera super-lenta que permeten captar el desplaçament del cilindre en la direcció del flux d'aire

durant el transcurs d'un instant de temps. Aquests diversos vídeos s'han obtingut considerant en cada cas una diferent velocitat del flux d'aire incident amb l'objectiu de realitzar el posterior i corresponent processament d'imatges per a obtenir les dades experimentals d'interès.

#### 4.2.1 Muntatge del dispositiu d'encastament del cilindre

El dispositiu d'encastament del cilindre circular consta d'una placa plana d'acer inoxidable disposada en horitzontal i dues barres també d'acer inoxidable disposades a sobre i al centre de la placa, assegurades mitjançant dos elements de subjecció en forma de L i els seus corresponents cargols i femelles.

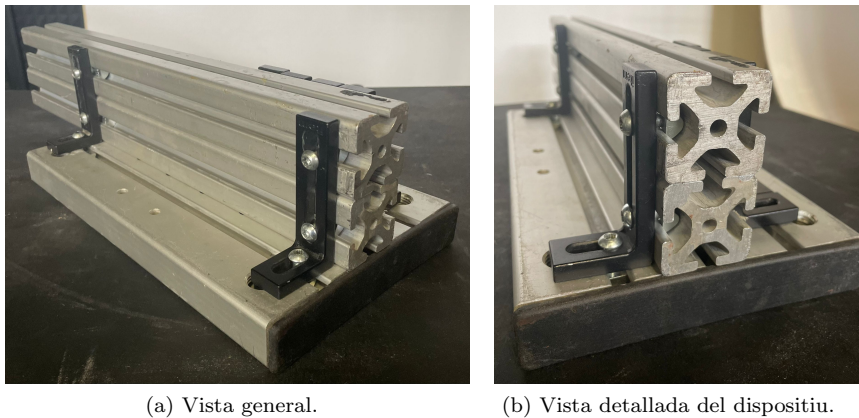


Figura 4.3: Dispositiu d'encastament del cilindre.

Amb aquest dispositiu muntat, l'encastament del cilindre circular s'ha realitzat disposant el propi cilindre entre dos altres elements de subjecció en forma de L (assegurats també tant a la placa horitzontal com a les dues barres). És important remarcar que per tal que el cilindre quedi correctament encastat pel seu extrem inferior, és necessari que un d'aquests elements en forma de L estigui lleugerament inclinat de manera que cobreixi part de la superfície inferior del cilindre i seguidament s'asseguri la seva fixació sobre la placa horitzontal i les dues barres, amb el cargol i femella corresponents (utilitzant una clau hexagonal o Allen).

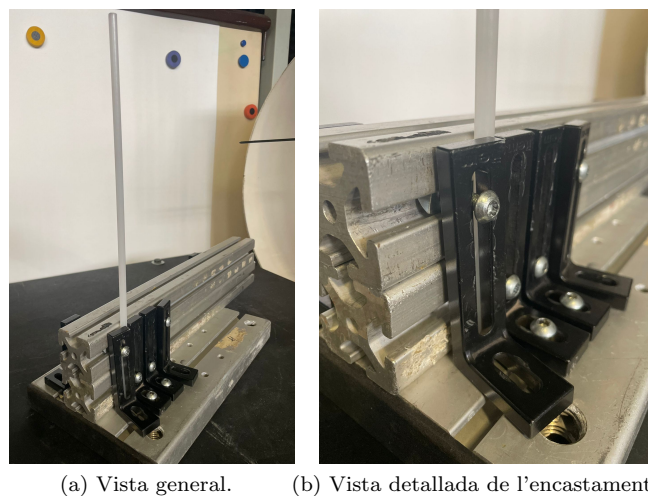


Figura 4.4: Encastament del cilindre pel seu extrem inferior.

### 4.2.2 Mesura de la velocitat al túnel de vent

Per a mesurar la velocitat del flux d'aire al túnel de vent s'ha dispostat d'un tub de Pitot i d'un manòmetre inclinat connectat a aquest, tal com es mostra en la figura 4.5. Per a incrementar o disminuir aquesta velocitat, s'ha dispostat del propi dispositiu de control de potència del túnel de vent.

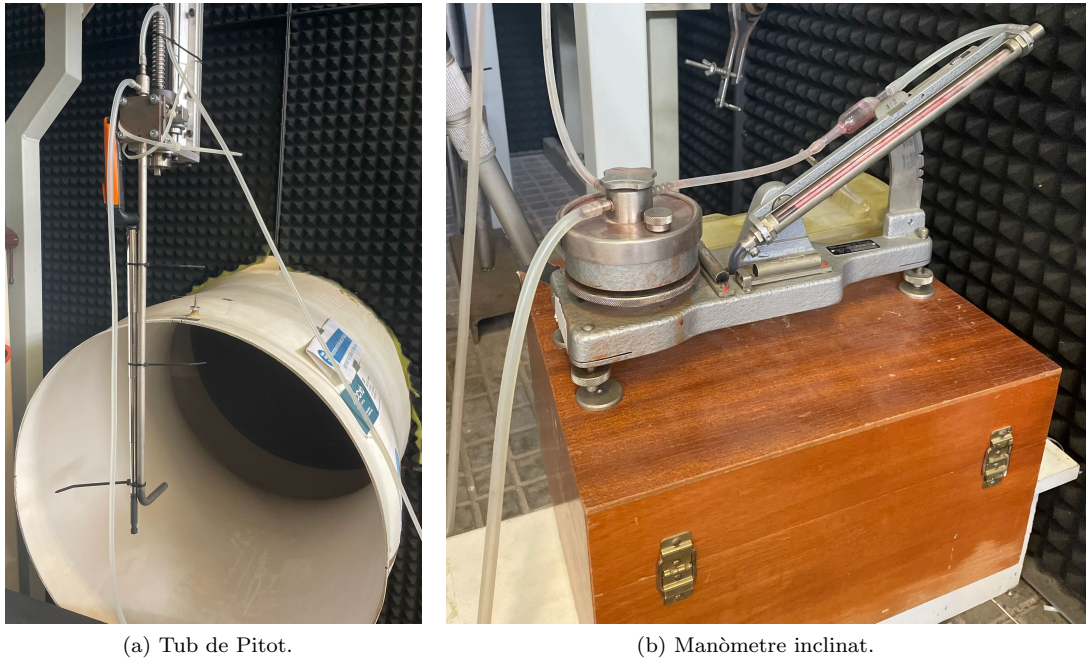


Figura 4.5: Sistema de mesura de la velocitat al túnel de vent.

En primer lloc és necessari determinar la densitat de l'aire ( $\rho_f$ ) al laboratori del Departament de Mecànica de Fluids on està situat el túnel de vent. D'aquesta manera, es necessari conèixer la temperatura ( $T_{amb}$ ) i la pressió atmosfèrica ( $P_{atm}$ ) al laboratori. Aquestes mesures s'han obtingut a partir d'un termòmetre i un baròmetre de mercuri ubicats al propi laboratori. Amb aquests dos valors i coneixent el valor de la constant universal dels gasos ( $R_g = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ ) és possible obtenir la densitat de l'aire aplicant la llei dels gasos perfectes:

$$\rho_f = \frac{P_{atm}}{R_g \cdot T_{amb}} \quad (4.1)$$

Per una banda, en el tub de Pitot s'obté el valor de la pressió total ( $P_T$ ) i el de la pressió estàtica ( $P_e$ ) del fluid. En el manòmetre connectat amb el tub de Pitot s'obté la resta entre aquestes dues pressions que es correspon amb la pressió dinàmica ( $P_d$ ) segons el principi de Bernoulli. Aquesta relació és vàlida únicament per a flux incompressible com és el cas d'estudi, ja que per al cas més extrem en que la velocitat màxima que pot oferir el túnel de vent és igual a 30 m/s, el flux d'aire segueix sent subsònic i concretament el nombre de Mach ( $M = U/U_{so}$ ) segueix estant molt per sota d'un valor igual a 0,3 [19]. Dit això, la pressió dinàmica depèn tant de la densitat com de la velocitat de l'aire ( $U$ ):

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot U^2 \quad (4.2)$$

Per l'altra banda, en aquest manòmetre inclinat hi ha metanol, el qual augmenta o disminueix la altura de la seva columna de fluid segons si augmenta o disminueix la velocitat del flux d'aire en el túnel de vent, respectivament. Coneixent la densitat del metanol ( $\rho_{metanol} = 791,8 \text{ kg/m}^3$ ), el valor de l'acceleració de la gravetat ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) i l'altura de la columna de fluid metanol ( $h_{metanol}$ ) que s'obté de la lectura en el propi manòmetre dividida entre 2 (ja que està inclinat de manera que la relació sigui així), la pressió hidrostàtica del metanol ( $P_{metanol}$ ) es calcula a partir de la següent equació:

$$P_{metanol} = \rho_{metanol} \cdot g \cdot h_{metanol} \quad (4.3)$$

Finalment, igualant la pressió dinàmica de l'aire amb la pressió hidrostàtica del metanol, s'obté la següent expressió que permet obtenir del valor de la velocitat del flux d'aire que ofereix el túnel de vent en cada cas:

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{metanol}}{\rho_f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{metanol} \cdot g \cdot h_{metanol})}{\rho_f}} \quad (4.4)$$

Com es pot observar, la velocitat del flux d'aire varia segons quina sigui la densitat de l'aire ( $\rho_f$ ) del laboratori i segons la potència aplicada amb el dispositiu de control de potència del túnel de vent, ja que aquesta última fa variar l'altura de la columna de metanol ( $h_{metanol}$ ).

### 4.2.3 Mètode d'obtenció de les dades experimentals

L'adquisició de les dades experimentals s'ha basat en la obtenció de vídeos amb una càmera Sony RX100 IV. Selecció el mode HFR (*High Frame Rate*) en la càmera s'obtenen vídeos a càmera super-lenta amb l'opció de selecció de freqüències d'imatge de 250, 500 o 1000 fps. La qualitat de la imatge és propera al *Full HD* a 250 fps i al *HD* a 500 fps [11].

D'aquesta manera, s'han realitzat diferents vídeos a càmera super-lenta per tal de captar la deformació del cilindre en la direcció del flux d'aire durant un instant de temps, considerant en cada cas una diferent velocitat del flux d'aire incident.

Per a la gravació dels diferents vídeos, en primer lloc s'ha situat el dispositiu d'encastament juntament amb el cilindre al centre de la secció circular del túnel de vent, a una distància d'uns 20 cm respecte la secció. A continuació s'ha muntat la càmera en posició vertical damunt un trípode i s'ha situat fora de l'abast del flux d'aire en el túnel de vent, de manera que es tracti d'una tècnica d'adquisició de dades no intrusiva. La disposició d'aquest dispositiu d'enregistrament d'imatges en la zona del túnel de vent (càmera i trípode) ha sigut en el lateral de forma que s'observés correctament el desplaçament del cilindre en la direcció del flux d'aire des d'una vista de perfil del cilindre. A més a més, s'ha il·luminat la zona adequadament mitjançant un focus i s'ha disposat d'un fons de color blanc (cartolina blanca) per tal de captar correctament el moviment del cilindre amb la càmera. En la figura 4.6 es mostra la zona de gravació preparada per a l'experimentació.



Figura 4.6: Sistema d'obtenció de dades experimentals mitjançant la gravació del moviment del cilindre sotmès a un flux d'aire, amb una càmera Sony RX100 IV.

### 4.3 Estudis experimentals inicials amb cilindres de diferents materials

Per tal de dur a terme l'estudi experimental, en primer lloc s'ha fet recerca d'una sèrie de materials a diferents establiments de venda de materials, suficientment elàstics com per permetre observar correctament la interacció fluid-estructura entre el flux d'aire i el propi cilindre. L'objectiu de buscar i escollir diferents materials ha sigut el de trobar el millor candidat entre aquests de manera que s'observi correctament el desplaçament mitjançant els vídeos realitzats per a l'estudi experimental, però, a la vegada, sense que aquest desplaçament sigui excessiu i més aviat el mínim possible per tal que l'estudi numèric sigui satisfactori.

D'aquesta manera, de l'establiment Servei Estació s'ha aconseguit un total de quatre materials en forma de barra/varilla circular amb les dimensions de la taula 4.1.

Taula 4.1: Materials i dimensions de les barres escollides inicialment.

Material	Dimensions	
	Longitud de la barra ( $L_B$ ) [cm]	Diàmetre (D) [mm]
Niló Ertalon	100	6
PVC	200	3
Metacrilat	100	3
Acer (corda de piano)	100	1,2

Al disposar d'un total de quatre barres amb una longitud suficientment gran, s'ha procedit a obtenir dos tipus de prototip per a cada un dels materials mostrats a la taula 4.1 per tal d'analitzar-ne el comportament al túnel de vent i decidir-ne un per tal de desenvolupar l'estudi. En aquest cas, per a cada material s'ha obtingut un prototip amb una longitud ( $L$ ) des del punt d'encastament fins a l'extrem lliure del cilindre de 20 cm (prototip 1) i un altre prototip amb una longitud de 25 cm (prototip 2). Tenint en compte que en el dispositiu d'encastament la longitud des de la part inferior on es recolza el cilindre fins la zona superior on es produeix l'encastament és de 8 cm, s'ha hagut d'obtenir en cada cas un cilindre amb una longitud total ( $L_T$ ) de 28 cm per al prototip 1, i un cilindre amb una longitud total de 33 cm per al prototip 2. En la figura 4.4 es pot observar clarament la diferència entre la longitud total ( $L_T$ ) i la longitud ( $L$ ) del cilindre. Per tal d'aconseguir els dos prototips per a tots els materials a partir de les barres circulars aconseguides d'un establiment de venda de diferents materials, s'han tallat totes les barres amb una serra amb les dimensions corresponents (mostrades a la taula 4.2) i s'han llimat els extrems tallats amb una lima i paper de vidre.

Taula 4.2: Dimensions dels dos prototips de cilindre per als quatre materials escollits.

	Dimensions	
	Longitud total ( $L_T$ ) [cm]	Longitud (L) [cm]
Prototip 1	28	20
Prototip 2	33	25

Amb un total de vuit cilindres (dos prototips per a cadascun dels quatre materials) s'han realitzat proves al túnel de vent augmentant la velocitat del flux d'aire incident amb l'objectiu d'observar el comportament de tots ells. A partir d'aquestes proves s'ha conclòs que per tal de captar correctament amb la càmera el moviment dels cilindres sotmesos al flux d'aire, el prototip 2 és el més adequat per a cadascun dels quatre materials ja que mostra una major deformació, important en el moment de processar correctament i amb major precisió les imatges obtingudes. Així mateix, s'ha decidit que el material d'acer no és una bona opció a causa del reduït diàmetre i conseqüentment a causa de la difícil observació del seu moviment amb la càmera. Aleshores, la decisió després d'aquestes primeres proves ha sigut la de continuar l'estudi amb el prototip 2 per a tres materials (niló Ertalon, PVC i metacrilat), tal com es pot observar en la taula 4.3.



Taula 4.3: Dimensions dels tres cilindres circulars rectes a estudiar.

Material	Dimensions (prototip 2)		
	Longitud total ( $L_T$ ) [cm]	Longitud (L) [cm]	Diàmetre (D) [mm]
Niló Ertalon	33	25	6
PVC	33	25	3
Metacrilat	33	25	3

Amb els tres cilindres a estudiar ja decidits s'ha procedit a realitzar els vídeos a diferents velocitats per tal de realitzar-ne el consegüent i corresponent processament d'imatges. D'aquesta manera, s'han realitzat vídeos per als tres cilindres a sis velocitats diferents i a més a més en cada cas amb les tres freqüències d'imatge capaç d'oferir la càmera, que són 250, 500 i 1000 fps. Les velocitats del flux d'aire que s'han considerat han sigut des dels 6 m/s als 21 m/s en increments de 3 m/s. El valor de velocitat del flux d'aire de 6 m/s ha sigut escollit com a punt de partida perquè es la mínima velocitat que el túnel de vent és capaç d'oferir. D'aquesta manera s'han obtingut un total de 54 vídeos (18 per a cada material en estudi, ja que per a cadascuna de les 6 velocitats s'han realitzat 3 vídeos).

Amb tots els vídeos enregistrats, s'ha procedit a valorar la freqüència d'imatge més òptima oferida per la càmera en el moment de realitzar el processament d'imatges en termes de resolució de les imatges i número de fotogrames obtingut en cada cas. D'aquesta manera, després de realitzar unes primeres proves a l'hora de processar les imatges, s'ha decidit que a 1000 fps la resolució és massa baixa com per interpretar correctament i amb precisió el moviment de l'extrem del cilindre. Havent descartat l'opció dels vídeos gravats a 1000 fps, s'ha valorat entre la resta de vídeos obtinguts a 250 i 500 fps. Com que per a les dues freqüències d'imatge la resolució és suficientment elevada i s'interpreta correctament el cilindre en cada fotograma, s'han acabat escollint els vídeos gravats a 500 fps per tal de dur a terme el processament d'imatges. Aquesta decisió ha estat motivada per ser una freqüència d'imatge més elevada i d'aquesta manera a 500 fps s'obté una major quantitat de fotogrames que permeten captar en cada cas el moviment del cilindre amb un inferior interval de temps. En tots els vídeos gravats a 500 fps s'ha obtingut un total de 948 fotogrames en cada cas, ja que la càmera per defecte grava vídeos d'1,9 segons aproximadament en la realitat, tenint en compte aquesta freqüència seleccionada.

En definitiva, el processament d'imatges s'ha realitzat per als vídeos enregistrats a 500 fps, per a les 6 velocitats en estudi (6, 9, 12, 15, 18 i 21 m/s) i per a cadascun dels tres materials (niló Ertalon, PVC i metacrilat). El que és equivalent a un total de 18 vídeos.

#### 4.3.1 Dades experimentals a obtenir mitjançant el processament de les imatges

L'objectiu del mètode d'obtenció de dades experimentals basat en la obtenció de vídeos que captin el desplaçament del cilindre en la direcció del flux d'aire és el de processar els diferents fotogrames obtinguts per a cada vídeo i obtenir el valor de la posició d'equilibri ( $p$ ), l'amplitud de les oscil·lacions ( $A$ ), l'angle

de flexió ( $\theta$ ) i la freqüència de les oscil·lacions ( $f$ ) per a cadascun dels tres cilindres i cadascuna de les sis velocitats del flux d'aire ( $U$ ) en estudi. En aquest cas, tota aquesta informació experimental s'ha obtingut a partir del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en el transcurs del temps i, per tant, els punts de color vermell marcats amb un retolador permanent cada 5 cm des de l'extrem superior al llarg dels tres cilindres (segons es pot observar en la figura 4.7) finalment no han sigut utilitzats.

Tal com es representa gràficament en les figures 4.7 i 4.8, la posició d'equilibri ( $p$ ) és el punt respecte el qual l'extrem lliure del cilindre oscil·la amb una amplitud ( $A$ ) en la direcció  $x$ . D'aquesta manera, el desplaçament màxim de l'extrem lliure del cilindre en la direcció  $x$  i en el transcurs del temps, es tracta de la suma entre la posició d'equilibri i l'amplitud. Pel que fa a l'angle de flexió ( $\theta$ ), la seva tangent es correspon amb la divisió entre el desplaçament mitjà en la direcció  $x$  de l'extrem lliure del cilindre (catet oposat, en aquest cas anomenat posició d'equilibri) i el desplaçament mitjà en la direcció  $y$  de l'extrem lliure del cilindre (catet adjacent) respecte l'origen de coordenades. Per acabar, la freqüència d'oscil·lació es tracta de la inversa del període existent entre dos punts equivalents o similarment equivalents (en aquest cas els màxims) de l'oscil·lació respecte la posició d'equilibri [20].

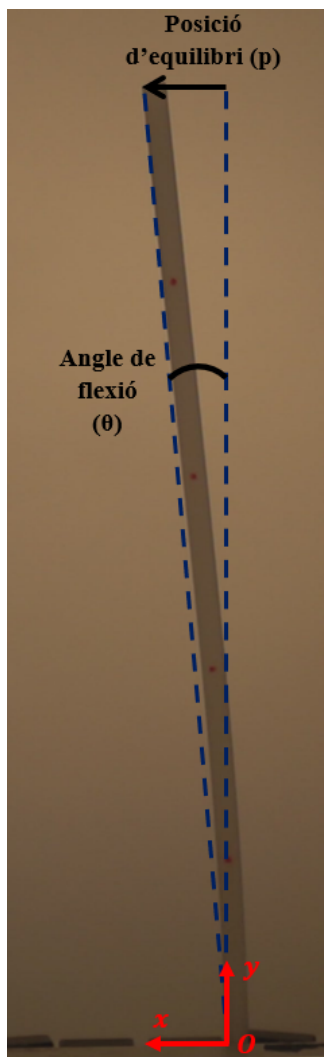


Figura 4.7: Representació gràfica de la posició d'equilibri ( $p$ ) i l'angle de flexió ( $\theta$ ) considerant el primer fotograma del vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon sotmès a una velocitat del flux d'aire de 21 m/s.

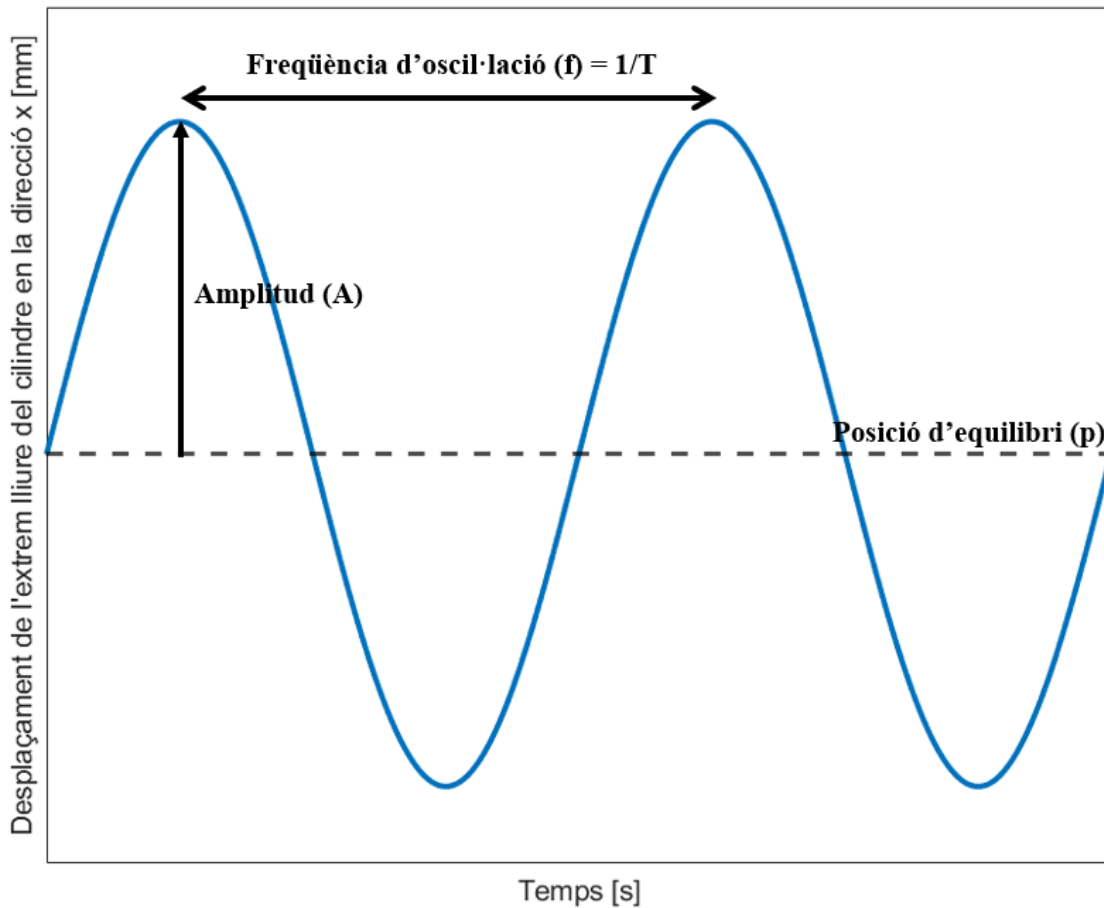


Figura 4.8: Representació gràfica de la posició d'equilibri ( $p$ ), l'amplitud ( $A$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) del desplaçament en la direcció  $x$  de l'extrem lliure del cilindre en el transcurs del temps.

Anotació: els dos eixos no tenen assignats valors numèrics perquè la única intenció és representar gràficament les variables a obtenir mitjançant el processament d'imatges.

### 4.3.2 Processament d'imatges

Per a dur a terme el processament d'imatges dels 18 vídeos enregistrats a 500 fps amb la càmera d'alta velocitat, en primer lloc ha sigut necessari obtenir tots els diferents fotogrames de cada vídeo. Tal com s'ha comentat, com que per defecte la càmera d'alta velocitat amb la selecció de freqüència d'imatge de 500 fps grava vídeos d'1,9 segons aproximadament, el número de fotogrames obtingut per a cada vídeo és d'un total de 948 fotogrames. D'aquesta manera, per a disposar dels fotogrames s'ha fet servir el programa Kdenlive que es tracta d'un editor de vídeo gratuït de còdi obert [12]. Fent ús d'aquest programa s'ha seleccionat en cada cas el vídeo corresponent i s'ha escollit la opció de processat per tal de renderitzar el vídeo a una carpeta seleccionada de forma que es guardessin tots els 948 fotogrames en format JPEG per a cada cas. El nom general que se li ha donat a cadascun dels fotogrames, ha sigut el de *Frame\_.jpg* de manera que el primer fotograma es guardés com a *Frame\_00001.jpg* fins a arribar a l'últim guardat com a *Frame\_00948.jpg*. L'explicació a guardar els fotogrames d'aquesta manera té relació amb la posterior i correcta lectura de tots els fotogrames mitjançant el codi implementat per al processament de les imatges, tal com es detalla tot seguit.

Per al desenvolupament d'un codi capaç de llegir els fotogrames i poder obtenir resultats experimentals (les dades experimentals explicades a l'apartat 4.3.1) en base al processament d'aquestes imatges, s'ha fet servir el programa Matlab (concretament la versió R2022a) [13].

A continuació, s'explica per parts el codi creat amb Matlab per a obtenir per a cada vídeo el valor de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació del cilindre a partir del desplaçament de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre, ja que finalment els punts de color vermell marcats amb un retolador en el cilindre no s'han acabat utilitzant. A mode d'exemple, s'exposa una part del codi complet (Annex 1.1) creat per al processament d'imatges del vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon sotmès a una velocitat de 21 m/s. És important destacar que en el propi codi hi ha una sèrie de dades modificables segons quin sigui el vídeo gravat que s'han d'editar manualment per tal d'aconseguir uns resultats empírics correctes.

```

%% Dades Generals
fps = 500;                               % Fotogrames per segon
NumeroFotogrames = 948;                 % Numero de fotogrames obtinguts en gravacio a 500 fps
DiametreCilindre = 6;                   % Diametre del cilindre [mm]

% Dades modificables segons el video gravat
DiametreCilindre_Pixels = 882-840;      % Diametre del cilindre [pixels]
CoordenadesCilindre_Origen = [49 840]; % Origen de coordenades del cilindre [pixels]

% Primer fotograma del qual s'obte el diametre i l'origen de coordenades del cilindre [pixels]
imshow('Frame_00001.jpg');

```

En primer lloc es defineixen com a dades generals els fps, el número de fotogrames i el diàmetre del cilindre en mil·límetres. A continuació, segons quin sigui el vídeo gravat es necessari fer ús de la funció `imshow()` que permet mostrar a mode de figura el fotograma especificat, que en aquest cas es correspon amb el primer fotograma (`Frame_00001.jpg`). Poder veure aquest fotograma és necessari per a definir el diàmetre i l'origen de coordenades del cilindre en píxels mitjançant l'ús del cursor.

En la figura 4.9 s'observa el primer fotograma obtingut, junt amb la representació de l'origen de coordenades dels píxels (color blau) i el punt que s'ha escollit com a origen de coordenades del cilindre (color vermell). En primer lloc, per al processament de les imatges l'origen de coordenades del cilindre s'ha triat en aquest punt (i no en el centre) perquè el processament de les imatges es basa en captar el moviment de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre (figura 4.11). D'aquesta manera s'assegura que el desplaçament relatiu obtingut sigui el correcte. En segon lloc, com es pot observar, l'origen de coordenades dels píxels es troba per defecte a la cantonada superior esquerra de la pròpia imatge i amb el sistema de coordenades especificat (X i Y). Aquest aspecte és important ja que en el codi desenvolupat en tot moment es fa menció al sistema de coordenades X i Y, que s'ha utilitzat com a referència.



(a) Primer fotograma obtingut amb la funció imshow().

(b) Representació de l'origen de coordenades dels píxels (blau) amb els eixos X i Y, i de l'origen de coordenades del cilindre (vermell) amb els eixos x i y.

Figura 4.9: Primer fotograma obtingut per al vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon sotmès a una velocitat del flux d'aire de 21 m/s.

```

%% Desplacament de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre en el transcurs del temps
CoordenadaX_Extrem = zeros(NumeroFotogrames,1); % Coordenada X de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre,
% respecte l'origen de coordenades dels píxels [píxels]
CoordenadaY_Extrem = zeros(NumeroFotogrames,1); % Coordenada Y de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre,
% respecte l'origen de coordenades dels píxels [píxels]

CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen = zeros(NumeroFotogrames,1); % Coordenada X de la cantonada de l'extrem lliure del
% cilindre, respecte l'origen de coordenades
% del cilindre [píxels]
CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen = zeros(NumeroFotogrames,1); % Coordenada Y de la cantonada de l'extrem lliure del
% cilindre, respecte l'origen de coordenades
% del cilindre [píxels]

for i = 1:NumeroFotogrames
    Zeros = '';
    for j = 1:(5-length(mat2str(i)))
        Zeros = strcat(Zeros,'0');
    end
    TextFotograma = strcat('Fotograma=imread(''Frame_', Zeros, mat2str(i), '.jpg'');')
    eval(TextFotograma);
    FotogramaBN = imbinarize(Fotograma(:, :, 1), .42); % Llindar de luminància modificable segons el video gravat
    imshow(FotogramaBN);

    % Dades modificables segons el video gravat
    Fila_Pixels = 540; % Coordenada Y respecte l'origen de coordenades dels píxels,
    % propera a la cantonada de l'extrem lliure del cilindre [píxels]
    ColumnaLimitDreta_Pixels = 1830; % Coordenada X dreta respecte l'origen de coordenades dels píxels,
    % propera a la cantonada de l'extrem lliure del cilindre [píxels]
    ColumnaLimitEsquerra_Pixels = 1690; % Coordenada X esquerra respecte l'origen de coordenades dels píxels,
    % propera a la cantonada de l'extrem lliure del cilindre [píxels]

    Columna_Pixels = [];
    while isempty(Columna_Pixels)
        Columna_Pixels = find(FotogramaBN(Fila_Pixels, ColumnaLimitDreta_Pixels:-1:ColumnaLimitEsquerra_Pixels)==0, 1, 'first');
        Fila_Pixels = Fila_Pixels+1;
    end

    CoordenadaX_Extrem(i) = (ColumnaLimitDreta_Pixels-Columna_Pixels)+1;
    CoordenadaY_Extrem(i) = Fila_Pixels-1;

```

```

CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen(i) = CoordenadaX_Extrem(i) - CoordenadesCilindre_Origen(1);
CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen(i) = CoordenadesCilindre_Origen(2) - CoordenadaY_Extrem(i);
end

```

Per a analitzar tots els 948 fotogrames en primer lloc es procedeix a llegir dins d'un `for`, el nom amb el format `Frame_.jpg` de cadascun dels fotogrames guardats a la carpeta.

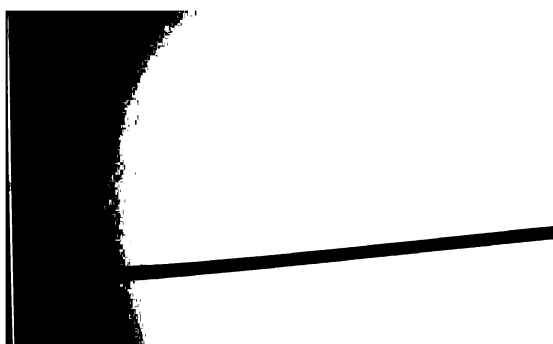
Dins del bucle, per a cada fotograma (per a cada valor de `i`) primerament és necessari obtenir el número de zeros del propi nom del fotograma. D'aquesta manera, s'inicialitza un altre `for` des de `j=1` fins al valor que s'obté de la resta entre 5 i el valor de la longitud de les xifres del fotograma (utilitzant la funció `length(mat2str())` que treu la longitud del fotograma número `i` convertit a caràcter). És a dir, per exemple, per al fotograma 948, al tenir 3 xifres, aquest valor seria de 2. D'aquesta manera és possible obtenir en la variable `Zeros`, que concatena horitzontalment els caràcters de 0 amb la funció `strcat()` dins del bucle, un total de dos 0 (en el cas del fotograma 948).

Aquest pas explicat és necessari per a continuació concatenar correctament en cada cas el nom complet de cada fotograma en caràcters (`Frame_00948.jpg`, per exemple) per tal d'utilitzar la funció `imread()` que permet guardar a la matriu `Fotograma` la informació de la imatge. Aquesta funció retorna una matriu de `MxNx3`, ja que les imatges són en color. En aquest cas, `M` i `N` és el número total de píxels en la imatge en la direcció `Y` i `X`, respectivament. El número 3 fa referència a que es tracta d'una imatge RGB, on la informació del color vermell (R) es troba al 1, la del color verd (G) al 2 i la del blau (B) al 3. A continuació es concatena en una cadena horitzontal de caràcters i es guarda a la variable `TextFotograma` amb l'objectiu d'utilitzar la funció `eval()` que ho converteix en una matriu numèrica.

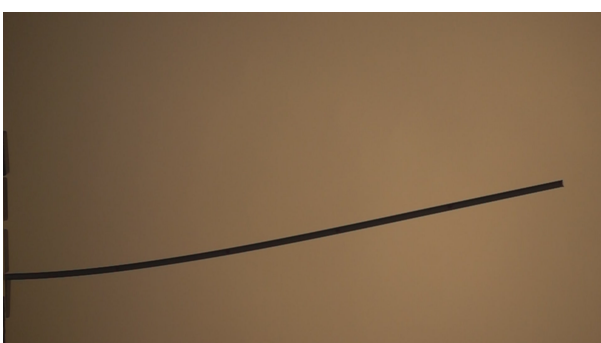
Seguidament es binaritza cada fotograma (es binaritzen tots els píxels en direcció `X` i `Y`, amb la informació del color vermell) amb la funció `imbinarize()` que reemplaça tots els valors que es troben per sobre d'un llindar de luminància global especificat manualment per 1 i la resta els reemplaça per 0. D'aquesta manera, en la binarització els valors igual a 0 són píxels de color negre i valors igual a 1 són píxels de color blanc. En aquest cas el llindar de luminància (0,42) que té un interval de 0 a 1, és una dada que s'ha hagut d'anar modificant segons el vídeo gravat per tal d'interpretar correctament el contorn del cilindre. En els vídeos gravats per al cilindre de niló Ertalon aquest llindar s'ha variat entre 0,41-0,46. En canvi, per al cilindre de PVC s'ha variat entre 0,36-0,43 i per al cilindre de metacrilat entre 0,40-0,53. A la figura 4.10 s'observa el primer fotograma tant original com binaritzat dels vídeos realitzats per als tres cilindres a una velocitat del flux d'aire de 21 m/s.



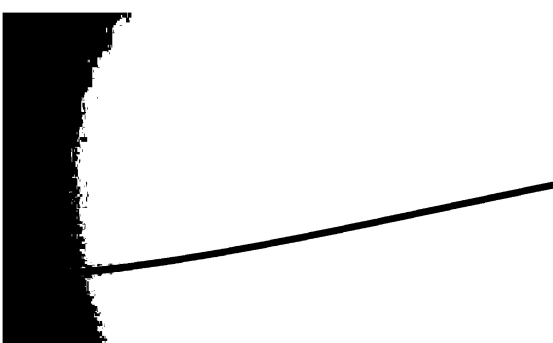
(a) Primer fotograma del vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon.



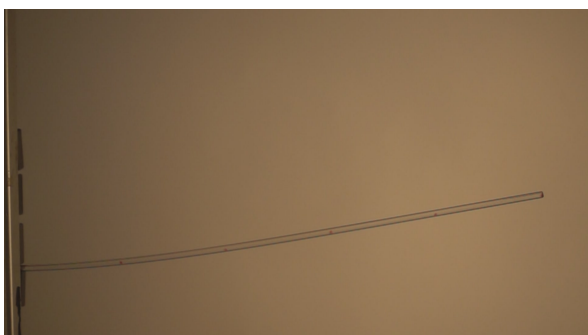
(b) Primer fotograma binaritzat amb un llindar de luminància de 0,42 del vídeo realitzat per al cilindre de niló Ertalon.



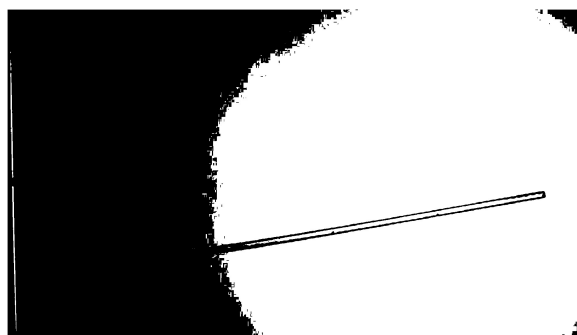
(c) Primer fotograma del vídeo realitzat per al cilindre de PVC.



(d) Primer fotograma binaritzat amb un llindar de luminància de 0,39 del vídeo realitzat per al cilindre de PVC.



(e) Primer fotograma del vídeo realitzat per al cilindre de metacrilat.



(f) Primer fotograma binaritzat amb un llindar de luminància de 0,52 del vídeo realitzat per al cilindre de metacrilat.

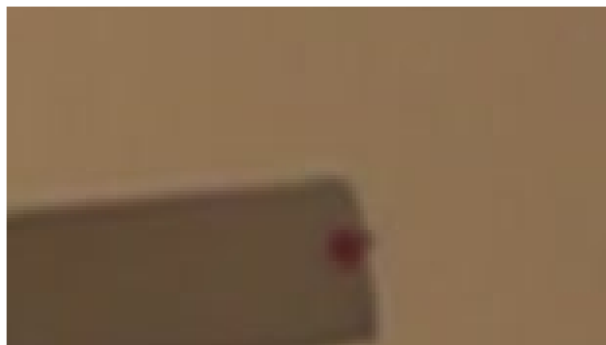
Figura 4.10: Fotogrames originals i binaritzats per als tres cilindres en estudi sotmesos a un flux d'aire amb una velocitat de 21 m/s.

Una vegada binaritzat el fotograma complet és necessari trobar la posició del píxel de la cantonada (superior) de l'extrem lliure del cilindre (figura 4.11) amb l'objectiu d'obtenir per a cada fotograma el valor de la posició d'aquest píxel per tal de registrar el seu desplaçament en el temps.

Així doncs, en primer lloc s'especifica manualment (segons el vídeo gravat) mitjançant l'ús del cursor i la imatge binaritzada (`imshow(FotogramaBN)`), la posició X d'una fila de píxels superior i propera a la cantonada de l'extrem lliure (`Fila_Pixels`) juntament amb la posició Y d'una columna de píxels que quedi a la dreta (`ColumnaLimitDreta_Pixels`) i la posició Y d'una altra columna de píxels que quedi a l'esquerra (`ColumnaLimitEsquerra_Pixels`) de la cantonada. Aquestes tres variables serveixen per envoltar la cantonada

de manera que es tractin els límits per a poder trobar el primer píxel de color negre, que es correspon amb el de la cantonada de l'extrem lliure (figura 4.11). Per a trobar aquest primer píxel negre, fent ús d'un `while` es recorre els píxels de dalt a baix (eix Y en sentit positiu) i de dreta a esquerra (eix X en sentit negatiu) fins a trobar amb la funció `find()` el primer píxel igual a 0, és a dir, de color negre.

Seguidament es registren les coordenades X i Y d'aquest píxel respecte l'origen de coordenades dels píxels (sistema de coordenades de color blau a la figura 4.9) realitzant les correccions corresponents. Per a obtenir-les respecte l'origen de coordenades del cilindre (sistema de coordenades de color vermell a la figura 4.9), simplement es resten adequadament les coordenades de l'origen de coordenades del cilindre determinades anteriorment. D'aquesta manera s'obtenen les variables anomenades `CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen` i `CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen` al codi creat. Aquest últim pas es necessari per tal d'adquirir adequadament la distància en direcció X i en direcció Y entre el píxel que determina l'origen de coordenades del cilindre i el píxel que determina la cantonada de l'extrem lliure del cilindre.



(a) Vista detallada de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre.



(b) Vista detallada binaritzada de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre.

Figura 4.11: Ampliació de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre (superior) utilitzada per a obtenir experimentalment el desplaçament del cilindre de niló Ertalon en el transcurs del temps.

```
% Cálculos per a passar el vector de fotogrames a segons i el valor de la distancia de la cantonada de l'extrem lliure
% del cilindre respecte l'origen de coordenades del cilindre de píxels a mil límetres
VectorFotogrames = 1:1:NumeroFotogrames;
VectorFotogrames_Segons = (VectorFotogrames./fps)-(1/fps);
CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen_mm = CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen.*(DiametreCilindre/DiametreCilindre_Pixels);
CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm = CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen.*(DiametreCilindre/DiametreCilindre_Pixels);

% Cálculos per a obtenir la posicio i temps dels maxims i minims locals en direccio Y
% ('MinProminence' i 'MinSeparation' modificables segons el video gravat)
TFMaximsLocalsY = islocalmax(CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm, 'MinProminence',0.04,'MinSeparation',15);
TFMinimsLocalsY = islocalmin(CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm,'MinProminence',0.11,'MinSeparation',15);
TempsMaximsLocalsY = VectorFotogrames_Segons(TFMaximsLocalsY);
TempsMinimsLocalsY = VectorFotogrames_Segons(TFMinimsLocalsY);
PosicioMaximsLocalsY = CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm(TFMaximsLocalsY);
PosicioMinimsLocalsY = CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm(TFMinimsLocalsY);

% Cálculos per a obtenir la posicio i temps dels maxims i minims locals en direccio X
TFMaximsLocalsX = islocalmax(CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen_mm);
TFMinimsLocalsX = islocalmin(CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen_mm);
TempsMaximsLocalsX = VectorFotogrames_Segons(TFMaximsLocalsX);
TempsMinimsLocalsX = VectorFotogrames_Segons(TFMinimsLocalsX);
PosicioMaximsLocalsX = CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen_mm(TFMaximsLocalsX);
PosicioMinimsLocalsX = CoordenadaX_Extrem_RespecteOrigen_mm(TFMinimsLocalsX);
```



A continuació, per a poder aconseguir la corresponent representació del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en funció del temps en direcció Y (que és equivalent a la direcció x segons el sistema de coordenades del cilindre i, per tant, en la direcció del flux d'aire), per una banda es crea un vector que representa el número total de fotogrames i aquest es passa a segons dividint cada valor per les fps (en aquest cas s'han gravat tots els vídeos a 500 fps) i restant també a cada valor la divisió d'1/fps, ja que el primer fotograma es correspon amb el temps inicial de gravació (i igual a 0 s). Per l'altra banda, es passen tots els valors guardats de la distància entre l'origen de coordenades del cilindre i la cantonada de l'extrem lliure del cilindre tant en direcció X com en direcció Y de píxels a mil·límetres multiplicant pel factor de conversió que es correspon entre la divisió del diàmetre del cilindre en mil·límetres i el diàmetre del cilindre en píxels.

Així mateix, per a realitzar el posterior càlcul de les dades experimentals d'interès (apartat 4.3.1) es calculen els màxims i mínims locals d'aquests desplaçaments en el transcurs del temps tant en la direcció Y com en la direcció X. Aquests màxims i mínims locals es troben amb les funcions `islocalmax()` i `islocalmin()`, respectivament. Per tant, es guarda tant el valor del temps com el de la posició (o dit d'una altra manera, el valor del desplaçament) en el que es produeix cada màxim i mínim.

Cal destacar que en direcció Y s'han utilitzat les opcions `'MinProminence'` i `'MinSeparation'` (modificables segons el vídeo gravat) per tal d'obtenir correctament els valors dels màxims i mínims locals. Això és necessari perquè la pròpia senyal està afectada per "soroll" com per exemple el causat per la pròpia il·luminació del vídeo que afecta a la correcta interpretació del píxel que està en la cantonada de l'extrem lliure del cilindre o el causat pels propis paràmetres determinats manualment en el codi i modificables segons el vídeo, de manera que la representació obtinguda del desplaçament en el transcurs del temps no és perfectament nítida i mostra màxims i mínims locals que realment no són útils per a la correcta obtenció de les dades experimentals. Aquestes dues opcions permeten controlar tant la mínima prominència com la mínima separació entre els propis pics (màxims i mínims) i d'aquesta manera tractar i interpretar correctament tant els màxims com els mínims locals. Per al desplaçament en la direcció X no ha sigut necessari fer ús d'aquestes dues opcions perquè el desplaçament no és tant rellevant i d'aquesta manera no existeix una gran variació en aquesta direcció en el transcurs del temps. Aleshores, en aquest cas els màxims i mínims locals s'interpreten adequadament sense fer ús d'aquestes dues opcions.

La representació que s'obté del desplaçament de la cantonada de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x o del flux d'aire (que és equivalent a la direcció Y, segons el sistema d'eixos dels píxels) en funció del temps permet en cada cas tractar aquests màxims i mínims locals. En la figura 4.12, s'obté aquesta representació a partir de les variables del codi anomenades `VectorFotogrames_Segons` i `CoordenadaY_Extrem_RespecteOrigen_mm`. En aquest cas els màxims locals són els punts en vermell i els mínims locals els punts en blau.

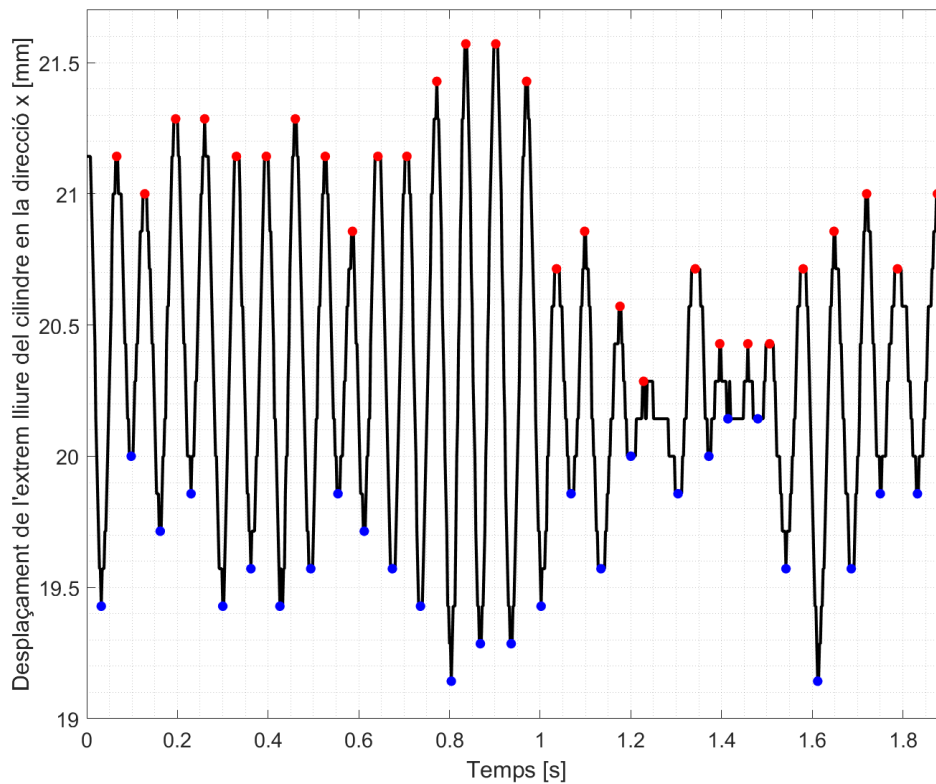


Figura 4.12: Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en funció del temps de gravació per al vídeo del cilindre de niló Ertalon sotmès a un flux d'aire amb una velocitat de 21 m/s.

Finalment, amb la correcta interpretació dels màxims i mínims locals del desplaçament que experimenta l'extrem lliure del cilindre en la direcció del flux d'aire, es procedeix a calcular les quatre dades experimentals d'interès: la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació.

```

%% Calcul de la posicio d'equilibri i de l'amplitud d'oscil·lacio [mm]
MitjanaMAXY = mean(PosicioMaximsLocalsY);           % Mitjana dels maxims locals en direccio Y [mm]
MitjanaMINY = mean(PosicioMinimsLocalsY);           % Mitjana dels minims locals en direccio Y [mm]

AmplitudPicAPicY = MitjanaMAXY-MitjanaMINY;         % Amplitud pic a pic en direccio Y [mm]
AmplitudY = AmplitudPicAPicY/2;                    % Amplitud en direccio Y [mm]

PosicioEquilibriY = (MitjanaMAXY+MitjanaMINY)/2;    % Posicio d'equilibri en direccio Y [mm]

```

Per al càlcul de la posició d'equilibri (`PosicioEquilibriY`) en primer lloc es calcula la mitjana dels màxims locals i la dels mínims locals. Amb la mitjana d'aquests dos valors s'obté la posició d'equilibri de l'extrem lliure del cilindre.

Per a obtenir l'amplitud (`AmplitudY`), primerament es calcula el valor de l'amplitud pic a pic a partir de la resta entre la mitjana dels màxims i la mitjana dels mínims. Simplement realitzant la divisió entre 2 del valor de l'amplitud pic a pic, s'obté el valor de l'amplitud.

```

%% Calcul de l'angle de flexio [graus]
MitjanaMAXX = mean(PosicioMaximsLocalsX);           % Mitjana dels maxims locals en direccio X [mm]
MitjanaMINX = mean(PosicioMinimsLocalsX);           % Mitjana dels minims locals en direccio X [mm]

```

```

PosicioEquilibriX = (MitjanaMAXX+MitjanaMINX)/2;           % Posicio d'equilibri en direccio X [mm]
AngleFlexio = rad2deg(atan(PosicioEquilibriY/PosicioEquilibriX)); % Angle de flexio [graus]

```

Per al càlcul de l'angle de flexió (**AngleFlexio**), en primer lloc es calcula la posició d'equilibri però en direcció X (seguint el mateix procediment que l'anterior utilitzat per a la posició d'equilibri en direcció Y). A continuació, tal com es pot observar en la figura 4.7, la tangent de l'angle de flexió es correspon amb la divisió entre la posició d'equilibri en direcció Y i la posició d'equilibri en direcció X. D'aquesta manera amb l'arc tangent és possible obtenir aquest angle de flexió.

```

%% Calcul de la frecuencia d'oscil lacio [Hz]
NumeroPeriodes = (size(PosicioMaximsLocalsY,1))-1;           % Numero de periodes en direccio Y

T = zeros(NumeroPeriodes,1);
for m = 1:1:NumeroPeriodes
    T(m) = TempsMaximsLocalsY(m+1) - TempsMaximsLocalsY(m);
end

Periode = mean(T);           % Mitjana dels periodes en direccio Y [s]
Frecuencia = 1/Periode;     % Frecuencia d'oscil lacio en direccio Y [Hz]

```

Per acabar, per al càlcul de la freqüència (**Frecuencia**) és necessari obtenir el valor dels diferents períodes existents. El valor dels períodes s'obté a partir de la resta entre el temps del màxim relatiu consecutiu i el temps del màxim relatiu actual, des de l'inici fins al final del temps de gravació. Fent la mitjana de tots aquests valors de període obtinguts i seguidament realitzant la inversa d'aquest valor mig s'acaba obtenint el valor de la freqüència d'oscil·lació del cilindre.

### 4.3.3 Resultats experimentals i decisió del material del cilindre a estudiar

Utilitzant el codi creat per al processament d'imatges mostrat en l'apartat 4.3.2 i adaptant per a cadascun dels 6 vídeos realitzats a diferents velocitats per als tres cilindres (niló Ertalon, PVC i metacrilat) les dades modificables del codi per tal d'obtenir en cada cas uns resultats experimentals correctes, s'obtenen els resultats mostrats en les taules 4.4, 4.5 i 4.6. La binarització i les representacions es mostren a l'Annex 1.2.

Taula 4.4: Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de niló Ertalon.

Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	2,475	$7,50 \cdot 10^{-2}$	0,569	14,493
9	4,123	0,207	0,950	15,676
12	6,042	0,276	1,378	12,980
15	9,599	0,239	2,232	13,128
18	14,872	0,296	3,418	15,419
21	20,314	0,661	4,717	14,917

Taula 4.5: Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de PVC.

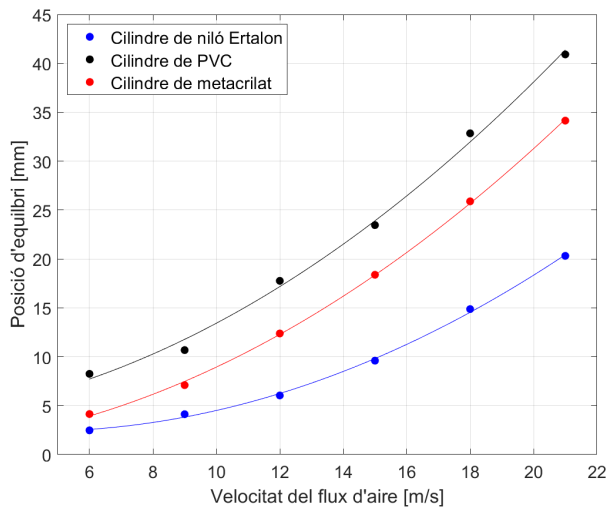
Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	8,248	$9,77 \cdot 10^{-2}$	1,921	10,170
9	10,680	0,380	2,412	7,865
12	17,761	0,745	4,018	8,782
15	23,462	0,387	5,514	9,300
18	32,845	0,441	7,562	8,658
21	40,914	0,579	9,497	9,907

Taula 4.6: Resultats experimentals inicials del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de metacrilat.

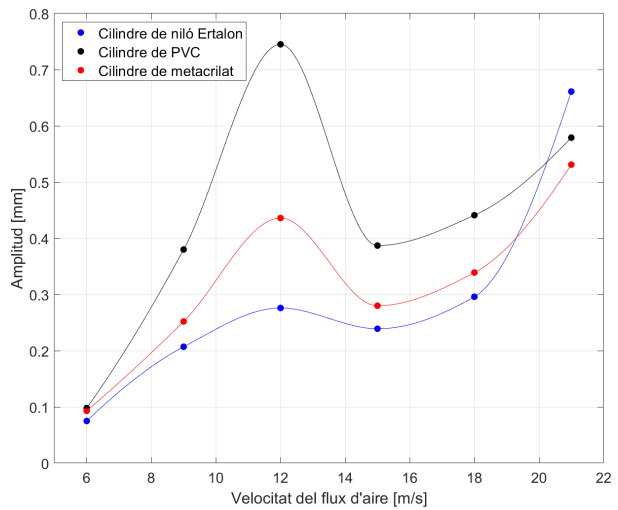
Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	4,140	$9,30 \cdot 10^{-2}$	0,931	13,089
9	7,098	0,252	1,626	7,194
12	12,380	0,436	2,807	8,731
15	18,380	0,280	4,250	11,561
18	25,889	0,339	6,024	14,444
21	34,143	0,531	7,955	13,015

Amb tota aquesta informació experimental, es mostren les representacions corresponents de les quatre dades experimentals en funció de la velocitat i per a cadascun dels tres cilindres a la figura 4.13.

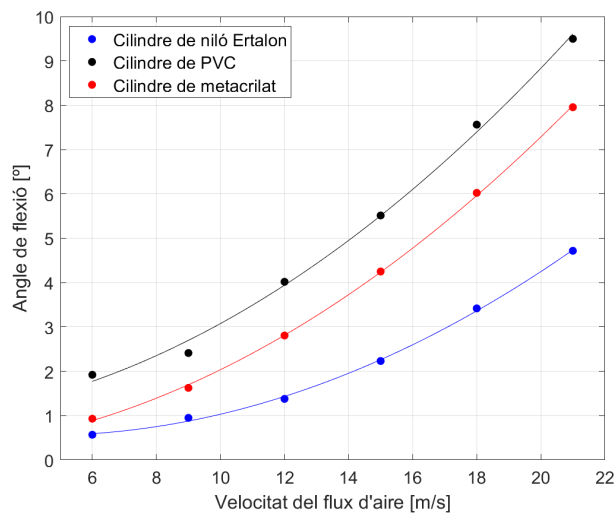
L'objectiu de la obtenció d'aquesta figura és el de poder observar el comportament de cadascuna de les dades experimentals en funció de la velocitat i d'aquesta manera poder comparar-ho entre els tres cilindres amb la finalitat d'escollir el millor material per a dur a terme també l'estudi numèric de manera satisfactòria.



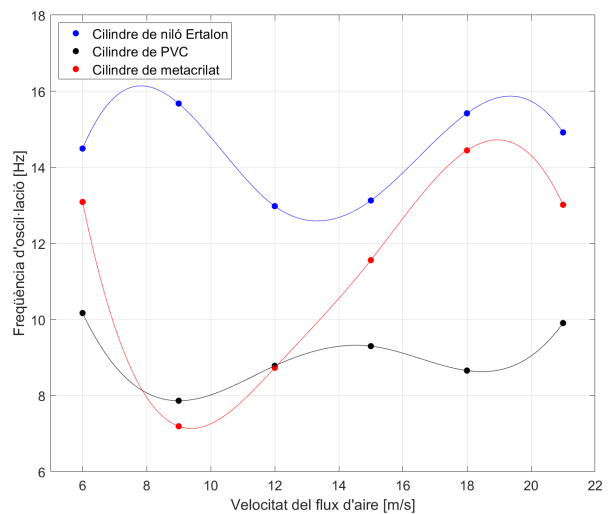
(a) Posició d'equilibri ( $p$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(b) Amplitud ( $A$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(c) Angle de flexió ( $\theta$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(d) Freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).

Figura 4.13: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat del flux d'aire per als tres cilindres en estudi.

En primer lloc, s'observa en la figura 4.13 que el comportament tant de la posició d'equilibri (4.13a) com el de l'angle de flexió (4.13c) és augmentar quadràticament segons augmenta la velocitat per als tres cilindres. En els dos casos el cilindre de PVC (color negre) mostra major valor tant de la posició d'equilibri com de l'angle de flexió en tot el rang de velocitats, seguit del cilindre de metacrilat (color vermell) i finalment del de niló Ertalon (color blau). Pel que fa a l'amplitud (4.13b), el comportament no es quadràtic en aquest cas perquè a una velocitat de 12 m/s hi ha un pic en l'amplitud per a cadascun dels tres cilindres. D'aquesta manera el comportament que segueix l'amplitud en funció de la velocitat s'assimila més a una funció cúbica (s'ha utilitzat un model d'interpolació cúbica). Tot i així, en gairebé tot el rang de velocitats el cilindre de PVC segueix sent el que mostra una major amplitud, seguit del de metacrilat i a continuació del de niló Ertalon. Per acabar, pel que fa a la freqüència d'oscil·lació (4.13d) aquesta varia en un determinat rang de freqüències per a cadascun dels tres cilindres i tendeix a oscil·lar amb l'augment de velocitat. S'ha utilitzat un model d'interpolació cúbica, ja que és el que representa millor el que succeeix. En aquest cas la freqüència del

cilindre de niló Ertalon és la major en el rang de velocitats, seguit del de metacrilat i finalment del de PVC.

És clar que per a dur a terme satisfactòriament l'estudi experimental tenint en compte que les dades experimentals s'obtenen a partir del processament d'imatges obtingudes de la gravació d'un vídeo a 500 fps, els millors criteris per tal de detectar amb major precisió i acuradament el moviment de l'extrem lliure del cilindre són bàsicament que els valors de la posició d'equilibri, l'amplitud i l'angle de flexió en tot el rang de velocitats en estudi siguin relativament grans. Pel que fa a la freqüència d'oscil·lació del cilindre, com més baixa sigui millor ja que d'aquesta manera gravant a 500 fps es registra millor el moviment al llarg dels diversos fotogrames. No obstant, s'ha de tenir en compte que el posterior estudi numèric limita aquests criteris ja que es considera una llei lineal per al comportament del sòlid en la qual s'assumeix la hipòtesi de petites deformacions. Aquest fet implica que els valors tant de la posició d'equilibri com de l'amplitud com de l'angle de flexió hagin de ser prou grans per tal de detectar-los de manera adequada experimentalment però a la vegada els mínims acceptables per tal que l'estudi numèric pugui reproduir de la manera més correcta possible el que succeeix en els experiments.

Així doncs, considerant els criteris òptims que tenen en compte tant l'estudi experimental com el numèric i observant el comportament dels tres cilindres en la figura 4.13, la millor opció per a desenvolupar l'estudi general definitiu (tant experimental com numèric) és el cilindre de niló Ertalon.

És cert que la freqüència d'oscil·lació en general és major a la dels altres dos cilindres en estudi, però el fet clau i més important és que la resta de dades experimentals (posició d'equilibri, amplitud i angle de flexió) són generalment inferiors a les registrades per als altres dos cilindres en tot el rang de velocitats, però a la vegada suficientment grans com per a detectar-les correctament amb el mètode experimental. Això condueix a que el cilindre de niló Ertalon sigui la millor alternativa entre les tres possibles. A més a més, cal remarcar que la diferència entre les freqüències d'oscil·lació dels tres cilindres per a cada velocitat és en general poc rellevant atenent a la figura 4.13d. D'aquesta manera la gravació a 500 fps no suposa una limitació experimental i permet registrar acuradament el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre ja que en tots els casos el valor del període del cilindre de niló Ertalon és molt superior a l'interval de temps entre fotograma i fotograma.

## 4.4 Estudi experimental definitiu amb el cilindre de niló Ertalon

Havent decidit el cilindre de niló Ertalon com a cilindre amb les millors prestacions per a poder desenvolupar tant l'estudi experimental com el numèric definitius de manera favorable, s'han realitzat novament les gravacions experimentals a 500 fps per a les mateixes sis velocitats diferents (6, 9, 12, 15, 18 i 21 m/s) i amb el mateix cilindre de niló Ertalon, però en aquest cas millorant la il·luminació de la zona de gravació respecte als estudis experimentals inicials realitzats. L'objectiu d'aquesta millora ha sigut el d'obtenir uns resultats experimentals més acurats i precisos, ja que la il·luminació és fonamental a l'hora de binaritzar (Annex 1.3) i d'aquesta manera interpretar correctament el contorn del cilindre en els diferents fotogrames obtinguts per a cadascun dels sis vídeos realitzats.

En la figura 4.9 es pot observar clarament que la il·luminació de la zona en els estudis experimentals inicials és bastant groguenca. Amb la millora realitzada, enfocant més correctament el focus utilitzat sobre el cilindre

juntament amb la bona il·luminació del dia de gravació, ha sigut possible obtenir una imatge més blanca i nítida per a tots els vídeos, tal com es pot observar a la figura 4.14. També es pot observar que s'han remarcat més grans els cinc punts vermells del cilindre tot i que finalment tampoc s'han utilitzat.



(a) Velocitat del flux d'aire: 6 m/s. (b) Velocitat del flux d'aire: 9 m/s. (c) Velocitat del flux d'aire: 12 m/s.

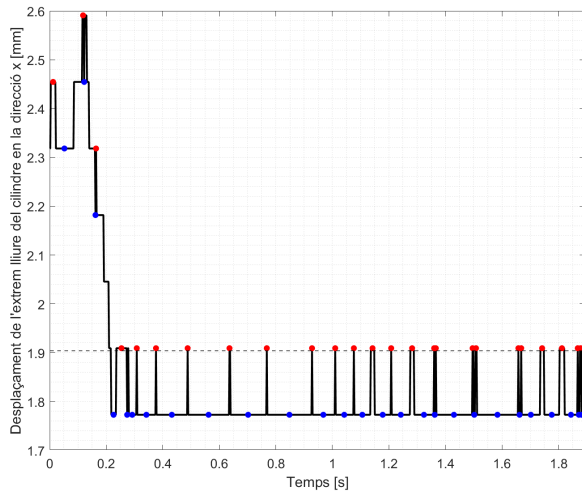


(d) Velocitat del flux d'aire: 15 m/s. (e) Velocitat del flux d'aire: 18 m/s. (f) Velocitat del flux d'aire: 21 m/s.

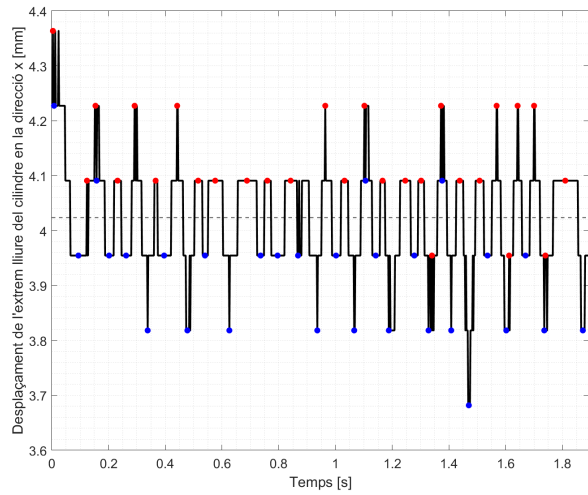
Figura 4.14: Fotogrames inicials del cilindre de niló Ertalon per a les sis velocitats estudiades.

Utilitzant el codi del processament d'imatges presentat a l'apartat 4.3.2 i ajustant les dades modificables del codi segons el vídeo gravat (incloent en l'indiar de luminància, que en aquest cas s'ha variat entre 0,44-0,46), s'obtenen les representacions del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció  $x$  (direcció del flux d'aire) en funció del temps de gravació per a cadascuna de les sis velocitats en estudi, tal com es mostra en la

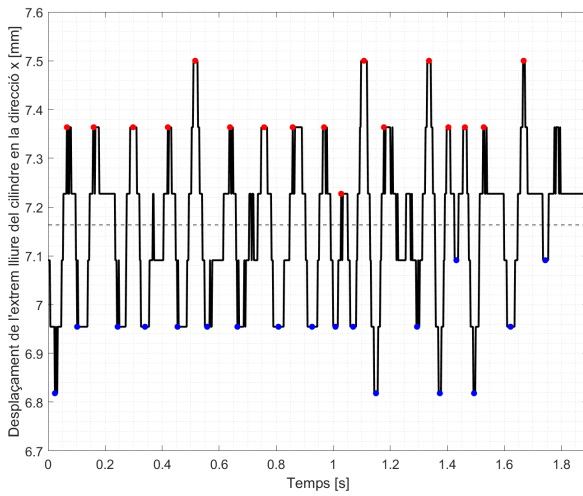
figura 4.15. En les representacions mostrades els punts vermells representen màxims locals, els punts blaus mínims locals i la línia discontinua la posició d'equilibri.



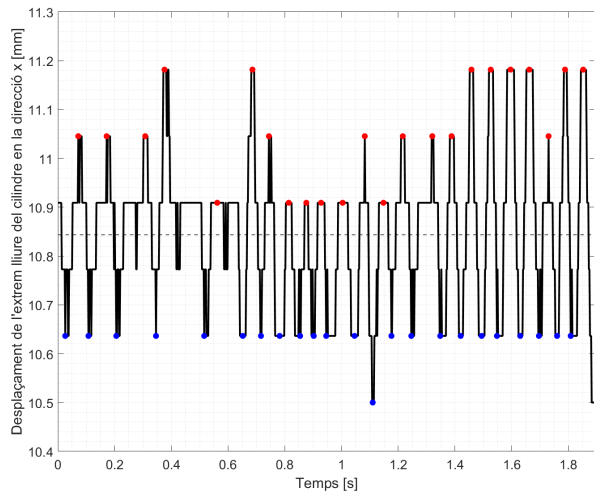
(a) Velocitat del flux d'aire: 6 m/s.



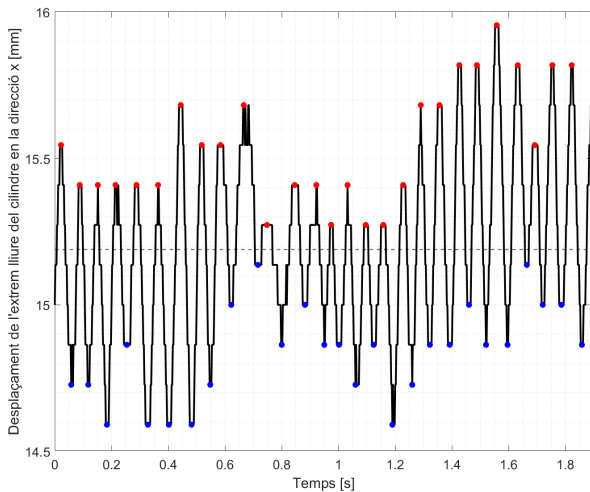
(b) Velocitat del flux d'aire: 9 m/s.



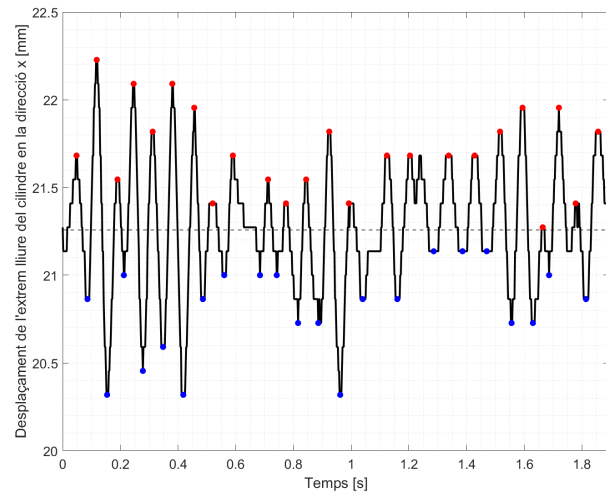
(c) Velocitat del flux d'aire: 12 m/s.



(d) Velocitat del flux d'aire: 15 m/s.



(e) Velocitat del flux d'aire: 18 m/s.



(f) Velocitat del flux d'aire: 21 m/s.

Figura 4.15: Representacions gràfiques del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x en el transcurs del temps per a les sis velocitats en estudi.



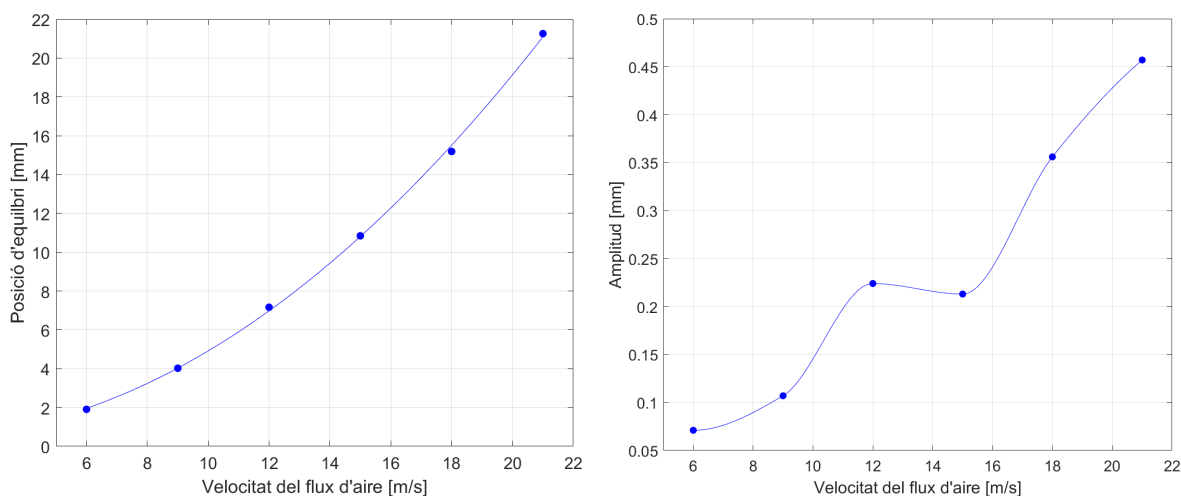
Cal destacar que la forma esglaonada de les representacions de la figura 4.15 és causada per la detecció d'un cert píxel o el contigu com a cantonada de l'extrem del cilindre al llarg dels diferents fotogrames. Els valors de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació del cilindre per a cada velocitat, calculats en cada cas a partir dels màxims i mínims locals de les representacions mostrades en la figura 4.15 amb el codi de Matlab creat per a processar els fotogrames de cada vídeo, es mostren a la taula 4.7.

Taula 4.7: Resultats experimentals definitius del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre de niló Ertalon.

Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	1,904	$7,06 \cdot 10^{-2}$	0,437	12,862
9	4,023	0,107	0,924	14,950
12	7,164	0,224	1,644	9,988
15	10,844	0,213	2,490	12,360
18	15,189	0,356	3,487	14,444
21	21,259	0,457	4,890	12,721

Es pot observar clarament i tal com era d'esperar, que els resultats experimentals obtinguts mostrats a la taula 4.7 tenen una gran similitud amb els resultats experimentals obtinguts anteriorment per al cilindre de niló Ertalon en els estudis experimentals inicials i que apareixen en la taula 4.4. Aquesta similitud és lògica ja que la principal diferència és la millora en la il·luminació de la zona de gravació (juntament amb l'inevitable canvi de les condicions atmosfèriques, al tractar-se de dies de gravació diferents). Tot i així, tal com s'ha comentat anteriorment, aquests resultats experimentals s'han considerat més precisos i acurats a causa de la millora en la il·luminació i conseqüentment en la interpretació del contorn del cilindre i el corresponent registre del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en el temps.

En la figura 4.16 es mostren les representacions de les quatre dades experimentals mostrades en la taula 4.7 en funció de la velocitat del flux d'aire.



(a) Posició d'equilibri (p) en funció de la velocitat (U).

(b) Amplitud (A) en funció de la velocitat (U).

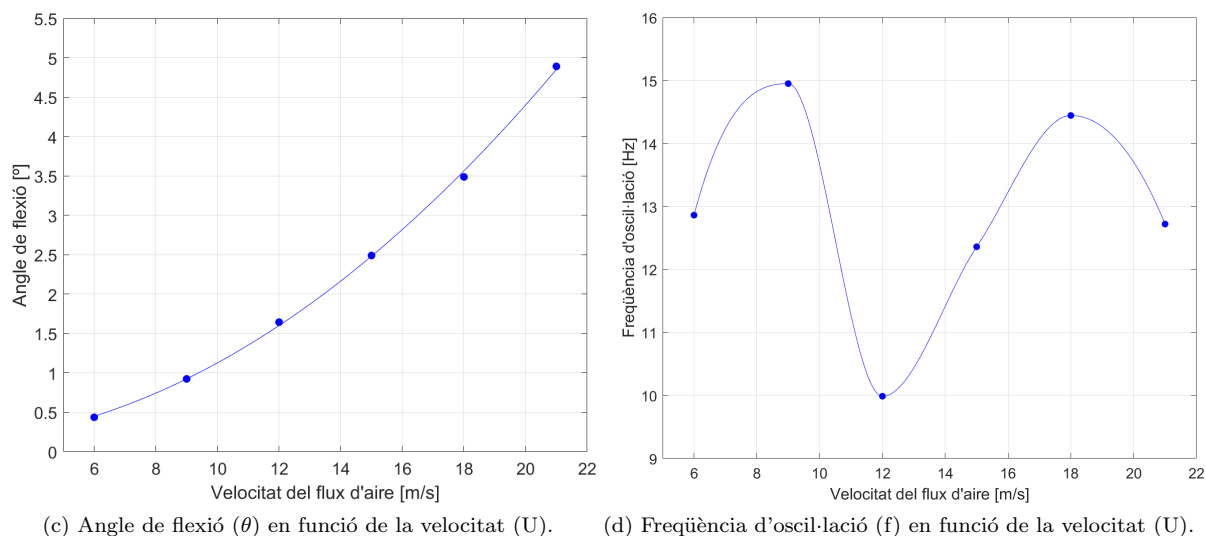


Figura 4.16: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon.

La posició d'equilibri (4.16a) i l'angle de flexió (4.16c) augmenten clarament de forma quadràtica amb l'augment de la velocitat del flux d'aire incident. Concretament la posició d'equilibri va des de 2 mm fins a 21 mm i l'angle de flexió des de  $0,4^\circ$  fins a  $5^\circ$  aproximadament, al llarg del rang de velocitats estudiat. El progrés d'aquesta flexió del cilindre i per tant de l'augment d'aquestes dues variables amb l'augment de la velocitat incident, es pot observar clarament en la figura 4.14. Pel que fa a l'amplitud (4.16b), aquesta és en general d'un valor reduït al llarg del rang de velocitats ja que és d'entre un i dos ordres de magnitud inferior als valors que pren la posició d'equilibri. El valor mínim de l'amplitud és 0,07 mm i el valor màxim és de 0,5 mm aproximadament. Això significa que el cilindre oscil·la relativament poc respecte a aquesta posició d'equilibri. Tot i així, el comportament de l'amplitud de les oscil·lacions és el de variar segons una funció cúbica amb l'increment de velocitat ja que a 12 m/s l'amplitud mostra un augment més important que a 15 m/s. Per acabar, la freqüència d'oscil·lació (4.16d) del cilindre de niló varia entre valors de 10 Hz i 15 Hz de forma aproximada. S'ha ajustat un model d'interpolació cúbica, de manera que es pot observar que la tendència de la freqüència és oscil·lar de manera aproximada respecte un valor de 13 Hz en aquest rang de velocitats. En referència a aquest punt és important destacar l'augment de la freqüència d'oscil·lació experimentat pel cilindre des dels 12 m/s als 18 m/s i que s'explica detalladament en l'apartat posterior 4.4.2, concretament on s'explica la dependència del nombre de Strouhal ( $St$ ) amb el nombre de Reynolds ( $Re$ ).

#### 4.4.1 Càlcul de la densitat i el mòdul de Young experimentals

Per al posterior estudi numèric, s'ha realitzat el càlcul experimental tant de la densitat com del mòdul de Young del niló Ertalon.

En primer lloc, per a determinar la densitat únicament ha sigut necessari pesar el cilindre de niló Ertalon utilitzat en l'estudi experimental amb una bàscula del laboratori de química de l'ESEIAAT.



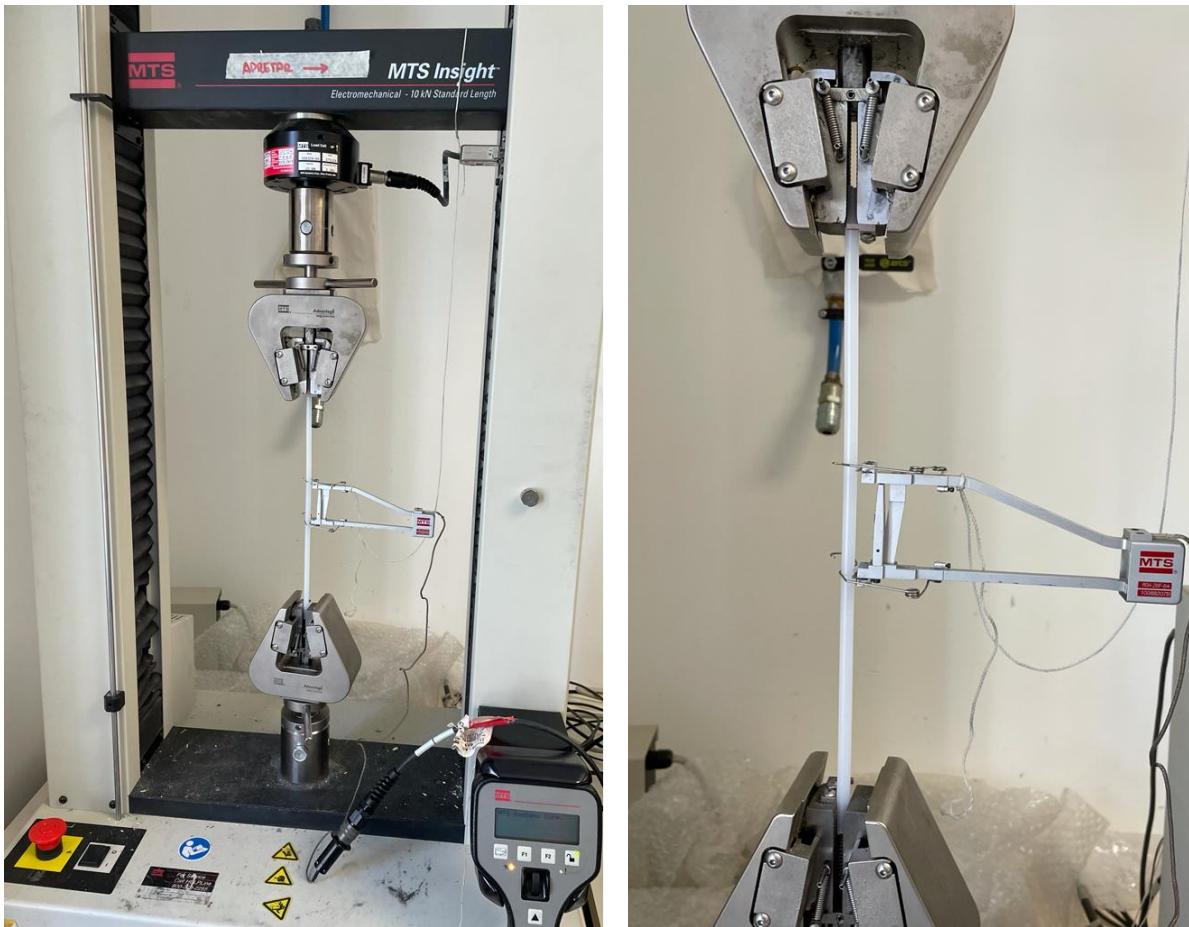
Figura 4.17: Massa del cilindre de niló Ertalon utilitzat en el procés d'experimentació al túnel de vent.

Amb el valor de la massa obtingut (figura 4.17) i fent el càlcul del volum del cilindre circular utilitzat (segons les dimensions de la taula 4.3) s'obté el valor de la densitat del material:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{S \cdot L_T} = \frac{m_s}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot L_T} \quad (4.5)$$

$$\rho_s = \frac{11,8 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{\pi \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2}{4}\right) \cdot (33 \cdot 10^{-2})} = 1264,67 \text{ kg/m}^3 \approx 1265 \text{ kg/m}^3$$

En segon lloc s'ha procedit a determinar el mòdul de Young del material. Per a determinar-ho s'ha realitzat un assaig a tracció sobre el cilindre de niló Ertalon amb l'aparell MTS Insight Electromechanical - 10 kN Standard Length, al laboratori del Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'ESEIAAT. Les característiques principals d'aquest assaig han sigut que la velocitat d'assaig ha sigut de 5 mm/min i la precàrrega exercida per tal d'assegurar la tensió del cilindre abans d'iniciar la prova ha sigut de 5 N. Pel que fa a la longitud natural de l'extensòmetre ( $l$ ), aquesta és de 52 mm.



(a) Aparell utilitzat per a realitzar la prova a tracció sobre el material. (b) Vista detallada de l'extensòmetre subjectat al cilindre.

Figura 4.18: Prova experimental a tracció realitzada sobre el cilindre circular de niló Ertalon amb l'objectiu de determinar el mòdul de Young del material.

De l'assaig s'ha obtingut en cada instant la força de tensió ( $F$ ) exercida per l'aparell sobre el cilindre i el canvi en la longitud del cilindre ( $\Delta l$ ) mesurat per l'extensòmetre. Per tal d'obtenir en cada cas el valor de la tensió ( $\sigma$ ) s'ha dividit el valor de la força de tensió per la superfície transversal del cilindre ( $S$ ) (segons les dimensions de la taula 4.3) i per a obtenir la deformació ( $\varepsilon$ ) s'ha dividit l'increment en la longitud del cilindre per la longitud natural de l'extensòmetre. És a dir:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.7)$$

En la figura 4.19 s'observa el diagrama tensió-deformació obtingut de l'assaig a tracció realitzat per al cilindre de niló Ertalon.

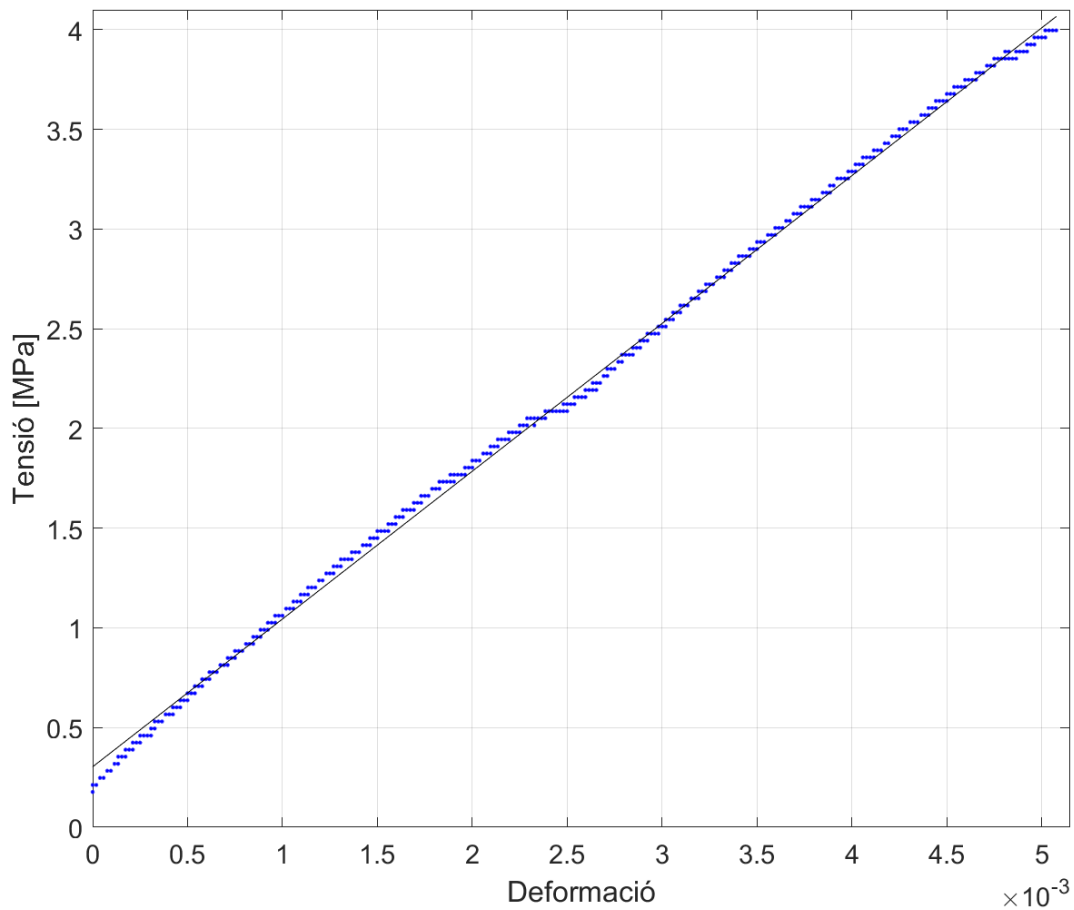


Figura 4.19: Diagrama tensió ( $\sigma$ ) - deformació ( $\varepsilon$ ) per al niló Ertalon.

La llei de Hooke indica la següent relació lineal entre la tensió i la deformació del material (per a un cas unidimensional):

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon \quad (4.8)$$

Realitzant la regressió lineal de les dades experimentals obtingudes de l'assaig (figura 4.19), amb un alt coeficient de determinació ( $R^2 = 0,9985$ ) s'obté l'equació lineal que relaciona la tensió amb la deformació del material:

$$\sigma = 741,2 \cdot \varepsilon + 0,3$$

Com que el mòdul de Young ( $E_s$ ) es correspon amb el pendent de la recta obtinguda, per al niló Ertalon el valor del mòdul de Young obtingut experimentalment és de:

$$E_s = 741,2 \text{ MPa} \approx 741 \text{ MPa}$$

#### 4.4.2 Anàlisi adimensional de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV)

Les estructures desprenen vòrtexs en flux subsònic que formen un carrer de vòrtexs en l'estela. Com que aquest despreniment primer es produeix des d'una banda de l'estructura i després des de l'altra, pressions

oscil·lants s'imposen sobre la superfície de l'estructura. Com a conseqüència, s'indueix una vibració en estructures elàstiques causada per aquest periòdic despreniment de vòrtexs que interactuen amb la pròpia estructura. Aquest fet té una gran importància pel seu potencial efecte destructiu sobre diferents estructures, com per exemple ponts o torres [5].

En aquest cas, es realitza l'estudi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) en el cilindre de niló Ertalon estudiat experimentalment. En primer lloc, es calculen el nombre de Reynolds (Re) i el nombre de Strouhal (St) amb l'objectiu d'observar la dependència entre aquests dos nombres adimensionals, ja que el despreniment de vòrtexs en flux subsònic és funció del nombre de Reynolds.

El nombre de Reynolds (Re), que es tracta de la relació entre les forces inercials i les viscoses del fluid, es defineix com el producte entre la velocitat del flux d'aire (U) pel diàmetre del cilindre ( $D = 6 \text{ mm}$ ) entre la viscositat cinemàtica del fluid ( $\nu_f = 1,584 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu_f} \quad (4.9)$$

El nombre de Strouhal (St) es la proporcionalitat adimensional entre la freqüència de despreniment de vòrtexs ( $f_{vs}$ ) i el diàmetre del cilindre (D), dividit entre la velocitat del flux d'aire (U).

$$St = \frac{f_{vs} \cdot D}{U} \quad (4.10)$$

És important tenir en compte que segons experiències experimentals, la freqüència d'oscil·lació del cilindre (f) en direcció perpendicular al flux d'aire (direcció z) és igual a la freqüència de despreniment de vòrtexs ( $f_{vs}$ ). En canvi, en la direcció del flux d'aire (direcció x) la freqüència d'oscil·lació del cilindre és igual al doble de la freqüència de despreniment de vòrtexs. Aquest fet és conseqüència directa de la geometria del carrer de vòrtexs en la estela del cilindre [5]. D'aquesta manera, en aquest cas d'estudi en que s'ha analitzat la freqüència d'oscil·lació del cilindre de niló Ertalon en la direcció x, la relació entre les freqüències és la següent:

$$f_{vs} = \frac{f}{2} \quad (4.11)$$

Tenint en compte aquest aspecte, l'equació del nombre de Strouhal corresponent és la següent:

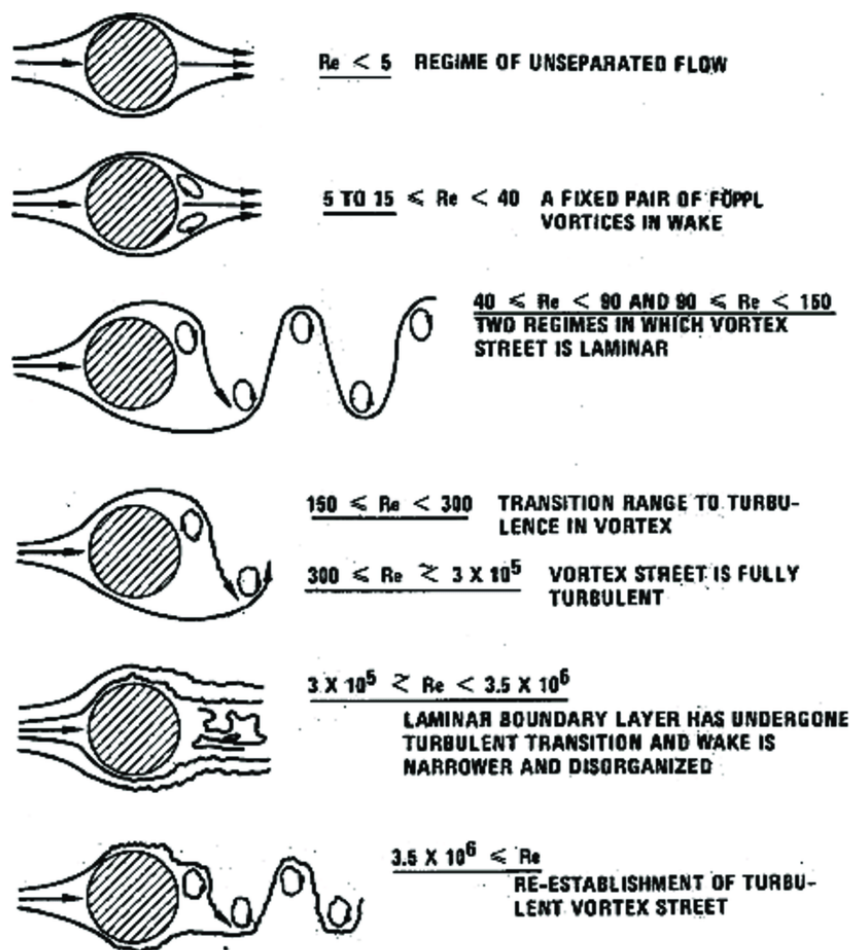
$$St = \frac{f \cdot D}{2U} \quad (4.12)$$

Amb la informació experimental obtinguda per al cilindre de niló Ertalon i mostrada a la taula 4.7, es calculen els nombres de Reynolds (Re) i Strouhal (St) per a cada velocitat del flux d'aire i la corresponent freqüència d'oscil·lació del cilindre, segons es mostra a la taula 4.8.

Taula 4.8: Nombres de Reynolds (Re) i Strouhal (St) a les diferents velocitats del flux d'aire i freqüències d'oscil·lació del cilindre.

Velocitat (U) [m/s]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]	Nombre de Reynolds (Re)	Nombre de Strouhal (St)
6	12,862	2273	$6,43 \cdot 10^{-3}$
9	14,950	3409	$4,98 \cdot 10^{-3}$
12	9,988	4545	$2,50 \cdot 10^{-3}$
15	12,360	5682	$2,47 \cdot 10^{-3}$
18	14,444	6818	$2,41 \cdot 10^{-3}$
21	12,721	7955	$1,82 \cdot 10^{-3}$

Observant que l'ordre de magnitud del nombre de Reynolds segons les velocitats del flux d'aire en estudi és d'entre  $10^3$  i  $10^4$ , i a partir de la figura 4.20, es dedueix que el carrer de vòrtexs és totalment turbulent. Aquest es tracta del rang de Reynolds subcrític, en el qual les capes límit laminars es separen a aproximadament  $80^\circ$  de darrere del morro del cilindre i el despeniment de vòrtexs és periòdic i intens [5].

Figura 4.20: Règims del flux de fluid al llarg de cilindres circulars llisos (Font: *Eight(y) mathematical questions on fluids and structures* [21]).

A continuació, en la figura 4.21 es mostra gràficament la dependència del nombre de Strouhal (St) amb el nombre de Reynolds (Re) per al cas d'estudi del cilindre de niló Ertalon, considerant els resultats obtinguts en la taula 4.8.

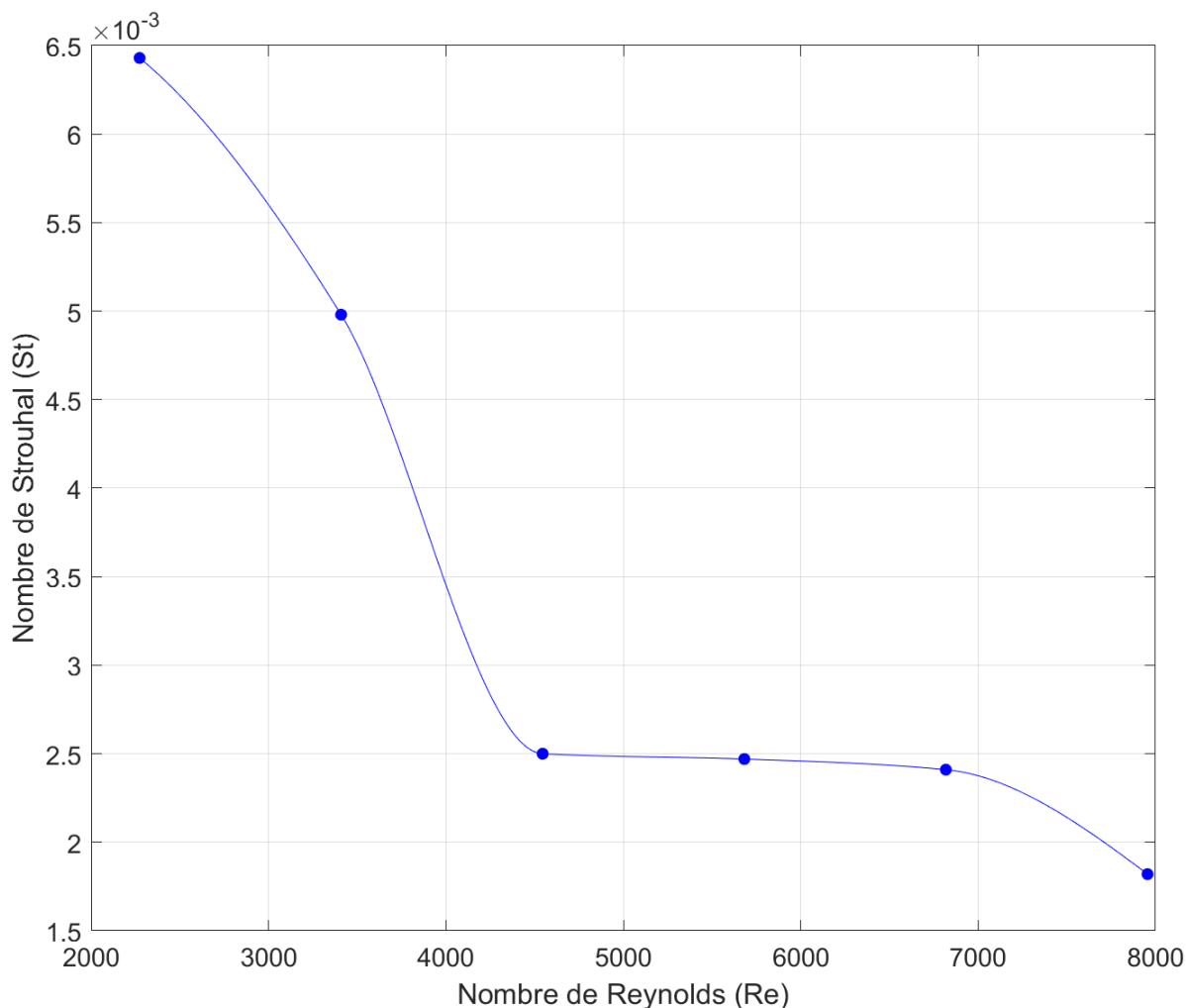


Figura 4.21: Nombre de Strouhal (St) en funció del nombre de Reynolds (Re).

S'observa clarament en la figura 4.21 que el nombre de Strouhal disminueix amb l'augment del nombre de Reynolds. Tot i així cal destacar que a partir d'un nombre de Reynolds de 4545 ( $U = 12$  m/s) fins a un nombre de Reynolds de 6818 ( $U = 18$  m/s) el nombre de Strouhal es manté en un rang considerablement constant i aproximadament al voltant de  $2,46 \cdot 10^{-3}$ . El fet que el nombre de Strouhal es mantingui gairebé constant en aquest rang de velocitats (de 12 m/s a 18 m/s) era d'esperar, ja que en la figura 4.16d es pot observar com la freqüència d'oscil·lació del cilindre augmenta mentre la velocitat del flux d'aire augmenta.

Per a l'anàlisi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) es necessari conèixer la freqüència natural ( $f_N$ ) del cilindre. Conèixer el valor d'aquesta freqüència és necessari perquè el fet d'augmentar o disminuir la velocitat del flux d'aire incident de manera que la freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) del cilindre s'aproximi a la freqüència natural ( $f_N$ ) del cilindre elàstic, fa que s'entri en ressonància. La conseqüència d'aquesta aproximació resulta en grans amplituds de vibració del cilindre causades per l'augment substancial d'energia provocat per les oscil·lacions ressonants de l'estela [5]. D'aquesta manera, per tal de saber si el cilindre entra en ressonància,



en primer lloc és necessari obtenir el valor de la seva freqüència natural.

La freqüència natural (primer mode) d'un cilindre uniforme encastat únicament per un extrem es defineix segons la següent equació [5]:

$$f_N = \frac{3,52}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot I_z}{m \cdot L^4}} \quad (4.13)$$

En aquest cas, es coneix tant el mòdul de Young del niló Ertalon ( $E_s = 741$  MPa) obtingut experimentalment en l'apartat 4.4.1 i la longitud del cilindre ( $L = 25$  cm). Per tant, es necessari obtenir el valor del segon moment d'inèrcia ( $I_z$ ) i la massa estructural per unitat de longitud ( $m$ ).

El segon moment d'inèrcia o d'àrea (pla, i no polar) per a una secció transversal circular i en aquest cas en la direcció  $z$  (segons els eixos de la figura 4.1) per al cas en estudi, és el següent [22]:

$$I_z = \frac{\pi}{4} (R)^4 \quad (4.14)$$

$$I_z = \frac{\pi}{4} (3 \cdot 10^{-3})^4 = 6,36 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$$

La massa estructural per unitat de longitud, s'obté de la multiplicació de la densitat del niló Ertalon ( $\rho_s = 1265$  kg/m<sup>3</sup>) obtinguda experimentalment en l'apartat 4.4.1 i la superfície transversal del cilindre circular.

$$m = \rho_s \cdot S = \rho_s \cdot (\pi \cdot R^2) \quad (4.15)$$

$$m = 1265 \cdot (\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2) = 3,58 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}$$

Amb aquests dos valors, la freqüència natural del cilindre de niló Ertalon resulta en:

$$f_N = \frac{3,52}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(741 \cdot 10^6) \cdot (6,36 \cdot 10^{-11})}{(3,58 \cdot 10^{-2}) \cdot (25 \cdot 10^{-2})^4}} = 10,291 \text{ Hz}$$

A continuació, per a analitzar si el cilindre entra en ressonància al llarg de les sis velocitats del flux d'aire incident estudiades, es defineixen tres nombres adimensionals: la velocitat reduïda ( $U^*$ ), la amplitud adimensional ( $A^*$ ) i la freqüència adimensional ( $f^*$ ) [5].

$$U^* = \frac{U}{f_N D} \quad (4.16)$$

$$A^* = \frac{A}{D} \quad (4.17)$$

$$f^* = \frac{f}{f_N} \quad (4.18)$$

Amb els resultats experimentals per al cilindre de niló Ertalon presentats en la taula 4.7, el diàmetre i la freqüència natural del cilindre calculada, és possible obtenir cadascun dels valors adimensionals corresponents per a cadascuna de les sis velocitats del flux d'aire en estudi i presentats en la taula 4.9.

Taula 4.9: Nombres adimensionals d'interès per a l'anàlisi de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV).

Velocitat reduïda ( $U^*$ )	Amplitud adimensional ( $A^*$ )	Freqüència adimensional ( $f^*$ )
97,2	$1,18 \cdot 10^{-2}$	1,250
145,8	$1,78 \cdot 10^{-2}$	1,453
194,4	$3,73 \cdot 10^{-2}$	0,971
242,9	$3,55 \cdot 10^{-2}$	1,201
291,5	$5,93 \cdot 10^{-2}$	1,404
340,1	$7,62 \cdot 10^{-2}$	1,236

La corresponent representació tant de l'amplitud adimensional (en color blau), com de la freqüència adimensional (en color vermell) en funció de la velocitat reduïda, es mostra en la figura 4.22.

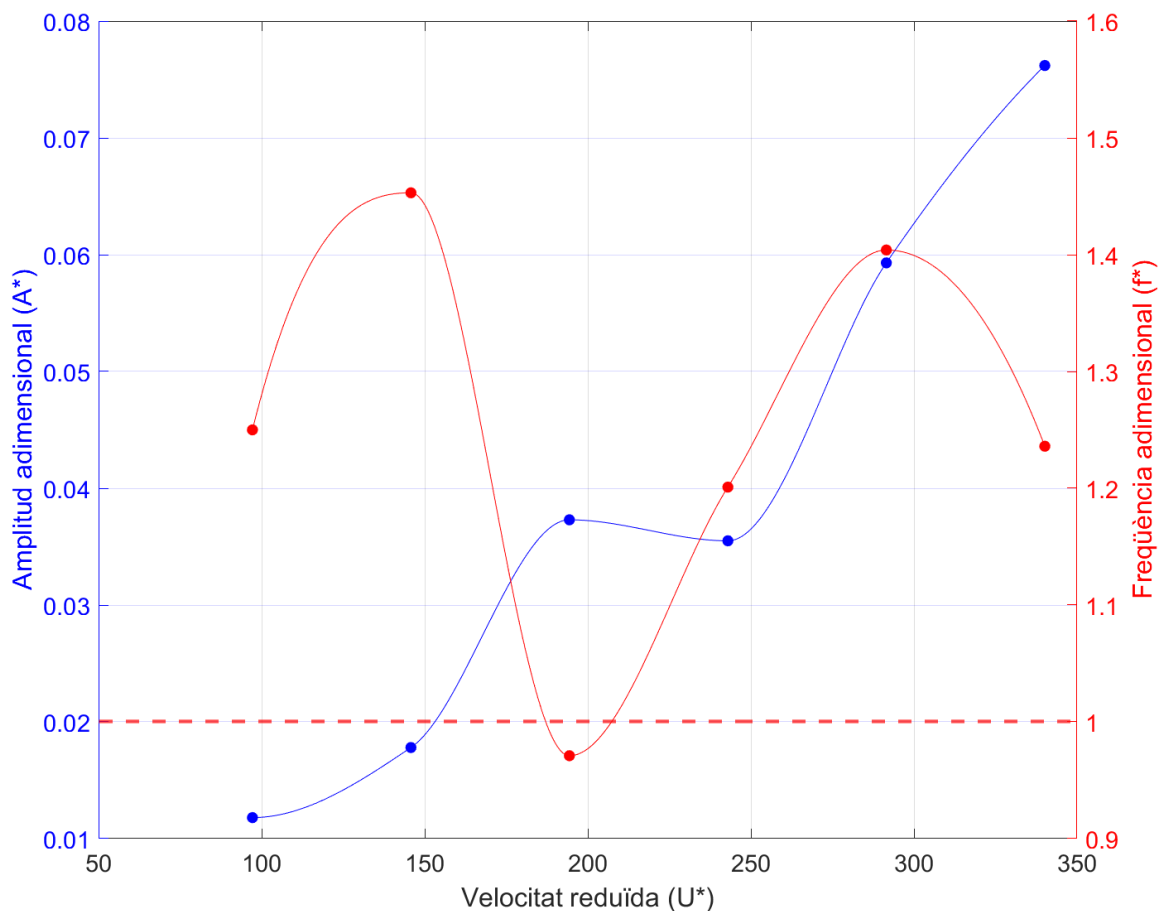


Figura 4.22: Amplitud adimensional ( $A^*$ ) en color blau i freqüència adimensional ( $f^*$ ) en color vermell, en funció de la velocitat reduïda ( $U^*$ ). La línia discontinua vermella únicament indica la condició de ressonància ( $f^* = 1$ ).

Per tal que es produeixi el fenomen de la ressonància, que resulta en un augment de l'amplitud en la vibració del cilindre, s'ha de complir la següent condició:

$$f^* = \frac{f}{f_N} = 1$$

$$f = f_N \quad (4.19)$$

A partir de la figura 4.22 es pot observar amb claredat que l'únic cas en que es compleix la condició de ressonància en que la freqüència adimensional ( $f^*$ ) és molt pròxima a un valor igual a 1 (línia discontinua vermella representada en la figura), és a una velocitat reduïda ( $U^*$ ) igual a 194,4 que es correspon amb una velocitat del flux d'aire igual a 12 m/s. L'aspecte important a destacar és que en aquest mateix punt, l'amplitud adimensional ( $A^*$ ) és més elevada que l'amplitud adimensional per al següent increment en la velocitat del flux d'aire (de 15 m/s) i també a l'anterior (de 9 m/s). Per tant, a conseqüència d'aquest augment substancial en l'amplitud d'oscil·lació del cilindre, es conclou que el cilindre sí que entra en ressonància a una velocitat del flux d'aire de 12 m/s, en la qual l'amplitud és igual a 0,224 mm. Tot i així, cal remarcar que per a les velocitats reduïdes de 291,5 (18 m/s) i 340,1 (21 m/s) l'amplitud és més elevada que no pas l'experimentada pel cilindre a 12 m/s, aspecte que té relació directa amb l'augment de les forces sobre el cilindre i no amb el fenomen de la ressonància.

La velocitat en la qual el cilindre entra en ressonància també era possible de deduir considerant la condició de ressonància exposada juntament amb l'equació de la freqüència d'oscil·lació del cilindre segons l'equació del nombre de Strouhal. És a dir:

$$f = f_N$$

$$\frac{St \cdot 2U}{D} = f_N$$

$$U = \frac{f_N \cdot D}{2St} \quad (4.20)$$

Tenint en compte la freqüència natural calculada, el diàmetre del cilindre i finalment un nombre de Strouhal igual a  $2,46 \cdot 10^{-3}$ , ja que es tracta del número al voltant del qual aquest es manté aproximadament constant segons l'augment en el nombre de Reynolds (figura 4.21), s'obté el valor de la velocitat del flux d'aire en la qual el cilindre hauria d'entrar en ressonància:

$$U = \frac{10,291 \cdot (6 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot (2,46 \cdot 10^{-3})} = 12,55 \text{ m/s} \approx 12 \text{ m/s}$$

S'observa que la velocitat obtinguda de 12 m/s és la mateixa velocitat en la qual s'observa experimentalment el fenomen de la ressonància segons la figura 4.22.

Finalment, per tal d'analitzar si l'amplitud de la vibració induïda per vòrtexs ressonant és significant, es

calcula el factor d'amortiment reduït ( $\delta_r$ ). Si el valor del factor d'amortiment reduït és superior a 64, es considera que les amplituds ressonants no són significants [5].

L'equació que determina el factor d'amortiment reduït és la següent:

$$\delta_r = \frac{2m \cdot (2\pi \cdot \xi)}{\rho_f \cdot D^2} \quad (4.21)$$

En aquest cas l'amortiment estructural ( $\xi$ ) per al niló és igual a 0,05 aproximadament [23]. Pel que fa a la densitat de l'aire ( $\rho_f$ ) és de 1,161 kg/m<sup>3</sup> (segons la taula 5.4). D'aquesta manera, el factor d'amortiment reduït resulta en:

$$\delta_r = \frac{2 \cdot (3,58 \cdot 10^{-2}) \cdot (2\pi \cdot 0,05)}{1,161 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2} \approx 538 > 64$$

El valor obtingut per al factor d'amortiment reduït és de 538, que és molt superior a 64. Aquest fet significa que l'amplitud en ressonància no és significant a causa del gran amortiment estructural del niló. Aquesta afirmació es pot contemplar simplement observant que l'amplitud en ressonància ( $A = 0,224$  mm) equival tan sols a un 3,7% del diàmetre del cilindre ( $D = 6$  mm).

## Capítol 5

# Estudi numèric

En aquest capítol es presenta l'estudi numèric dut a terme fent ús d'una eina per a OpenFOAM anomenada *solids4Foam* amb capacitats per a la mecànica dels sòlids i per a interaccions fluid-estructura [1]. Aquesta eina ha estat desenvolupada principalment per Philip Cardiff i Zeljko Tukovic, amb contribucions d'altres autors, en particular de Danial Khazaei.

L'eina *solids4Foam* conté diversos tutorials en els quals s'analitza la interacció fluid-estructura. En concret, el tutorial *linearGeometryElasticBeam* que es troba dins la carpeta *beamInCrossFlow* es tracta d'un cas en el qual una biga rectangular i elàstica disposada en vertical i en voladís (és a dir, encastada per tan sols l'extrem inferior) està sotmesa a un flux extern creuat.

D'aquesta manera, s'ha utilitzat com a base aquest tutorial per tal de modificar-lo i desenvolupar el cas a estudiar d'interacció fluid-estructura entre el flux d'aire extern i el cilindre circular recte.

### 5.1 Estructura del cas d'estudi amb *solids4Foam*

L'estructura del cas d'estudi amb *solids4Foam* (complet a l'Annex 3.1) es presenta en el següent esquema:

- *0*
  - *fluid*
    - ◆ *U*
    - ◆ *p*
    - ◆ *pointMotionU*
    - ◆ *k*
    - ◆ *omega*
    - ◆ *nut*
  - *solid*
    - ◆ *D*
    - ◆ *pointD*

● *constant*

- *physicsProperties*
- *fsiProperties*
- *fluid*
  - ◆ *dynamicMeshDict*
  - ◆ *fluidProperties*
  - ◆ *transportProperties*
  - ◆ *polyMesh*
    - *blockMeshDict*
  - ◆ *turbulenceProperties*
  - ◆ *RASProperties*
- *solid*
  - ◆ *dynamicMeshDict*
  - ◆ *solidProperties*
  - ◆ *mechanicalProperties*
  - ◆ *polyMesh*
    - *blockMeshDict*

● *system*

- *decomposeParDict*
- *controlDict*
- *functions*
- *fluid*
  - ◆ *decomposeParDict*
  - ◆ *fvSchemes*
  - ◆ *fvSolution*
- *solid*
  - ◆ *decomposeParDict*
  - ◆ *fvSchemes*
  - ◆ *fvSolution*
- *linearGeometryElasticBeam.scr*
- *linearGeometryElasticBeam.foam*

## 5.2 Pre-processament

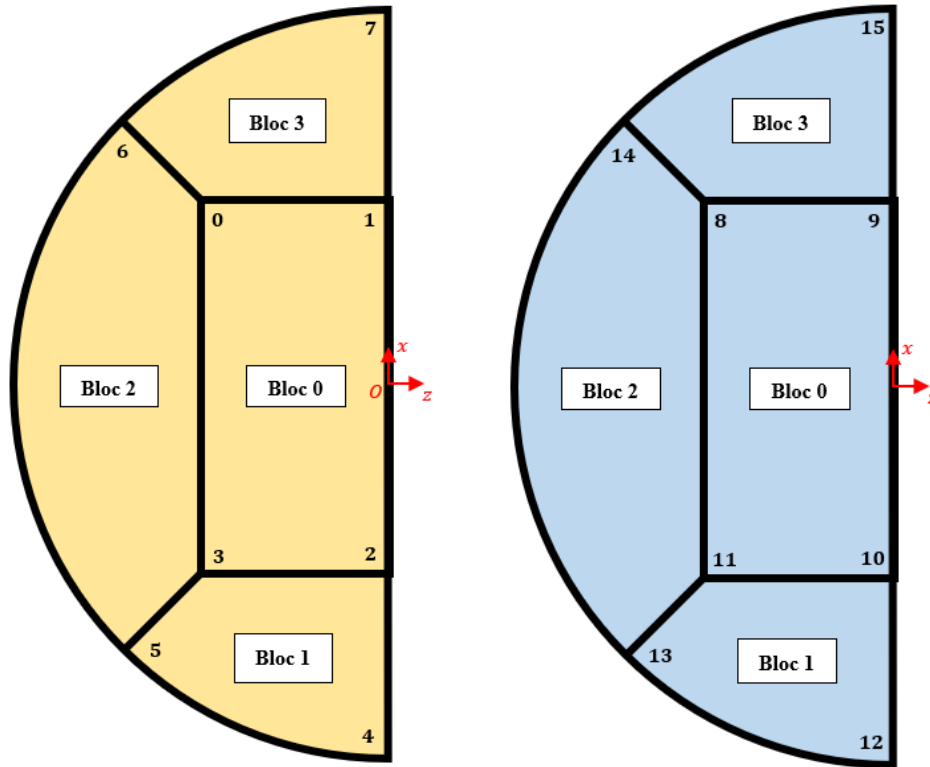
### 5.2.1 Creació de les malles

#### 5.2.1.1 Sòlid

Per a la creació de la malla del sòlid, s'ha editat el diccionari *blockMeshDict*, dins la carpeta *constant/solid/polyMesh*.

El sòlid es tracta d'un cilindre circular recte amb les dimensions de longitud (L) i diàmetre (D) presentades a la taula 4.3 (cilindre de niló Ertalon). Per a la obtenció de la seva malla s'han creat un total de 4 blocs seguint aproximadament les indicacions del document *Mesh generation using blockMesh* de Wolf Dynamics [24], però en aquest cas considerant la simetria del cas amb l'objectiu de reduir els càlculs necessaris durant el procés de simulació i conseqüentment augmentar la rapidesa d'aquestes simulacions. Tal com es pot observar en la figura 5.1, per a obtenir aquests 4 blocs, en primer lloc s'han definit un total de 8 vèrtexs al nivell 0 (que es tracta de la altura  $y = 0$  cm). A continuació, els mateixos 8 vèrtexs s'han definit però al nivell 1 (que es tracta de la altura  $y = 25$  cm). A més a més, també ha sigut necessari definir cadascun dels arcs circulars

existents entre els vèrtexs corresponents tant en el nivell 0 com en el nivell 1 del cilindre.



(a) Cara inferior del sòlid. Distribució dels vèrtexs i els blocs al nivell 0 ( $y = 0$  cm).

(b) Cara superior del sòlid. Distribució dels vèrtexs i els blocs al nivell 1 ( $y = 25$  cm).

Figura 5.1: Esquema de la creació de la malla completa del sòlid en 4 blocs editant el *blockMeshDict*.

Cadascun d'aquests blocs definits són hexaedres i el número de cel·les en els quals s'ha dividit cadascun d'ells s'ha especificat de manera que la malla sigui conforme, és a dir, que el nombre de nodes de cada bloc en cadascuna de les tres direccions coincideixi perfectament amb els nodes del bloc que té al costat (tal com es mostra a la figura 5.2).

Pel que fa al tipus de contorn per a les cares externes del sòlid, en la taula 5.1 es presenta el tipus de contorn aplicat per a cada cara externa de la malla del cilindre.

Taula 5.1: Tipus de contorn per a les cares externes de la malla del sòlid.

Cara de la malla del sòlid	Tipus de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>wall</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>wall</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>symmetryPlane</i>

En aquest cas, la interfície engloba la superfície lateral (superfície que va des del nivell 0 fins al nivell 1) i la cara superior del cilindre, ja que són les superfícies que estan en contacte amb el fluid. En canvi, la cara inferior no està en contacte amb el fluid perquè es tracta de l'encastament del propi cilindre al terra. El tipus

de contorn en els dos casos és de *wall* perquè es tracten de parets rígides. La cara simetria, com que es tracta del pla de simetria de la malla, es defineix com a *symmetryPlane*.

Per acabar, la malla definitiva s'obté realitzant el *blockMesh* de la regió del sòlid i es visualitza amb ParaView, tal com es pot observar a la figura 5.2. D'acord amb la informació de la malla del *blockMesh*, el nombre total de cel·les de la malla del sòlid és igual a 5500.

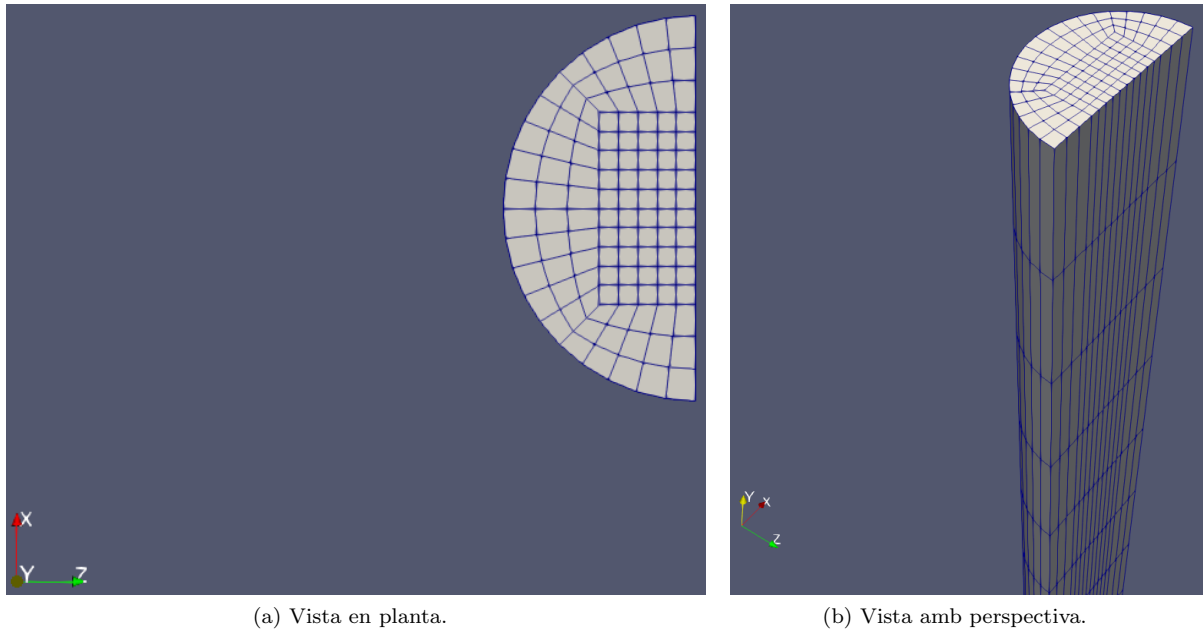


Figura 5.2: Malla definitiva del sòlid (considerant la simetria del cas d'estudi) visualitzada amb ParaView.

### 5.2.1.2 Fluid

Per a la creació de la malla del fluid, s'ha editat el diccionari *blockMeshDict*, dins la carpeta *constant/fluid/polyMesh*.

Per a obtenir la malla del fluid és necessari definir blocs que envoltin el domini de la malla de l'estructura sòlida. Així doncs, s'han seguit de manera aproximada les indicacions aplicades en el cas de *Flow around a cylinder* de la pàgina web d'OpenFOAM [25]. En aquest cas és necessari que la malla del fluid envolti el cilindre tant per la part lateral com per la part superior de manera que també es pugui definir la interfície (*interface*) per a la malla del fluid.

En primer lloc, s'ha definit un espai rectangular exclouent el domini del cilindre sòlid, dividit en un total de 8 blocs. Aquest espai va des del nivell 0 ( $y = 0$  cm) al nivell 1 ( $y = 25$  cm) de manera que la malla del fluid envolti tota la superfície lateral del cilindre. Tal com es pot observar en la figura 5.3, per a crear els blocs, s'han definit 16 vèrtexs en el nivell 0 i també els mateixos en el nivell 1. En aquest cas, s'ha creat un disc central (la meitat d'un disc, concretament) amb un radi interior igual al del cilindre (és a dir, 3 mm) i un radi exterior de 2 cm. Per tant, ha sigut necessari definir aquests arcs circulars existents entre els vèrtexs apropiats tant en el nivell 0 com en el nivell 1. Pel que fa a les superfícies exteriors, tant l'entrada (*inlet*) com la superfície esquerra (*left*) s'han definit a una distància de 3 cm respecte el centre del cilindre (equivalent a 5



vegades el diàmetre del cilindre). En canvi, la sortida (*outlet*) s'ha definit a una distància de 12 cm respecte el centre del propi cilindre (equivalent a 20 vegades el diàmetre del cilindre).

Cal remarcar que en les figures 5.3 i 5.4, l'entrada (*inlet*) és la superfície delimitant que es troba en sentit negatiu de l'eix x respecte l'origen de coordenades del cilindre i la sortida (*outlet*) és la superfície delimitant que es troba en sentit positiu de l'eix x respecte l'origen de coordenades del cilindre.

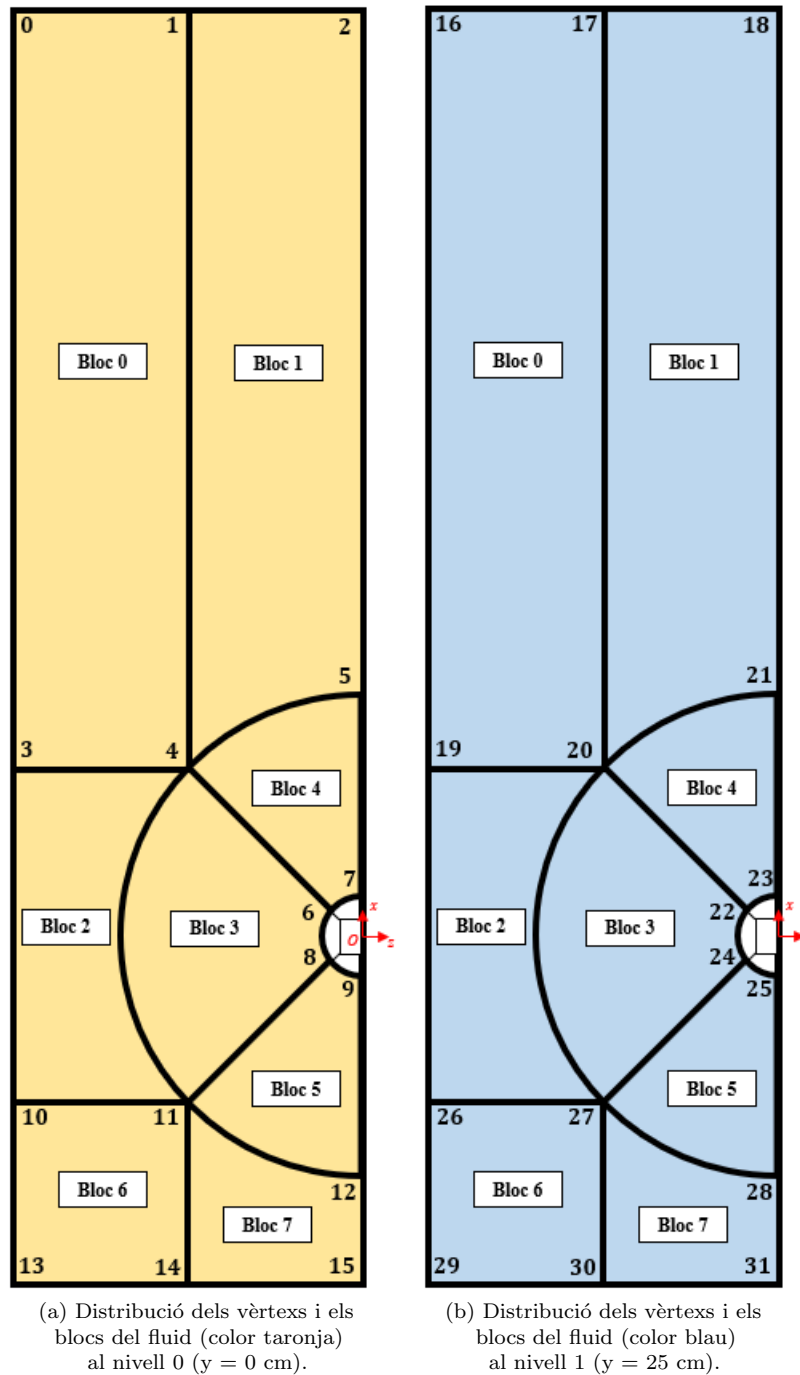


Figura 5.3: Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 0 al nivell 1 editant el *blockMeshDict*.

En segon lloc és necessari crear la part de la malla del fluid per la part superior del cilindre. Aleshores, s'ha

definit un espai per a la malla del fluid de manera que vagi des del nivell 1 ( $y = 25$  cm) al nivell 2 ( $y = 30$  cm), ja que en aquest cas s'ha determinat una distància de 5 cm respecte la superfície superior del cilindre per a la malla del fluid.

De la mateixa manera que la malla anteriorment creada (figura 5.3) i que envolta la superfície lateral del cilindre, inicialment es crea la mateixa malla del fluid però des del nivell 1 al nivell 2, tal com es mostra en la figura 5.4.

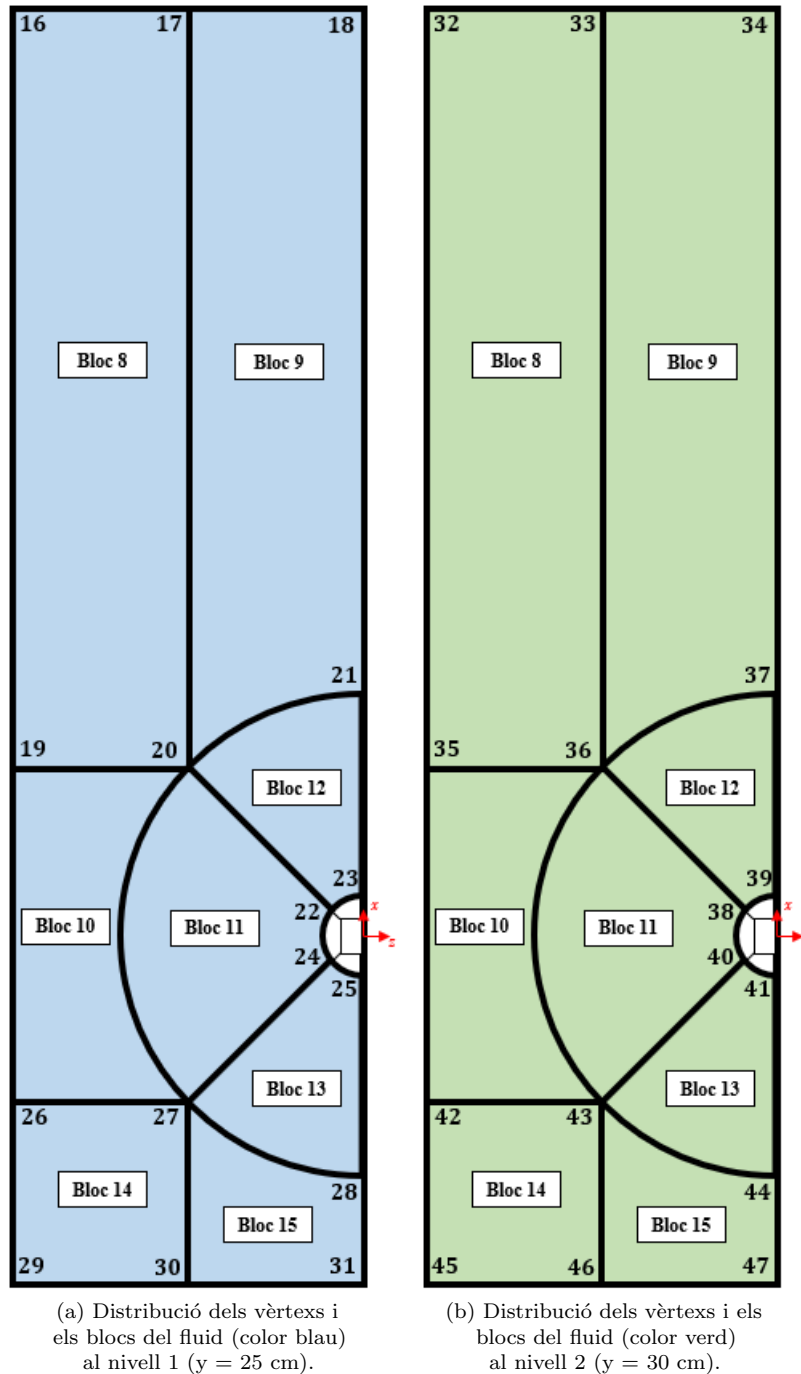


Figura 5.4: Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 1 al nivell 2 editant el *blockMeshDict*.

A continuació, és necessari definir la part de la malla del fluid que també va des del nivell 1 al nivell 2 però que està en contacte directe amb la superfície superior del cilindre. Per a crear aquesta malla, s'ha seguit el mateix procediment que el seguit per a obtenir la malla creada per al sòlid (apartat 5.2.1.1) però en aquest cas des del nivell 1 al nivell 2, tal com s'exposa a la figura 5.5.

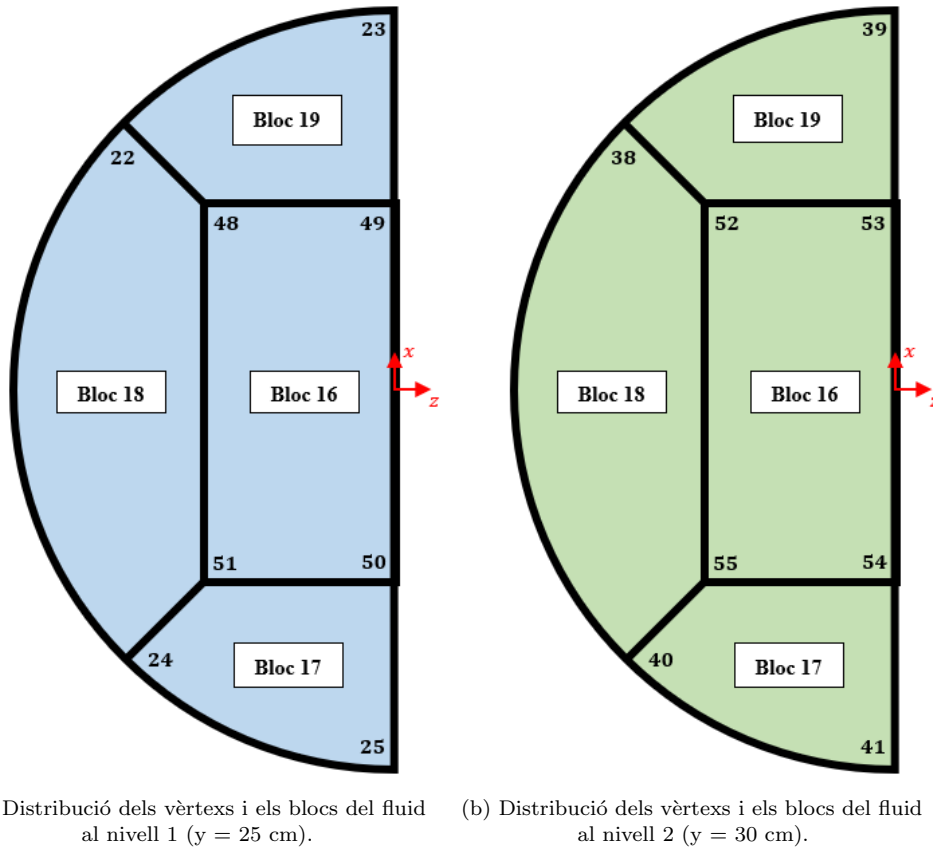


Figura 5.5: Esquema de la creació de la malla del fluid en blocs des del nivell 1 al nivell 2 justament damunt de la cara superior del sòlid editant el *blockMeshDict*.

Tots els blocs definits per a la malla del fluid (del nivell 0 al nivell 1, i del nivell 1 al nivell 2) són hexaedres. De la mateixa manera que per a la malla del sòlid, el número de cel·les en els quals s'ha dividit cadascun dels blocs s'ha definit de manera que la malla sigui conforme, o el que és el mateix, que el nombre de nodes de cada bloc en cadascuna de les tres direccions coincideixi perfectament amb els nodes del bloc que té al costat (tal com es mostra a la figura 5.6). No únicament s'ha especificat per a que sigui conforme entre els propis blocs de la malla del fluid, sinó que també s'ha tingut en compte que sigui conforme amb la malla del sòlid creada anteriorment (en la interfície, exactament).

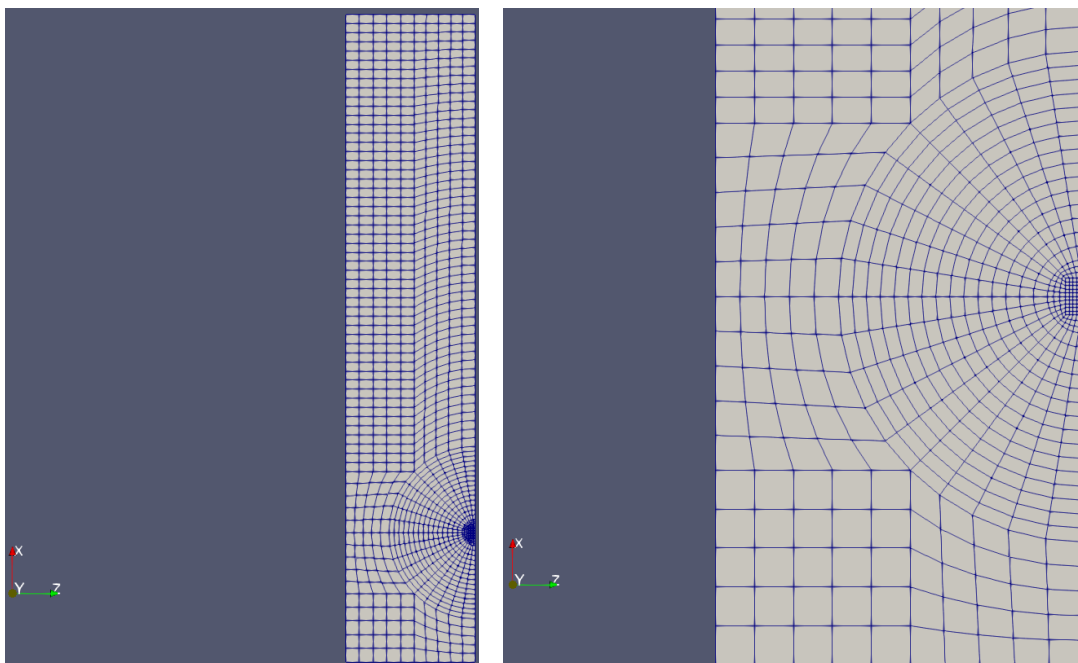
Finalment, pel que fa al tipus de contorn per a les cares externes de la malla completa del fluid, en la taula 5.2 es presenta el tipus de contorn aplicat per a cada una d'elles.

Taula 5.2: Tipus de contorn per a les cares externes de la malla del fluid.

Cara de la malla del fluid	Tipus de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>wall</i>
Sortida ( <i>outlet</i> )	<i>patch</i>
Entrada ( <i>inlet</i> )	<i>patch</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>wall</i>
Superior ( <i>top</i> )	<i>wall</i>
Esquerra ( <i>left</i> )	<i>wall</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>symmetryPlane</i>

Totes les cares de la malla del fluid s'han definit com a *wall* ja que es consideren com parets rígides, a excepció de l'entrada (*inlet*) i la sortida (*outlet*) que s'han definit com a *patch* perquè és per on el flux d'aire entra i surt, respectivament, i a excepció de la cara simetria que es tracta del pla de simetria i s'ha definit corresponentment com a *symmetryPlane*. Cal mencionar que en el procés d'experimentació definitiu dut a terme amb el cilindre de niló Ertalon (apartat 4.4), les superfícies inferior, superior i esquerra definides com a *wall* realment no són parets rígides. Tot i així, en l'estudi numèric s'han considerat així per a què les simulacions funcionin de manera correcta i conseqüentment els resultats obtinguts tinguin coherència. Així mateix, aquest aspecte no és rellevant perquè no afecta de manera significativa a la interacció entre el fluid i el sòlid ja que en general aquestes superfícies es troben suficientment allunyades del cilindre.

Per acabar, la malla definitiva s'obté realitzant el *blockMesh* de la regió del fluid i es visualitza amb ParaView, segons es mostra a la figura 5.6. D'acord amb la informació de la malla del *blockMesh*, el nombre total de cel·les de la malla del fluid és igual a 55100.



(a) Vista en planta.

(b) Vista en planta detallada.

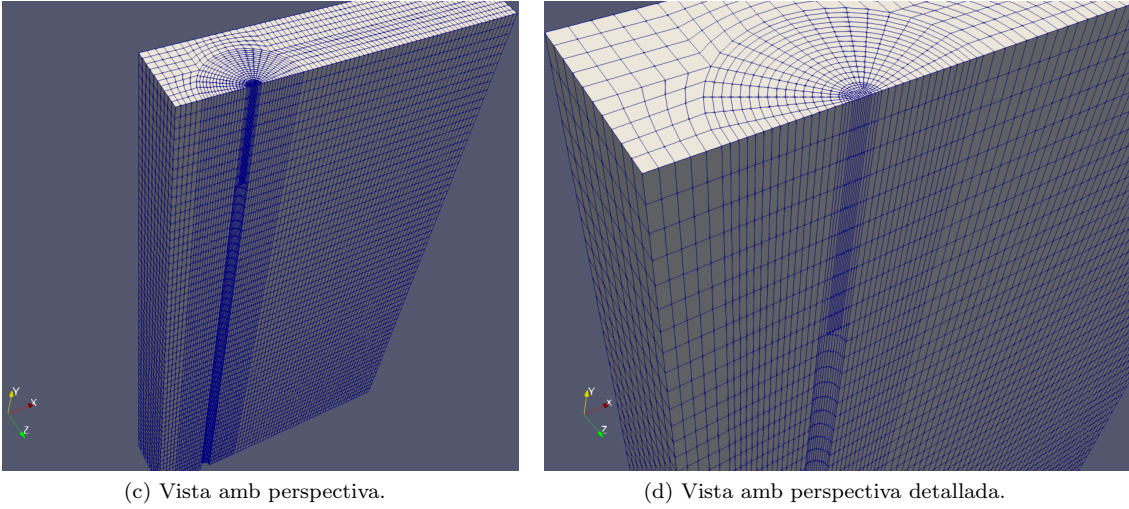


Figura 5.6: Malla definitiva del fluid (considerant la simetria del cas d'estudi) visualitzada amb ParaView.

## 5.2.2 Selecció dels models

### 5.2.2.1 Sòlid

Per al cilindre sòlid s'ha considerat un model matemàtic en el qual es considera una aproximació mecànica de geometria lineal (*linear geometry*). L'aproximació de geometria lineal, també coneguda com a hipòtesi de petites deformacions/rotacions (*small strain/rotation*) assumeix que la geometria de la cel·la (volums, superfícies de les diferents cares, etc.) és independent al camp de desplaçaments. És a dir, que els desplaçaments que es produeixen no afecten la geometria del material. Aquesta assumpció només és correcta quan les deformacions són relativament petites [26].

Considerant la hipòtesi esmentada, l'equació de la conservació del moment lineal en forma integral del sòlid [27] és la següent:

$$\int_{\Omega_0} \rho_{s,0} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} d\Omega_0 = \oint_{\Gamma_0} n_0 \cdot \sigma_s d\Gamma_0 + \int_{\Omega_0} \rho_{s,0} b d\Omega_0 \quad (5.1)$$

Equivalentment, l'equació anterior es pot expressar segons l'increment de desplaçament ( $\Delta u = u - u_{[m-1]}$ ) de la següent manera:

$$\int_{\Omega_0} \rho_{s,0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_{[m-1]} + \Delta u) d\Omega_0 = \oint_{\Gamma_0} n_0 \cdot \sigma_s d\Gamma_0 + \int_{\Omega_0} \rho_{s,0} b d\Omega_0 \quad (5.2)$$

En aquest model matemàtic de geometria lineal, la tensió mecànica ( $\sigma_s$ ) ha d'estar definida per una llei constitutiva en que es consideri l'assumpció de petites deformacions, petites rotacions i geometria lineal.

D'aquesta manera, s'ha definit la llei elàstica lineal de Hooke (*linear (Hookean) elastic*) com a la llei mecànica representativa per al cilindre elàstic per tal de calcular el tensor de tensions [27]. Aquesta llei implica que el material es comporta de forma elàstica i lineal de manera que la deformació no sigui permanent. És a dir, la tensió mecànica és una funció lineal del vector de desplaçaments. Conseqüentment, el model matemàtic de geometria lineal passa a ser també una funció lineal del camp de desplaçaments ( $u$ ).

L'equació constitutiva per a un material elàstic lineal homogeni i isòtrop, anomenada llei elàstica lineal de Hooke [27, 28], en un cas tridimensional (3D) és la següent:

$$\sigma_s = 2\mu\epsilon + \lambda \text{tr}[\epsilon] I_{id} \quad (5.3)$$

on  $\lambda$  i  $\mu$  són els paràmetres de Lamé i  $\epsilon$  és el tensor de deformació linealitzat.

El tensor de deformació linealitzat ( $\epsilon$ ) es defineix en termes del gradient del desplaçament:

$$\epsilon = \text{symm} [\nabla u] = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (5.4)$$

Pel que fa als paràmetres de Lamé, es tracten de dues constants elàstiques definides pel mòdul de Young ( $E_s$ ) i el coeficient de Poisson ( $\nu_s$ ) del material. El primer paràmetre de Lamé ( $\lambda$ ) i el segon paràmetre de Lamé o mòdul d'elasticitat transversal ( $\mu$ ) es defineixen de la següent manera:

$$\lambda = \frac{E_s \nu_s}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \quad (5.5)$$

$$\mu = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \quad (5.6)$$

Per a implementar aquest model lineal per al sòlid al cas desenvolupat amb `solids4Foam`, dins la carpeta `constant/solid` s'han definit 2 diccionaris: `solidProperties` i `mechanicalProperties`.

- En el diccionari `solidProperties`, s'ha determinat que el model per al sòlid és el de `linearGeometryTotalDisplacement`. Aquest model de geometria lineal resol considerant el desplaçament total ( $u$ ), en diferència amb altres models que resolen considerant l'increment de desplaçament ( $\Delta u$ ) [29]. Per a la resolució numèrica del model del sòlid, dins la carpeta `system/solid` s'han definit els diccionaris `fvSchemes` i `fvSolution` corresponents. En el diccionari `fvSchemes` s'especifiquen els esquemes numèrics i les seves propietats pels diferents termes i en el diccionari `fvSolution` s'especifiquen els `solvers` de les equacions lineals amb els paràmetres numèrics corresponents juntament amb els factors de relaxació [30, 31, 32].
- En el diccionari `mechanicalProperties` s'especifica la llei mecànica constitutiva del sòlid juntament amb les propietats del material. Tal com s'ha comentat, s'ha determinat el tipus de llei mecànica `linearElastic`, que es correspon amb la llei elàstica lineal de Hooke. Pel que fa a les propietats físiques i mecàniques del material, que es tracta de niló Ertalon 6 SA, aquestes es resumeixen en la taula 5.3.

Taula 5.3: Propietats físiques i mecàniques del niló Ertalon 6 SA segons la fitxa tècnica i segons els càlculs experimentals.

Niló Ertalon 6 SA	Fitxa tècnica	Experimental
Densitat ( $\rho_s$ ) [ $kg/m^3$ ]	1140	1265
Mòdul de Young ( $E_s$ ) [ $MPa$ ]	3300	741
Coefficient de Poisson ( $\nu_s$ )	0,39	

En aquest cas es pot diferenciar entre les propietats del niló Ertalon 6 SA obtingudes de la fitxa tècnica del material [33] i les obtingudes experimentalment (apartat 4.4.1). En el cas del coeficient de Poisson ( $\nu_s$ ) del material s'ha pres el mateix valor i igual a 0,39 [34].

Com es pot observar la diferència entre els valors de la densitat ( $\rho_s$ ) del material és relativament petita, però la diferència entre els valors del mòdul de Young ( $E_s$ ) del material és elevada. L'explicació a aquesta gran diferència és causada principalment per les distintes condicions dels experiments duts a terme en cada cas per a determinar el mòdul de Young del niló (com per exemple: la humitat relativa del lloc, el tipus i forma de l'espècimen utilitzat, la velocitat d'assaig, etc.).

Per acabar, dins la carpeta *constant/solid*, en el diccionari *dynamicMeshDict* s'especifica el moviment de la malla del sòlid i que aquest és estàtic (*staticFvMesh*). En l'eina *solids4Foam* tots els models de sòlid utilitzen aquesta opció perquè en cas que existeixi moviment de la malla del sòlid, aquesta ja està implementada en la pròpia classe de model del sòlid. Tot i així, és important remarcar que tots els models de sòlid calculen la deformació però depenent de la formulació no es mou la malla del sòlid (com és el cas d'estudi en el que s'ha utilitzat el model del sòlid *linearGeometryTotalDisplacement*) perquè en aproximacions Lagrangianes la malla i el camp de deformacions del sòlid no són independents de manera que no és correcte manipular la malla sense tenir-ho en compte en el propi camp de deformacions [35].

### 5.2.2.2 Fluid

Per a flux incompressible i isoterm en un domini estàtic, les equacions de Navier-Stokes en les quals es contempla la conservació de la massa i del moment lineal del fluid en forma integral [27] són les següents, respectivament:

$$\oint_{\Gamma} n \cdot v \, d\Gamma = 0 \quad (5.7)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial v}{\partial t} \, d\Omega + \oint_{\Gamma} v [n \cdot v] \, d\Gamma = \frac{1}{\rho_f} \oint_{\Gamma} n \cdot [\mu_f (\nabla v)] \, d\Gamma - \frac{1}{\rho_f} \int_{\Omega} (\nabla P) \, d\Omega + \int_{\Omega} b \, d\Omega \quad (5.8)$$

Per a implementar el model per al fluid al cas desenvolupat amb *solids4Foam*, dins la carpeta *constant/fluid* s'han definit 2 diccionaris: *fluidProperties* i *transportProperties*.

- En el diccionari *fluidProperties*, s'ha definit que el model per al fluid és el de  *pisoFluid*. Es tracta d'un model per a flux incompressible, transitori i turbulent que utilitza l'algorisme PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) per a resoldre les equacions de Navier-Stokes [36]. Per a la resolució numèrica del model del fluid, dins la carpeta *system/fluid* també s'han definit els diccionaris *fvSchemes* i *fvSolution* corresponents. Per al fluid, en el diccionari *fvSchemes* s'especifiquen també els esquemes numèrics i les seves propietats pels diferents termes i en el diccionari *fvSolution* s'especifiquen els *solvers* de les equacions lineals, les toleràncies, els algorismes i altres paràmetres del mètode numèric [30, 31, 32].
- En el diccionari *transportProperties* s'han determinat les propietats físiques del fluid, que en aquest cas es tracta d'aire. D'aquesta manera, en la taula 5.4 es resumeixen les propietats de l'aire el dia en qual es van dur a terme els experiments definitius al laboratori amb el cilindre de niló Ertalon (apartat 4.4).

Taula 5.4: Propietats físiques de l'aire.

Aire	
Densitat ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	1,161
Viscositat dinàmica ( $\mu_f$ ) [kg/(m · s)] (a 23 °C)	$1,839 \cdot 10^{-5}$
Viscositat cinemàtica ( $\nu_f$ ) [m <sup>2</sup> /s]	$1,584 \cdot 10^{-5}$

Com es pot observar, la densitat de l'aire ( $\rho_f$ ) és la que es correspon amb el dia de les proves experimentals en que la temperatura era de 23°C i la pressió atmosfèrica de 740 mmHg (calculada amb la fórmula corresponent presentada a l'apartat 4.2.2). D'aquesta manera, per al càlcul de la viscositat cinemàtica de l'aire ( $\nu_f$ ) en primer lloc s'ha obtingut el corresponent valor de la viscositat dinàmica ( $\mu_f$ ) a una temperatura de 23°C interpolant linealment d'una taula de propietats de l'aire a 1 atm segons la temperatura (per a gasos ideals la viscositat dinàmica és independent de la pressió) [37]. Finalment, per a obtenir el valor de la viscositat cinemàtica, simplement s'ha dividit la viscositat dinàmica entre la densitat de l'aire ( $\nu_f = \mu_f/\rho_f$ ).

A més a més, també s'ha especificat el model de transport del fluid com a Newtonià (*Newtonian*), que assumeix que la viscositat cinemàtica ( $\nu_f$ ) del fluid és constant i que la relaciona amb la velocitat de deformació (*strain rate*) del fluid [38].

Per acabar, dins la carpeta *constant/fluid*, en el diccionari *dynamicMeshDict* s'especifica el moviment de la malla del fluid i que aquest és de tipus dinàmic (*dynamicMotionSolverFvMesh*) de manera que únicament es modifiquin els nodes interns de la malla [39]. El *solver* determinat per al moviment de la malla del fluid és el *velocityLaplacian*, que es tracta d'un *solver* de volum finit que utilitza Laplace per a calcular el moviment dels nodes interns i que necessita utilitzar les condicions inicials i de contorn especificades en el *pointVectorField* anomenat *pointMotionU* (dins la carpeta *0/fluid*) [39, 40]. En últim lloc, també es defineix el paràmetre *diffusivity quadratic inverseDistance (interface)*. La difusivitat controla com es distribueix el moviment de la malla al llarg de tota la malla completa i en aquest cas per a especificar la rapidesa amb la qual el moviment de la malla es redueix amb la distància, s'utilitza una distància quadràtica inversa des de la interfície (que és la zona que es mou). D'aquesta manera, es produeix una major deflexió de la malla a prop de la interfície i una menor deflexió en zones allunyades [39, 41].

### 5.2.2.3 Turbulència

Tal s'ha comentat en l'apartat 4.4.2 i es pot observar a partir dels resultats del nombre de Reynolds per a cada velocitat d'estudi de la taula 4.8 i la figura 4.20, el flux d'aire és totalment turbulent.

D'aquesta manera s'ha considerat un model de turbulència  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*) per tal de considerar l'efecte de les condicions d'un flux turbulent. Concretament aquest model pertany a la família de models de turbulència RANS (Reynolds-*averaged* Navier-Stokes). Es tracta d'un model turbulent capaç de capturar correctament la separació del flux, que té un comportament adequat en gradients de pressió adversos i que millora les deficiències del model de turbulència estàndard  $k-\omega$ . Aquesta millora és efectuada canviant



cap a un comportament k- $\epsilon$  en el flux lliure, que evita la gran sensibilitat del model k- $\omega$  a les propietats de turbulència del flux lliure definides a l'entrada (*inlet*) [42, 43].

El model k- $\omega$  SST és un model de dues equacions de transport (EDPs) que contempnen la convecció i difusió de l'energia de turbulència i que són resoltes en addició a les equacions de conservació [43]. Aquestes dues equacions són per la dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ) i l'energia cinètica de turbulència ( $k$ ) [44]:

$$\frac{D}{Dt}(\rho_f \omega) = \nabla \cdot (\rho_f D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho_f \gamma G}{\nu_f} - \frac{2}{3} \rho_f \gamma \omega (\nabla \cdot v) - \rho_f \beta \omega^2 - \rho_f (F_1 - 1) CD_{k\omega} + S_\omega \quad (5.9)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho_f k) = \nabla \cdot (\rho_f D_k \nabla k) + \rho_f G - \frac{2}{3} \rho_f k (\nabla \cdot v) - \rho_f \beta^* \omega k + S_k \quad (5.10)$$

En aquest model, la viscositat de turbulència ( $\nu_t$ ) s'obté de la següent manera [44]:

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S)} \quad (5.11)$$

Per a implementar aquest model turbulent al cas d'estudi amb *solids4Foam*, dins la carpeta *constant/fluid* s'han definit 2 diccionaris: *turbulenceProperties* i *RASProperties*.

- En el diccionari *turbulenceProperties* s'ha especificat que el tipus de simulació és *RASModel*. Això permet definir, tal com s'ha comentat anteriorment, que es tracta d'una simulació de tipus RAS (Reynolds-averaged Simulation). Per acabar, en aquest mateix diccionari es dóna la instrucció de que inclogui les especificacions del model RAS definides en el diccionari *RASProperties*.
- En el diccionari *RASProperties* en primer lloc s'ha concretat que el tipus de model RAS és el *kOmegaSST* i s'ha activat la turbulència. A més a més, s'han especificat els coeficients per defecte del model de turbulència *kOmegaSST* (*kOmegaSSTCoeffs*).

### 5.2.3 Metodologia de resolució de la interacció fluid-estructura

A la interfície entre el fluid i el sòlid s'han de complir dues condicions: les cinemàtiques i les dinàmiques [26].

- Les **condicions cinemàtiques** indiquen que tant la velocitat ( $v$ ) com el desplaçament ( $u$ ) han de ser continus al llarg de la interfície. D'aquesta manera, en la interfície la velocitat i el desplaçament del fluid i del sòlid han de ser iguals.

$$v_f^{[i]} = v_s^{[i]} \quad (5.12)$$

$$u_f^{[i]} = u_s^{[i]} \quad (5.13)$$

- Les **condicions dinàmiques** indiquen que a la interfície les forces ( $n \cdot \sigma$ ) estan en equilibri (considerant la conservació del moment lineal).

$$n^{[i]} \cdot \sigma_f^{[i]} = n^{[i]} \cdot \sigma_s^{[i]} \quad (5.14)$$

Tenint en compte aquest aspecte, existeixen dos mètodes per tal de resoldre un cas d'interacció fluid-estructura amb mètodes computacionals: el monolític i el particionat [26] (veure figura 5.7).

- En el **mètode monolític** es formula el sòlid en termes de velocitat i pressió i d'aquesta manera es resolen els dominis del fluid i del sòlid simultàniament. L'avantatge d'aquest mètode és la seva robustesa i eficiència aconseguint una ràpida convergència. Tot i així, són necessaris millors *solvers* lineals i una major memòria.

Aquest mètode encara no està implementat a l'eina `solids4Foam` però en l'actualitat la seva implementació es tracta d'un projecte en curs.

- En el **mètode particionat** les regions del fluid i del sòlid es resolen per separat i s'utilitza un algorisme d'acoblament per tal que es compleixin tant les condicions cinemàtiques com les dinàmiques a la interfície.

L'algorisme d'acoblament implementat a l'eina `solids4Foam` és el de Dirichlet-Neumann. En aquest cas la regió del fluid és resol amb una condició de Dirichlet per a la velocitat a la interfície i la regió del sòlid es resol amb una condició de Neumann per a la tracció a la interfície.

L'algorisme d'acoblament de Dirichlet-Neumann fortament acoblat (*strongly-coupled*) permet que per a cada instant de temps s'executi el següent bucle fins a arribar a la convergència:

1. Resolució del domini del fluid.
2. Intercanvi de les forces del fluid (esforços viscosos i de pressió) des de la banda de la interfície del fluid a la banda de la interfície del sòlid.
3. Resolució del domini del sòlid.
4. Intercanvi dels desplaçaments/velocitats del sòlid des de la banda de la interfície del sòlid a la banda de la interfície del fluid.
5. Interconnexió utilitzant un factor de sota-relaxació (*under-relaxation*).
6. Actualització de la malla del fluid.

En el bucle de l'algorisme és necessari un factor de sota-relaxació per tal de millorar i aconseguir la convergència de l'algorisme d'acoblament de Dirichlet-Neumann fortament acoblat. Aquest factor de sota-relaxació s'aplica en l'intercanvi de les velocitats del sòlid des de la interfície del sòlid a la del fluid.

En l'eina `solids4Foam` tres mètodes de relaxació estan implementats en l'actualitat:

- Sota-relaxació fixada (*fixed under-relaxation*).
- Sota-relaxació dinàmica (*dynamic (Aitken's) under-relaxation*).
- Interconnexió-quasi-Newton amb Jacobià invers a partir d'un model de mínims quadrats (*interface-quasi-Newton with inverse Jacobian from a least-squares model (IQN-ILS)*).

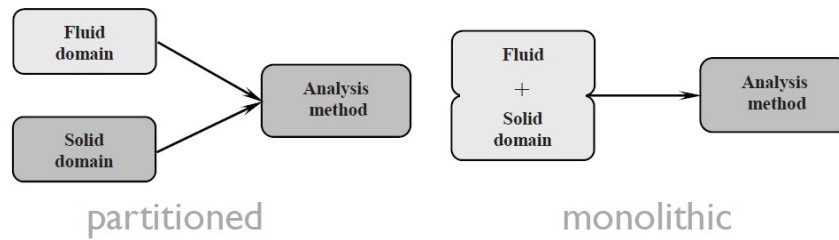


Figura 5.7: Esquema de resolució del mètode particionat i del monolític (Font: *solids4foam training* [26]).

Per a implementar la interacció fluid-estructura al cas d'estudi amb *solids4Foam*, dins la carpeta *constant* s'han definit 2 diccionaris: *physicsProperties* i *fsiProperties*.

- En el diccionari *physicsProperties* és necessari especificar que el cas es tracta d'un cas d'interacció fluid-estructura (*fluidSolidInteraction*). D'aquesta manera, el *solver* (que s'anomena *solids4Foam*) té en compte que dins de les carpetes *0*, *constant* i *system* hi ha en cada una d'elles una carpeta *fluid* i una carpeta *solid* en les quals s'especifiquen les característiques i configuracions determinades per a l'aire i el cilindre, respectivament.
- En el diccionari *fsiProperties* s'especifica el tipus d'algorisme d'acoblament entre les regions del fluid i el sòlid juntament amb la seva configuració. En aquest cas es determina el mètode de relaxació de sota-relaxació dinàmica (*dynamic* (Aitken's) *under-relaxation*) per a l'algorisme d'acoblament de Dirichlet-Neumann fortament acoblat. Les característiques generals de la configuració d'aquest tipus d'algorisme d'acoblament especificades en el mateix diccionari són les següents:
  - El factor de sota-relaxació per a l'intercanvi dels desplaçaments/velocitats del sòlid des de la interfície del sòlid a la del fluid és igual a 0,01. En el mètode de sota-relaxació dinàmica d'Aitken aquest valor s'utilitza sempre en la primera iteració de cada instant de temps i en les següents iteracions va canviant de manera adaptativa [26].
  - La tolerància del bucle d'interacció fluid-estructura dins de cada instant de temps és igual a  $10^{-6}$ .
  - El número màxim de correctors exteriors del bucle d'interacció fluid-estructura dins de cada instant de temps és igual a 20. D'aquesta manera, s'itera dins de cada instant de temps fins a convergir a la tolerància especificada o fins a assolir el màxim número de correctors. En el cas en que s'assoleixi el màxim número de correctors, significa que no s'ha arribat a la convergència [26].
  - El mètode per a la transferència d'informació (esforços, desplaçaments o velocitats) entre la banda de la interfície del fluid i la banda del sòlid és *directMap*. Aquest mètode és útil en casos en que la malla entre el fluid i el sòlid és conforme (*conformal mesh*), és a dir, que els nodes de la malla del fluid coincideixen perfectament amb els nodes de la malla del sòlid en la interfície (com és el cas d'estudi).
  - L'acoblament FSI entre el sòlid i el fluid a l'inici de la simulació està desactivat (*coupled no*). Aquest acoblament s'activa a l'instant de temps (*couplingStartTime*) de 0,01 s. S'ha configurat d'aquesta manera per tal que el flux és desenvolupi abans d'activar l'acoblament FSI i d'aquesta manera

s'evitin problemes relacionats amb efectes d'inestabilitat a l'inici de la simulació [45, 46]. Aquest concret instant de temps de 0,01 segons s'ha escollit després d'una sèrie de proves/simulacions en les quals s'ha observat la força en funció del temps a la interfície i s'ha determinat que el flux s'estabilitza aproximadament a partir d'aquest instant.

## 5.2.4 Condicions inicials i de contorn

### 5.2.4.1 Sòlid

Per a definir les condicions inicials i de contorn per al sòlid, dins la carpeta *0/solid* es defineixen un *volVectorField* i un *pointVectorField*: *D* i *pointD*, respectivament.

- El *volVectorField* anomenat *D* és on es defineixen les condicions inicials i de contorn de les diferents superfícies del sòlid en relació al desplaçament total. Aquestes condicions per a cadascuna de les cares del sòlid es resumeixen en la taula 5.5.

Taula 5.5: Condicions inicials i de contorn per al desplaçament total (D) del sòlid.

Cara de la malla del sòlid	Tipus i valor de la condició de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>solidTraction</i> <i>traction uniform (0 0 0)</i> <i>pressure uniform 0</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>fixedDisplacement</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>solidSymmetry</i> <i>symmetryPlane</i> <i>uniform (0 0 0)</i>

A la interfície la condició *solidTraction* aplica la força per unitat d'àrea del fluid sobre el sòlid [47]. Com a paràmetres inicials, s'especifica que el desplaçament total inicial és igual a 0 i en aquest cas no s'apliquen forces inicials a la interfície, és a dir, el valor de tracció i pressió inicials són iguals a 0. Pel que fa a la cara inferior del cilindre, la condició de *fixedDisplacement* fa que el desplaçament en aquesta superfície sigui igual a 0 i, per tant, es compleixi l'encastament del cilindre per l'extrem inferior (en voladís). Per acabar, en la cara simetria s'aplica la condició de contorn *solidSymmetry* corresponent a una superfície sòlida a partir de la qual existeix simetria en la malla.

- El *pointVectorField* anomenat *pointD* es tracta simplement de la interpolació (al *solver*) del desplaçament total (*D*) als diferents punts de la malla. Aquesta interpolació és més precisa que la efectuada per ParaView [40]. D'aquesta manera, les condicions inicials i de contorn són molt similars i equivalents a les ja especificades per al *volVectorField* *D*.

### 5.2.4.2 Fluid

Per a definir les condicions inicials i de contorn per al fluid, dins la carpeta *0/fluid* es defineixen un *volVectorField*, un *volScalarField* i un *pointVectorField*:  $U$ ,  $p$  i *pointMotionU*, respectivament.

- El *volVectorField* anomenat  $U$  es tracta de la velocitat del fluid. El tipus i valor de la condició de contorn aplicada a cadascuna de les cares de la malla es resumeixen en la taula 5.6.

Taula 5.6: Condicions inicials i de contorn per a la velocitat ( $U$ ) del fluid.

Cara de la malla del fluid	Tipus i valor de la condició de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>newMovingWallVelocity</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Sortida ( <i>outlet</i> )	<i>zeroGradient</i>
Entrada ( <i>inlet</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (21 0 0)</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Superior ( <i>top</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Esquerra ( <i>left</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>symmetryPlane</i>

A les parets inferior, superior i esquerra de la malla s'imposa una condició de no lliscament (*no slip*) ja que es tracten de parets rígides. És a dir, en cadascuna d'aquestes cares el fluid té una velocitat nul·la [48]. A la cara simetria simplement s'especifica la condició de contorn corresponent al pla de simetria de la malla (*symmetryPlane*). A l'entrada s'imposa un valor fixe (*fixedValue*) de velocitat en la direcció  $x$  (per exemple, 21 m/s), que es varia segons la velocitat desitjada per a l'anàlisi. A la sortida la condició *zeroGradient* fa que el valor de velocitat en la superfície s'extrapoli de les cel·les més properes a la superfície de sortida [49]. Finalment, a la interfície la condició *newMovingWallVelocity* és pròpia per a la interfície i per a l'anàlisi de la interacció fluid-estructura.

- El *volScalarField* anomenat  $p$  es tracta de la pressió cinemàtica del fluid (pressió estàtica entre la densitat del fluid), utilitzada pels *solvers* de fluid incompressible en que la densitat del fluid és constant [50]. El tipus i valor de la condició de contorn aplicada a cadascuna de les cares de la malla es resumeixen en la taula 5.7.

Taula 5.7: Condicions inicials i de contorn per a la pressió cinemàtica ( $p$ ) del fluid.

Cara de la malla del fluid	Tipus i valor de la condició de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>zeroGradient</i>
Sortida ( <i>outlet</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform 0</i>
Entrada ( <i>inlet</i> )	<i>zeroGradient</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>zeroGradient</i>
Superior ( <i>top</i> )	<i>zeroGradient</i>
Esquerra ( <i>left</i> )	<i>zeroGradient</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>symmetryPlane</i>

S'imposa una pressió cinemàtica constant (*fixedValue*) i igual a 0 a la sortida com a condició de contorn. Es defineix d'aquesta manera perquè és la zona en la qual la pressió ja és igual a la atmosfèrica i, per tant, la pressió relativa és igual a 0. A la resta de cares de la malla del fluid (excepte la cara simetria), la condició *zeroGradient* permet que a aquestes superfícies s'extrapoli el valor de pressió de les cel·les més pròximes a cada una de les superfícies. Finalment, a la cara simetria en aquest cas també simplement s'especifica la condició de contorn corresponent al pla de simetria de la malla (*symmetryPlane*).

- El *pointVectorField* anomenat *pointMotionU* és on s'especifiquen les condicions de contorn en relació al moviment de la malla del fluid (necessàries per al diccionari *constant/fluid/dynamicMeshDict*, tal com s'ha explicat a l'apartat 5.2.2.2). A la taula 5.8 es mostren les condicions de contorn aplicades.

Taula 5.8: Condicions inicials i de contorn per al *pointMotionU* del fluid.

Cara de la malla del fluid	Tipus i valor de la condició de contorn
Interfície ( <i>interface</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Sortida ( <i>outlet</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Entrada ( <i>inlet</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Inferior ( <i>bottom</i> )	<i>fixedValue</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Superior ( <i>top</i> )	<i>slip</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Esquerra ( <i>left</i> )	<i>slip</i> <i>uniform (0 0 0)</i>
Simetria ( <i>symmetry</i> )	<i>symmetryPlane</i>

A la interfície és necessari definir la condició de contorn com a *fixedValue* i aquest valor es va actualitzant

segons el procediment FSI [51]. En aquest cas, a les cares de sortida, d'entrada i inferior també s'especifica la condició de contorn com a *fixedValue*. Les cares superior i esquerra es defineixen com a *slip* per a que la component tangencial de la velocitat es mantingui i el moviment de la malla del fluid sigui el correcte [48]. Finalment, la cara simetria s'especifica de nou com a pla de simetria (*symmetryPlane*).

### 5.2.4.3 Turbulència

Al tractar-se d'un cas turbulent en el qual s'ha considerat un model de turbulència k- $\omega$  SST (segons s'ha comentat a l'apartat 5.2.2.3), és necessari especificar el valor de les variables de turbulència a l'entrada (*inlet*).

La primera variable turbulenta a calcular és l'energia cinètica de turbulència (k). L'equació d'aquesta variable és la següent [44]:

$$k = \frac{3}{2} (U \cdot I)^2 \quad (5.15)$$

En aquesta equació la velocitat del flux d'aire (U) és coneguda en cada cas, però és necessari realitzar el càlcul de la intensitat de turbulència (I). Per al cas d'un flux totalment desenvolupat en el centre d'un conducte (com és el cas del túnel de vent), l'equació que permet calcular la intensitat de turbulència és la següent [52]:

$$I = 0,16 \cdot Re_{d_h}^{-1/8} \quad (5.16)$$

Cal remarcar que en el cas de turbulència mitjana el valor de la intensitat de turbulència sol estar entre un 1% i un 5% (tal com es mostra a la taula 5.9). Per a poder realitzar el càlcul d'aquesta intensitat és necessari conèixer en cada cas el valor del nombre de Reynolds basat en el diàmetre hidràulic ( $Re_{d_h}$ ) del conducte:

$$Re_{d_h} = \frac{U \cdot d_h}{\nu_f} \quad (5.17)$$

En aquest cas el diàmetre hidràulic del conducte ( $d_h$ ) es correspon amb el diàmetre del túnel de vent, i aquest és de 55 cm. La viscositat cinemàtica de l'aire ( $\nu_f$ ) és de  $1,584 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (segons la taula 5.4).

La segona variable turbulenta a calcular és la dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ). L'equació és la següent [44]:

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{C_\mu^{0,25} \cdot l_t} \quad (5.18)$$

D'aquesta equació mostrada, el valor de  $C_\mu$  és una constant de turbulència igual a 0,09 i l'escala de longitud de turbulència ( $l_t$ ), que descriu la mida dels remolins de gran energia en un flux turbulent [43], en casos de flux totalment desenvolupat en un conducte és igual a un 3,8% del diàmetre hidràulic del conducte [52]:

$$l_t = 0,038 \cdot d_h \quad (5.19)$$

$$l_t = 0,038 \cdot (55 \cdot 10^{-2}) = 2,09 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2,09 \text{ cm}$$

Els valors obtinguts amb les equacions presentades de les dues variables de turbulència per a cada velocitat del flux d'aire en estudi, és a dir, tant de l'energia cinètica de turbulència ( $k$ ) com de la dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ), es mostren a la taula 5.9.

Taula 5.9: Càlcul de l'energia cinètica de turbulència ( $k$ ) i de la dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ).

Velocitat (U) [m/s]	Nombre de Reynolds ( $Re_{d_n}$ )	Intensitat de turbulència (I)	Energia cinètica de turbulència (k) [ $m^2/s^2$ ]	Dissipació de la turbulència específica ( $\omega$ ) [ $s^{-1}$ ]
6	208333	$3,46 \cdot 10^{-2}$	$6,47 \cdot 10^{-2}$	22,221
9	312500	$3,29 \cdot 10^{-2}$	0,132	31,684
12	416667	$3,17 \cdot 10^{-2}$	0,218	40,754
15	520833	$3,09 \cdot 10^{-2}$	0,322	49,541
18	625000	$3,02 \cdot 10^{-2}$	0,442	58,109
21	729167	$2,96 \cdot 10^{-2}$	0,580	66,500

Per a implementar les condicions inicials i de contorn de la turbulència segons el model de turbulència  $k-\omega$  SST especificat, dins la carpeta `0/fluid` és necessari definir tres `volScalarField`: `k`, `omega` i `nut`.

- El `volScalarField` anomenat `k` es tracta de l'energia cinètica de turbulència. La condició de contorn important és la constant definida a l'entrada (`fixedValue`) segons els valors de la taula 5.9. La sortida es defineix com a `zeroGradient`. Totes les parets rígides (`wall`) es caracteritzen amb la pròpia funció per a les parets anomenada `kqRWallFunction`. Finalment, la cara de simetria es defineix com a `symmetryPlane`.
- El `volScalarField` anomenat `omega` es tracta de la dissipació de la turbulència específica. En aquest cas la condició de contorn important també és la constant definida a l'entrada (`fixedValue`) segons els valors de la taula 5.9. La sortida es defineix com a `zeroGradient`. Totes les parets rígides (`wall`) es caracteritzen amb la pròpia funció per a les parets anomenada `omegaWallFunction`. Finalment, la cara de simetria es defineix com a `symmetryPlane`.
- El `volScalarField` anomenat `nut` es tracta de la viscositat de turbulència i és calculada segons la fórmula de l'apartat 5.2.2.3, que es sol correspondre amb la divisió entre els dos paràmetres anteriors ( $\nu_t = k/\omega$ ) [43]. Per tant, a l'entrada i a la sortida s'estableix la condició de `calculated`, a les parets rígides (`wall`) s'estableix la condició de `nutWallFunction` i a la cara de simetria la de `symmetryPlane`.

## 5.3 Processament de les simulacions numèriques

### 5.3.1 Paràmetres generals de les simulacions numèriques

La Courant-Friedrichs-Lewy o condició CFL exposa que la distància que recorre la informació durant l'interval de temps ( $\Delta t$ ) definit dins la malla ha de ser inferior a la distància entre els elements de la malla ( $\Delta x$ ). Es tracta d'un nombre adimensional que representa el temps que una partícula es manté dins d'una cel·la de la



mallà i que idealment ha d'estar per sota d'un valor igual a 0,7 però sobretot per sota de 1. Si no està per sota d'aquest valor, l'interval de temps és massa elevat per a detectar la partícula en la cel·la i s'omet la cel·la [53]. Aleshores, l'equació del nombre de Courant ( $Co$ ) és la presentada a continuació:

$$Co = U \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 0,7 \quad (5.20)$$

L'objectiu d'utilitzar aquesta equació és el de poder definir l'interval de temps de cada simulació per tal que aquesta consideri totes les cel·les de la mallà de manera correcta. L'equació corresponent és la següent:

$$\Delta t \leq 0,7 \cdot \frac{\Delta x}{U} \quad (5.21)$$

Per tant, és necessari trobar el cas més extrem per tal de definir aquest valor. Aquest cas es correspon amb la zona de la mallà on existeix la mínima distància entre cel·les i a la vegada la velocitat del flux d'aire és més elevada. Concretament aquesta zona és correspon amb la zona de la mallà del fluid propera a la superfície superior del cilindre. Tot i així, per al càlcul de l'increment de temps necessari, com a valor de velocitat ( $U$ ) referència en cada cas s'ha considerat de manera aproximada la velocitat del flux d'aire a l'entrada, ja que l'increment de velocitat respecte el valor de velocitat a l'entrada en aquesta zona a priori no és conegut però existeix marge a l'haver considerat que el nombre de Courant ha d'estar per sota de 0,7.

La dada que sí que és necessari obtenir és la distància mínima entre els elements de la mallà ( $\Delta x$ ). Fent ús de la instrucció *checkMesh*, s'obté que el valor de la mínima àrea de les cel·les de la mallà (en el pla x-z) és igual a  $8,997 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ . Llavors, aquesta distància mínima resulta en:

$$\Delta x = \sqrt{A_{min}} \quad (5.22)$$

$$\Delta x = \sqrt{8,997 \cdot 10^{-8}} \approx 3,00 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,3 \text{ mm}$$

Amb aquest valor calculat i la velocitat del flux d'aire a l'entrada per a cadascuna de les 6 simulacions a realitzar és possible calcular l'increment de temps més elevat possible en cada cas per a que aquestes simulacions donin resultats numèrics correctes, tal com es mostra en la taula 5.10.

Taula 5.10: Càlcul de l'increment de temps ( $\Delta t$ ) necessari segons la velocitat del flux d'aire ( $U$ ).

Velocitat (U) [m/s]	Increment de temps ( $\Delta t$ ) [s]
6	$3,50 \cdot 10^{-5}$
9	$2,33 \cdot 10^{-5}$
12	$1,75 \cdot 10^{-5}$
15	$1,40 \cdot 10^{-5}$
18	$1,17 \cdot 10^{-5}$
21	$1,00 \cdot 10^{-5}$

Tenint en compte que l'increment de temps més petit de la taula 5.10 és igual a  $1,00 \cdot 10^{-5}$  s, i que aquest valor és útil per a cadascuna de les 6 simulacions, s'ha establert aquest valor com a predeterminat per a totes les simulacions:

$$\Delta t = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Per a establir tots els paràmetres generals de les simulacions en el cas d'estudi amb `solids4Foam`, dins la carpeta `system` es defineix un diccionari i un sub-diccionari vinculat a aquest: `controlDict` i `functions`, respectivament.

- En el diccionari `controlDict` s'especifiquen els controls generals del cas en relació a la informació del temps, el format d'escriptura i altres llibreries o sub-diccionaris que poden ser executats durant el temps de la simulació [54, 55]. Els més importants són els següents:
  - L'aplicació o solver (`application`) s'anomena `solids4Foam`.
  - L'inici de les simulacions (`startTime`) és als 0 s i el final de les simulacions (`endTime`) és als 0,2 s. S'ha definit aquest temps final de la simulació (`endTime`) perquè en aquest temps és possible captar més d'una oscil·lació del cilindre i alhora el temps total d'execució de les simulacions és assequible i al voltant d'entre 1 i 2 dies, aproximadament.
  - L'interval de temps de les simulacions (`deltaT`), tal com ja s'ha comentat en el càlcul anterior realitzat amb el nombre de Courant, s'ha definit igual a  $1,00 \cdot 10^{-5}$  s.
  - Per al control del temps d'escriptura dels resultats en fitxers o carpetes (`writeControl`) s'especifica que aquest es realitzi cada 500 vegades (`writeInterval`) l'interval de temps (`timeStep`), en format d'escriptura (`writeFormat`) ASCII. D'aquesta manera els resultats s'escriuen en diferents carpetes cada 0,005 s durant tot el temps de la simulació (de 0,2 s). Per tant, per aquests 0,2 s de simulació, s'obté un total de 40 carpetes amb els resultats numèrics de cadascun dels temps.
  - Es defineix que s'inclouï (`#include`) el sub-diccionari `functions` per tal d'obtenir certa informació desitjada durant tot el temps de la simulació i no únicament en determinats temps especificats.
- En el sub-diccionari `functions` s'especifiquen les variables que es volen registrar durant tota la simulació. En aquest cas s'ha definit una primera funció anomenada `pointDisp` i de tipus `solidPointDisplacement` que guarda el desplaçament del centre de l'extrem lliure del cilindre sòlid i una segona funció anomenada `forces` i de tipus `forces` que guarda les forces a la interfície. Amb la primera funció concretament es guarda la magnitud general i el valor del desplaçament en les tres direccions (x, y i z) per a cada interval de temps de la simulació (des dels 0 s als 0,2 s) en el fitxer `solidPointDisplacement_pointDisp.dat` dins la carpeta `history/0`. Amb la segona funció es guarden tant els valors de la força com el moment (respecte l'origen de coordenades) a causa de la pressió i de la viscositat del fluid en les tres direccions i també per a cada interval de temps de la simulació en el fitxer `forces.dat` dins la carpeta `forces/0`.

### 5.3.2 Instruccions per a executar les simulacions numèriques

Per a executar cadascuna de les simulacions al clúster Flexicast de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), s'ha creat un `.scr` amb les instruccions corresponents anomenat `linearGeometryElasticBeam.scr`.

```
#!/bin/bash

#SBATCH -n 8                               # Number of cores to be used
#SBATCH --error=linearGeometryElasticBeam.%J.err # Name of error file. %J is the job ID
#SBATCH --output=linearGeometryElasticBeam.%J.out # Name of output file.
#SBATCH --nodelist=flexicast-node03           # Computation nodes, separated by commas

. /opt/foam/foam-extend-4.0/etc/bashrc

source solids4FoamScripts.sh

solids4Foam::convertCaseFormat .

blockMesh -region solid
checkMesh -region solid

blockMesh -region fluid
checkMesh -region fluid

decomposePar -region solid
decomposePar -region fluid

mpirun -np $SLURM_NTASKS solids4Foam -parallel

reconstructPar -region solid
reconstructPar -region fluid
```

En les instruccions mostrades en primer lloc es crea i es comprova la validesa de malla del sòlid, amb les instruccions `blockMesh` i `checkMesh`, respectivament. A continuació, es repeteix el mateix procediment però per al fluid. Amb les dues malles ja creades, es pot iniciar el procediment per a executar el `solver` `solids4Foam` en paral·lel en diferents processadors per a l'anàlisi FSI. Per a dur a terme la simulació en paral·lel, en primer lloc és necessari tenir definits 3 diccionaris anomenats `decomposeParDict`, un dins la carpeta `system`, l'altre dins la carpeta `system/solid` i l'últim dins la carpeta `system/fluid`. El primer no és utilitzat directament i únicament és necessari per tal que el procés en paral·lel funcioni correctament, mentre que el segon i el tercer són per descompondre el domini del sòlid i del fluid, respectivament. A més a més, tots tres diccionaris han d'especificar el mateix nombre de processadors [26]. Tenint aquests diccionaris, la següent instrucció que es dona és la de `decomposePar` tant per al sòlid com per al fluid, que descompon els dos dominis. Tot seguit s'executa el `solver` `solids4Foam` en paral·lel en un total de 8 processadors amb la instrucció `mpirun`. D'aquesta manera, en el cas d'estudi es creen 8 carpetes amb els resultats numèrics de cadascun dels 8 processadors utilitzats (des de `processor0` a `processor7`). Finalment es reconstrueix el cas amb la instrucció `reconstructPar` per tal d'observar posteriorment els resultats amb ParaView.

Per a executar aquestes instruccions i posar en marxa la simulació és necessari donar la següent instrucció al clúster Flexicast: `sbatch linearGeometryElasticBeam.scr`. Segons el `linearGeometryElasticBeam.scr` creat, la simulació es duu a terme en paral·lel en 8 processadors del flexicast-node03. S'ha escollit aquest número de processadors perquè després de diverses proves, amb aquest número de processadors cada simulació tarda

aproximadament entre 1 i 2 dies, que és un temps assequible. Tanmateix, es crea consegüentment un fitxer .err que contempla i escriu els possibles errors que es produeixin durant el procés de simulació i un fitxer .out que guarda i escriu tota la informació relativa a les instruccions donades.

Per acabar, per a poder visualitzar posteriorment la malla creada juntament amb els resultats numèrics del cas d'estudi amb ParaView, s'ha creat l'arxiu *linearGeometryElasticBeam.foam*.

## 5.4 Càlcul analític previ de la posició d'equilibri i l'angle de flexió

Amb la finalitat de conèixer abans del càlcul numèric els valors aproximats de la posició d'equilibri i l'angle de flexió per a cada velocitat del flux d'aire segons un model lineal per al sòlid, s'ha realitzat un primer i simplificat càlcul analític d'aquestes variables aplicant la teoria elàstica lineal d'Euler-Bernoulli.

La teoria d'Euler-Bernoulli és útil per a analitzar casos en que una biga prima ( $D/L < 0,1$ ) està sotmesa al fenomen de la flexió causada per una càrrega lateral distribuïda ( $q_0$ ) que actua sobre el cilindre i que en aquest cas està encastat per un dels seus extrems (en voladís). Cal destacar que aquesta teoria només és aplicable en casos de petites deformacions i rotacions, i que la relació elàstica entre la tensió i la deformació del material és explicada segons la llei de Hooke-Lamé [56].

La representació gràfica del cas d'estudi i la càrrega distribuïda uniforme sobre el cilindre a causada pel flux d'aire incident, juntament amb la secció transversal del cilindre es mostra en la figura 5.8.

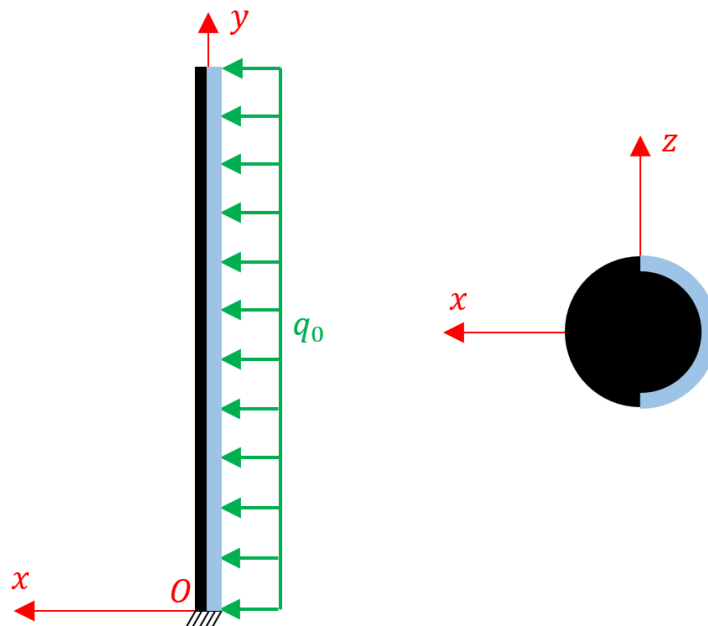


Figura 5.8: Representació gràfica de la càrrega repartida ( $q_0$ ) sobre el cilindre i de la corresponent secció transversal.

En primer lloc, es necessari determinar quina és la força que actua sobre el cilindre causada per la incidència del flux d'aire sobre la seva superfície lateral i que provoca la seva deformació. La força principal que causa aquesta deformació és la deguda a la pressió (ja que la deguda deguda a la viscositat és de varis ordres de

magnitud inferiors). D'aquesta manera, l'equació que permet calcular la pressió dinàmica ( $P_d$ ) del flux d'aire segons quina sigui la velocitat ( $U$ ) i la densitat del fluid ( $\rho_f = 1,161 \text{ kg/m}^3$ ), és la següent:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot U^2 \quad (5.23)$$

Amb el valor de la pressió dinàmica, per a poder saber el valor de la força total sobre el cilindre és necessari calcular la meitat de la superfície lateral ( $S_L$ ) del cilindre, ja que és la zona on incideix directament el flux d'aire (i que es mostra representada de color blau cel en la figura 5.8):

$$S_L = \frac{(2\pi \cdot R) \cdot L}{2} = (\pi \cdot R) \cdot L \quad (5.24)$$

$$S_L = (\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})) \cdot (25 \cdot 10^{-2}) = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Tal com s'ha comentat, amb aquests dos valors és possible el càlcul de la força total sobre el cilindre ( $F_d$ ). Tot i així, en aquest cas és interessant obtenir el valor de la força per unitat de longitud al llarg del cilindre, que es correspon amb la càrrega distribuïda uniforme ( $q_0$ ):

$$q_0 = \frac{F_d}{L} = \frac{P_d \cdot S_L}{L} = P_d \cdot (\pi \cdot R) \quad (5.25)$$

El desenvolupament de la teoria d'Euler-Bernoulli, considerant les condicions de contorn apropiades per a una biga en voladís i per a una secció transversal i una càrrega distribuïda constants, permet l'obtenció de l'equació que relaciona el desplaçament en direcció  $x$ , segons quina sigui la posició (o secció transversal) en l'eix  $y$  [56]:

$$u(y) = \frac{q_0}{E_s \cdot I_z} \cdot \left[ \frac{y^4}{24} - \left( L \cdot \frac{y^3}{6} \right) + \left( L^2 \cdot \frac{y^2}{4} \right) \right] \quad (5.26)$$

Tot i així, en aquest cas el valor d'interès és el desplaçament en l'extrem lliure del cilindre ( $y = L$ ), que es correspon amb la posició d'equilibri ( $p$ ):

$$p = u(L) = \frac{q_0}{E_s \cdot I_z} \cdot \left[ \frac{L^4}{8} \right] \quad (5.27)$$

D'aquesta equació, segons quina sigui la velocitat del flux d'aire ( $U$ ) és possible obtenir en cada cas el valor de la càrrega distribuïda ( $q_0$ ) corresponent tal com s'ha explicat. La longitud del cilindre ( $L = 25 \text{ cm}$ ) és coneguda i el valor del segon moment d'inèrcia ( $I_z = 6,36 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$ ) calculat a l'apartat 4.4.2, també. Pel que fa al mòdul de Young ( $E_s$ ) s'utilitzen els dos valors en estudi (de la taula 5.3) que corresponen al mòdul de Young de la fitxa tècnica ( $E_s = 3300 \text{ MPa}$ ) i a l'obtingut experimentalment ( $E_s = 741 \text{ MPa}$ ).

A la taula 5.11 es presenten els resultats de la posició d'equilibri del cilindre segons quina sigui la velocitat i per a cadascun dels dos valors del mòdul de Young en estudi.

Taula 5.11: Càlcul analític de la posició d'equilibri (p) per a les sis velocitats en estudi (U).

Velocitat (U) [m/s]	Pressió dinàmica ( $P_d$ ) [Pa]	Càrrega repartida ( $q_0$ ) [N/m]	Posició d'equilibri (p) [mm]	
			$E_s =$ 3300 MPa	$E_s =$ 741 MPa
6	20,9	0,197	0,458	2,040
9	47,0	0,443	1,031	4,590
12	83,6	0,788	1,832	8,160
15	130,6	1,231	2,863	12,751
18	188,1	1,773	4,123	18,361
21	256,0	2,413	5,612	24,991

Comparant els valors analítics de la posició d'equilibri (p) segons la velocitat del flux d'aire (U) presentats en la taula 5.11 amb els valors obtinguts experimentalment i presentats en la taula 4.7, s'observa que els resultats analítics de la posició d'equilibri obtinguts considerant el mòdul de Young experimental ( $E_s = 741$  MPa) per al cilindre de niló Ertalon, s'assimilen en gran mesura als resultats experimentals. En canvi, amb els analítics obtinguts considerant el mòdul de Young de la fitxa tècnica ( $E_s = 3300$  MPa) existeixen grans diferències. Aquest fet permet realitzar la deducció en primera instància que el mòdul de Young correcte per al cas d'estudi és l'obtingut experimentalment, que és bastant inferior al de la fitxa tècnica i d'aquesta manera per a cada velocitat exposa un major desplaçament de l'extrem lliure del cilindre.

Per acabar, per a calcular l'angle de flexió ( $\theta$ ) del cilindre, la tangent d'aquest angle es correspon amb la divisió entre la posició d'equilibri (p) i la longitud del cilindre (L), segons la figura 4.7. En aquest cas s'ha realitzat la hipòtesi d'agafar la longitud del cilindre com a un valor constant ( $L = 25$  cm) ja que la variació del catet contigu amb la inclinació causada per l'augment de velocitat (en el rang de velocitats estudiat) és insignificant i, per tant, menyspreable.

$$\tan(\theta) = \frac{p}{L} \quad (5.28)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{p}{L}\right) \quad (5.29)$$

A la taula 5.12 s'exposen els valors de l'angle de flexió obtinguts per a cada velocitat i cada valor del mòdul de Young. De la mateixa manera que per a la posició d'equilibri, els valors analítics obtinguts amb el mòdul de Young experimental ( $E_s = 741$  MPa) s'assemblen més als experimentals (taula 4.7).

Taula 5.12: Càlcul analític de l'angle de flexió ( $\theta$ ) per a les sis velocitats en estudi (U).

Velocitat (U) [m/s]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	
	$E_s =$ 3300 MPa	$E_s =$ 741 MPa
6	0,105	0,468
9	0,236	1,052
12	0,420	1,870
15	0,656	2,920
18	0,945	4,200
21	1,286	5,709

## 5.5 Post-processament dels resultats numèrics

Les simulacions per a cadascuna de les sis velocitats del flux d'aire en estudi, s'han realitzat considerant tant les propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica del niló Ertalon, com les obtingudes experimentalment (taula 5.3). És a dir, s'han dut a terme unes primeres 6 simulacions considerant les propietats de la fitxa tècnica i unes segones 6 simulacions considerant les propietats experimentals per al sòlid.

L'objectiu d'aquestes dues tandes de simulacions ha sigut el d'observar quines són les propietats adequades del niló Ertalon per al cas d'estudi i que d'aquesta manera permeten realitzar simulacions més correctes i permeten obtenir resultats numèrics més aproximats al que succeeix en la realitat experimentalment. Cal destacar que els càlculs analítics previs presentats a l'apartat 5.4 han permès realitzar una primera deducció que les propietats adequades del niló Ertalon per al cas d'estudi són les obtingudes experimentalment, a causa de la gran similitud entre els resultats analítics efectuats amb els resultats experimentals (de la posició d'equilibri ( $p$ ) i l'angle de flexió ( $\theta$ )).

### 5.5.1 Primeres simulacions: propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica del niló Ertalon

En les 6 primeres simulacions dutes a terme considerant les propietats de la fitxa tècnica del niló Ertalon, és a dir, un mòdul de Young ( $E_s$ ) de 3300 MPa i una densitat ( $\rho_s$ ) de  $1140 \text{ kg/m}^3$ , s'ha obtingut per a cada una d'elles el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x per a cada instant de temps de la simulació (en un total de 0,2 s) en el fitxer *solidPointDisplacement\_pointDisp.dat* dins la carpeta *history/0*.

En la figura 5.9 es mostra la representació per a cadascuna de les velocitats en estudi (U) d'aquest desplaçament en funció del temps, en que la línia discontinua indica la posició d'equilibri ( $p$ ) del cilindre segons quina sigui la velocitat. És important destacar que, tal com es pot observar en la mateixa figura, el moviment del cilindre comença als 0,01 s. Aquest aspecte és a causa que tal com s'ha comentat en l'apartat 5.2.3, l'acoblament FSI entre el sòlid i el fluid comença en aquest instant per a evitar efectes d'inestabilitat i permetre que el flux es desenvolupi adequadament.

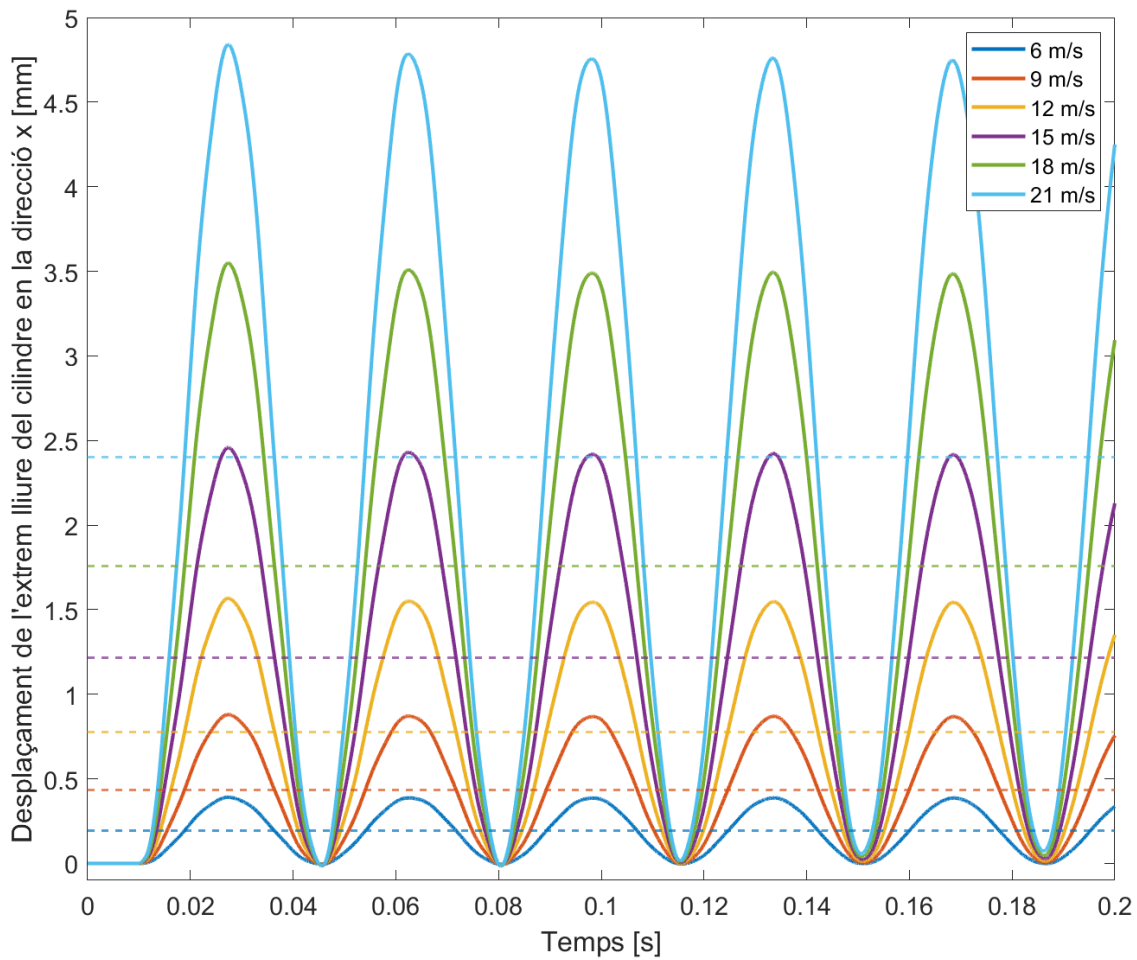


Figura 5.9: Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x en el transcurs del temps, per a les sis velocitats en estudi.

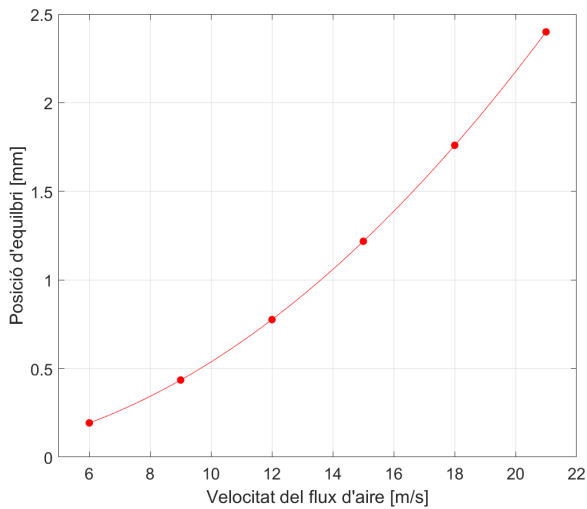
Amb els valors del desplaçament obtinguts numèricament per a cada instant de temps, s'ha procedit a calcular la posició d'equilibri ( $p$ ), l'amplitud ( $A$ ), l'angle de flexió ( $\theta$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) del cilindre per a cada velocitat ( $U$ ), utilitzant un codi similar a l'utilitzat en l'apartat 4.3.2 per a calcular les mateixes variables en l'estudi experimental. La diferència remarcable respecte el codi utilitzat en el mètode experimental és que en aquest cas per al càlcul de l'angle de flexió ( $\theta$ ), la longitud del cilindre en la direcció  $y$  s'ha considerat constant i igual a 25 cm perquè la seva variació en el transcurs de la simulació (tal com es pot observar en el fitxer *solidPointDisplacement\_pointDisp.dat*) és de nanòmetres (o el que és el mateix, de  $10^{-9}$  m) i, per tant, s'ha considerat irrelevant. El codi complet utilitzat en aquest cas es mostra a l'Annex 3.2.

En la taula 5.13 es mostren els resultats obtinguts de les 4 variables esmentades per a cada velocitat del flux d'aire i en la figura 5.10 es mostra la corresponent representació.

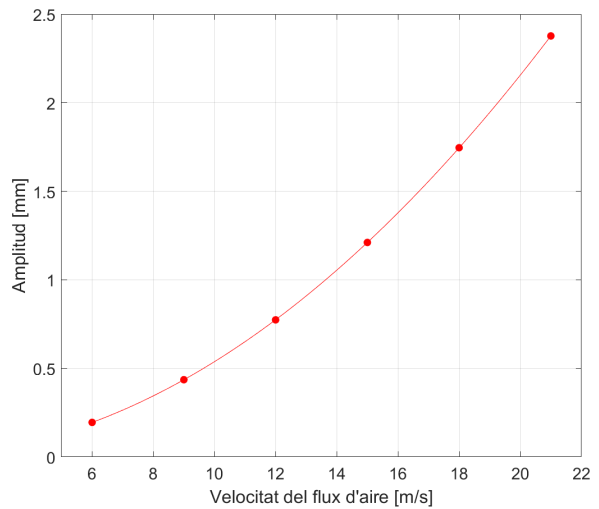


Taula 5.13: Resultats numèrics del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre per a una densitat de 1140 kg/m<sup>3</sup> i un mòdul de Young de 3300 MPa per al cilindre de niló Ertalon.

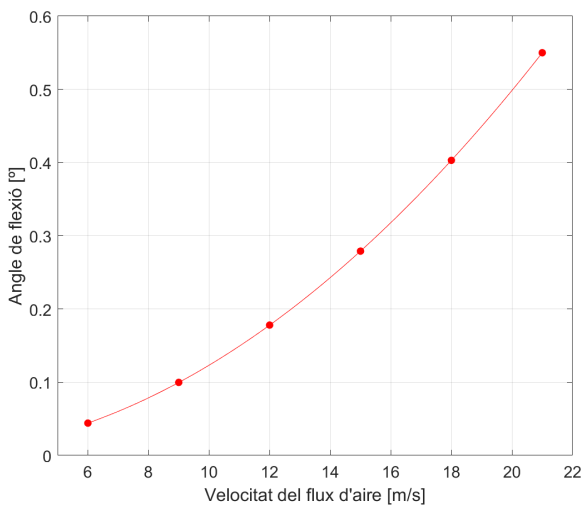
Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	0,193	0,195	$4,41 \cdot 10^{-2}$	28,309
9	0,435	0,436	$9,97 \cdot 10^{-2}$	28,313
12	0,776	0,774	0,178	28,323
15	1,218	1,211	0,279	28,337
18	1,760	1,746	0,403	28,351
21	2,400	2,377	0,550	28,369



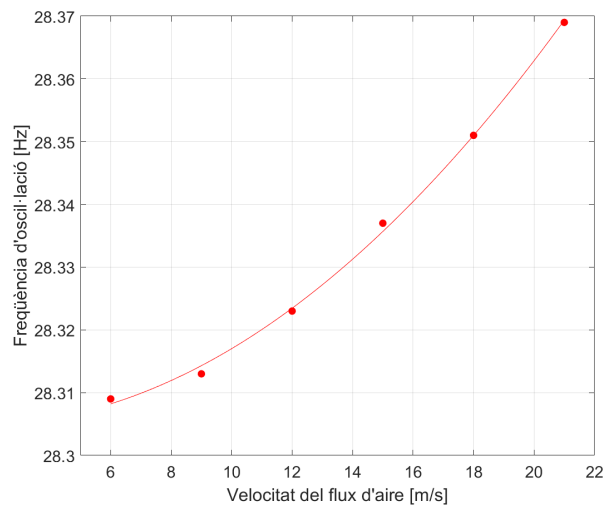
(a) Posició d'equilibri (p) en funció de la velocitat (U).



(b) Amplitud (A) en funció de la velocitat (U).



(c) Angle de flexió ( $\theta$ ) en funció de la velocitat (U).



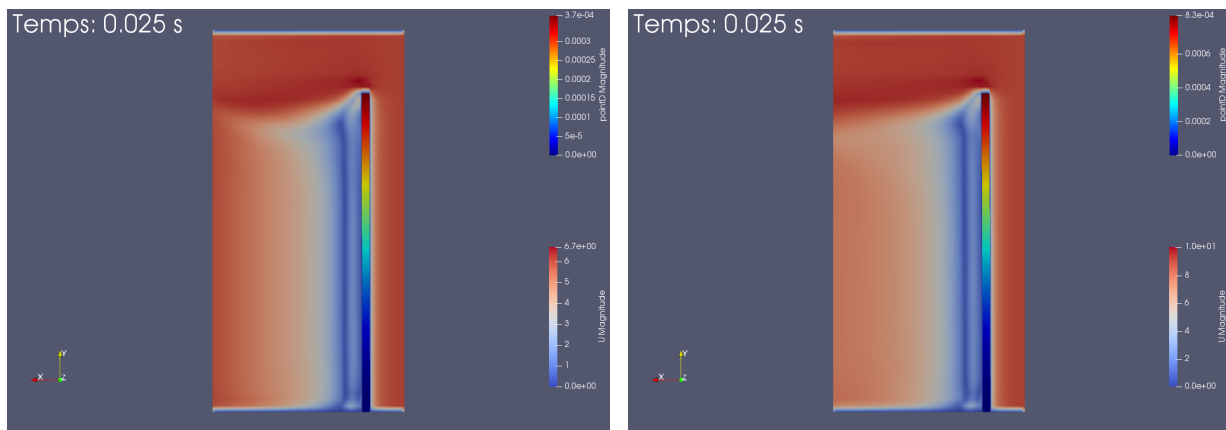
(d) Freqüència d'oscil·lació (f) en funció de la velocitat (U).

Figura 5.10: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon.

En la figura 5.10 mostrada, s'observa que el comportament de les 4 variables en funció de la velocitat és pràcticament quadràtic en tots els casos. Cal destacar que en el cas de la posició d'equilibri (5.10a) i l'amplitud (5.10b), aquestes són pràcticament iguals en cada cas per a cadascuna de les velocitats i varien des dels 0,2 mm als 2,4 mm aproximadament en el rang estudiat. Aquest aspecte era d'esperar, ja que tal com s'observa en la figura 5.9, com que en cada oscil·lació el cilindre torna a la posició inicial, la posició d'equilibri és igual a la meitat de l'amplitud pic a pic, que a la vegada és igual a l'amplitud. En relació a l'angle de flexió (5.10c) el seu valor en general és relativament petit per a tot el rang de velocitats. Finalment, la variació de la freqüència d'oscil·lació (5.10d) amb la velocitat és molt petita i pràcticament menyspreable ja que en tot moment es troba entre els 28,30 Hz i 28,37 Hz, de manera aproximada.

Per acabar, en la figura 5.11 es mostra la visualització amb ParaView del primer màxim desplaçament experimentat pel cilindre per a cadascuna de les sis velocitats del flux d'aire a l'entrada en estudi, que es correspon amb l'instant de temps de 0,025 s aproximadament segons la figura 5.9. En cada cas es mostren dues llegendes de color amb els corresponents valors de la magnitud del desplaçament (*pointD Magnitude*) al llarg del cilindre encastat (extrem dret superior de la imatge) i de la velocitat (*U Magnitude*) de l'aire al voltant del cilindre (extrem dret inferior de la imatge).

Per a les representacions s'ha escollit el *pointD* perquè tal com s'ha comentat en l'apartat 5.2.4.1, aquest és equivalent al desplaçament  $D$ , però la interpolació als diferents punts de la malla és més acurada. A més a més, en concret s'ha escollit que es mostri la magnitud d'aquest desplaçament perquè és pràcticament igual al desplaçament en direcció  $x$ , ja que tant en la direcció  $y$  com en la direcció  $z$  el desplaçament és de diversos ordres de magnitud inferior al llarg del cilindre.



(a) Velocitat del flux d'aire: 6 m/s.

(b) Velocitat del flux d'aire: 9 m/s.

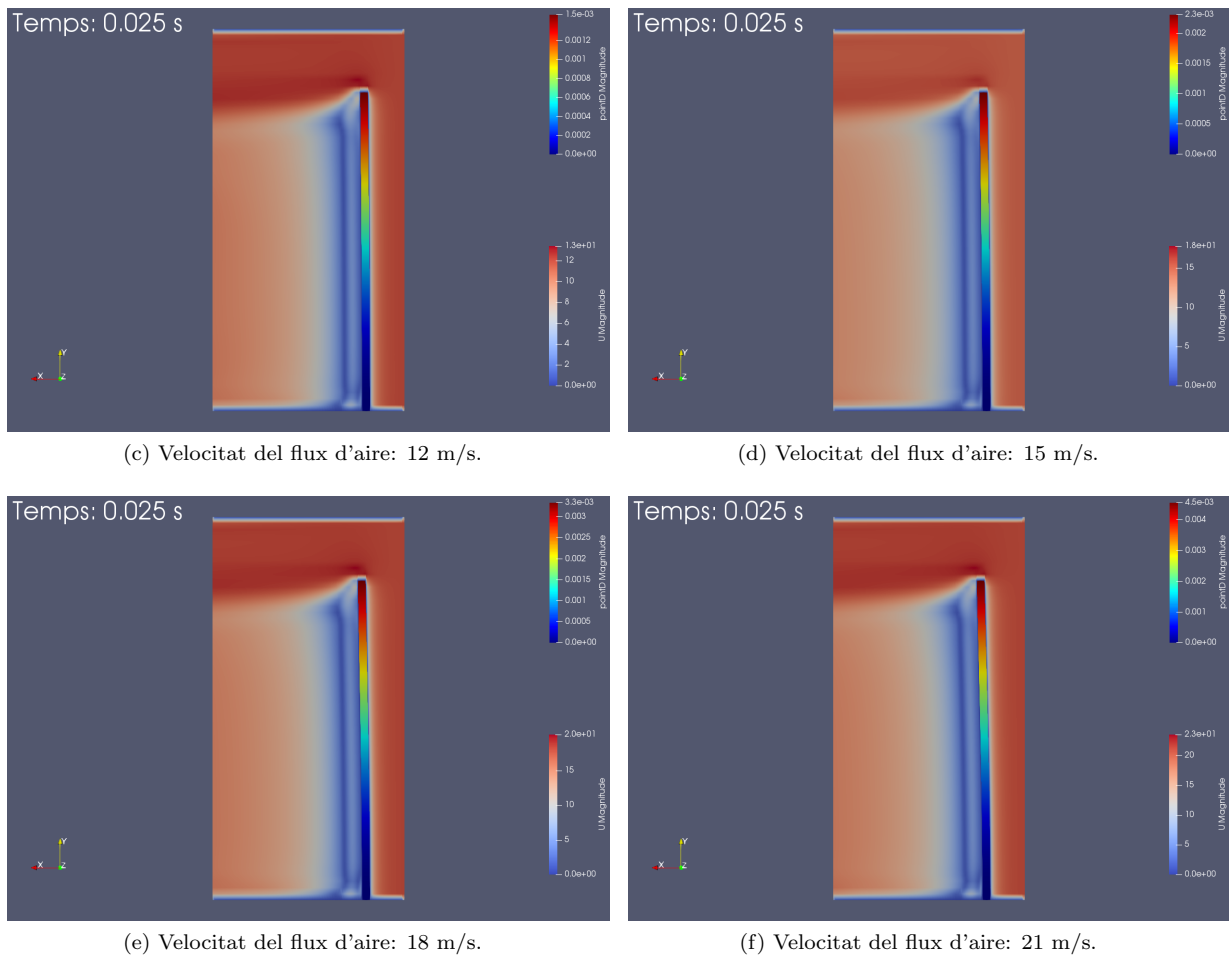


Figura 5.11: Visualització amb ParaView del desplaçament (*pointD*) del cilindre i del camp de velocitat ( $U$ ) al seu voltant a l'instant de temps de 0,025 s per a les sis velocitats del flux d'aire estudiades.

Les mateixes representacions però considerant el camp de pressió cinemàtica ( $p$ ) del fluid en comptes del camp de velocitat ( $U$ ), es mostren a l'Annex 3.3.

### 5.5.2 Segones simulacions: propietats físiques i mecàniques experimentals del niló Ertalon

En les 6 segones simulacions dutes a terme considerant les propietats experimentals del niló Ertalon, és a dir, un mòdul de Young ( $E_s$ ) de 741 MPa i una densitat ( $\rho_s$ ) de  $1265 \text{ kg/m}^3$ , de la mateixa manera que en l'aparat anterior, s'ha procedit a obtenir en primer lloc el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x per a cada instant de temps de la simulació, per a cadascuna de les sis velocitats en estudi.

En la figura 5.12 es mostren les representacions corresponents. En comparació amb l'aparat anterior s'observa que en cada cas es capten menys oscil·lacions del cilindre en el temps, el que significa que la freqüència d'oscil·lació del cilindre és menor. Tot i així, per a cada velocitat el desplaçament màxim del cilindre és major i conseqüentment la posició d'equilibri, l'angle de flexió i l'amplitud també. Aquest últim aspecte era d'esperar ja que el mòdul de Young considerat en aquest cas és bastant inferior, fet que en conseqüència

implica que el desplaçament del cilindre per a un mateix valor de força és major.

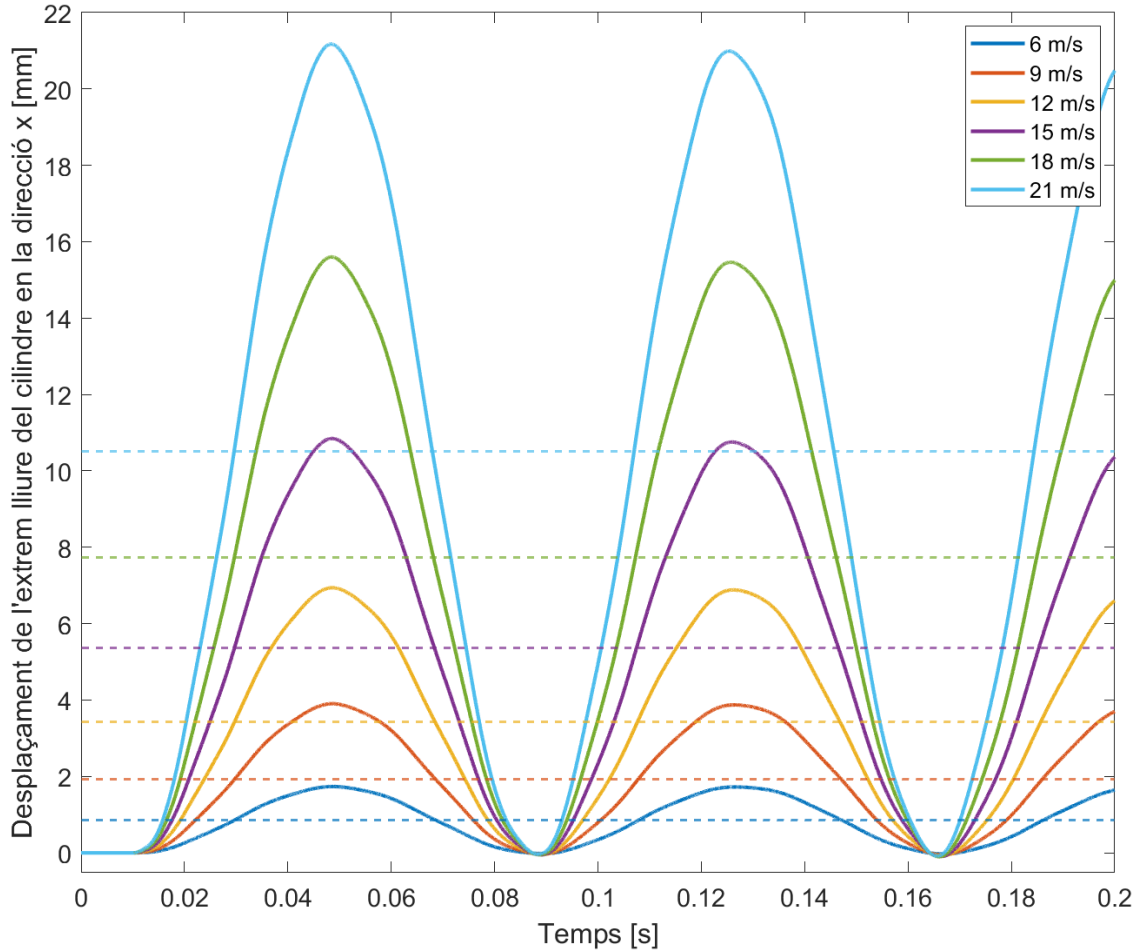


Figura 5.12: Representació gràfica del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre en la direcció x en el transcurs del temps, per a les sis velocitats en estudi.

Els resultats numèrics de la posició d'equilibri ( $p$ ), l'amplitud ( $A$ ), l'angle de flexió ( $\theta$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) obtinguts a partir del desplaçament en el temps per a cada velocitat es mostren en la taula 5.14 i la corresponent representació dels resultats es presenta en la figura 5.13.

Taula 5.14: Resultats numèrics del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre per a una densitat de  $1265 \text{ kg/m}^3$  i un mòdul de Young de  $741 \text{ MPa}$  per al cilindre de niló Ertalon.

Velocitat (U) [m/s]	Posició d'equilibri (p) [mm]	Amplitud (A) [mm]	Angle de flexió ( $\theta$ ) [°]	Freqüència d'oscil·lació (f) [Hz]
6	0,853	0,877	0,196	12,844
9	1,923	1,966	0,441	12,863
12	3,426	3,486	0,785	12,890
15	5,364	5,437	1,229	12,920
18	7,728	7,804	1,771	12,953
21	10,511	10,570	2,408	12,992

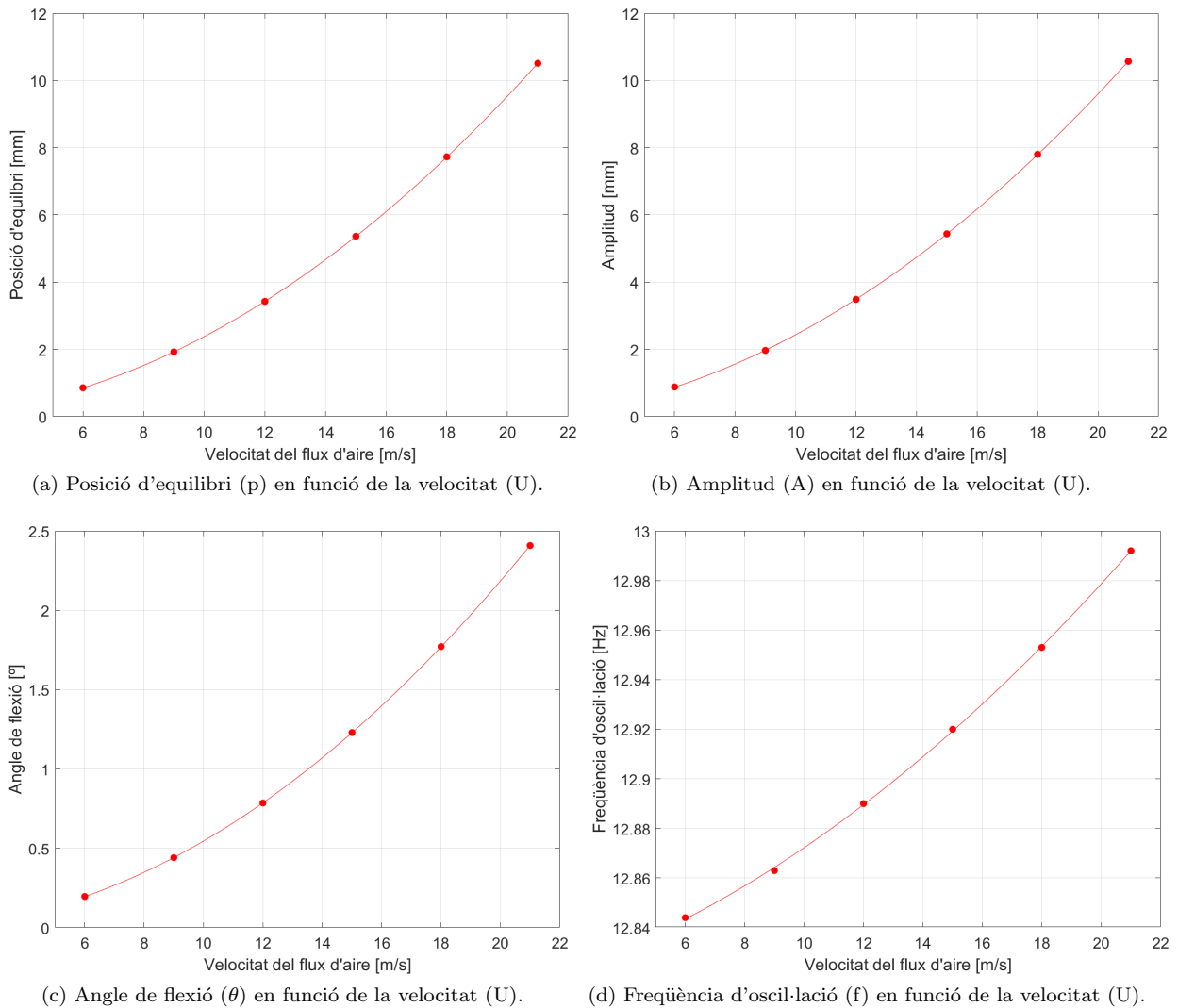


Figura 5.13: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat per al cilindre de niló Ertalon.

En la figura 5.13 mostrada també s'observa que el comportament dels 4 paràmetres en estudi en funció de la velocitat del flux d'aire a l'entrada és quadràtic. De la mateixa manera que en l'apartat anterior, com que el cilindre en cada oscil·lació torna a l'origen, els valors de la posició d'equilibri (5.13a) i l'amplitud (5.13b) són pràcticament iguals per a cada velocitat en estudi. La diferència està en que en aquestes segones simulacions els valors són molt superiors ja que van des d'1 mm a 11 mm aproximadament. Respecte a l'angle de flexió (5.13c), com que la posició d'equilibri és major per a cada velocitat en conseqüència l'angle de flexió també. Finalment, tal com ja s'ha comentat, la freqüència d'oscil·lació (5.13d) és inferior a la observada en les primeres simulacions efectuades ja que en aquest cas es troba entorn dels 12,9 Hz.

Per acabar, en la figura 5.14 es mostra el primer desplaçament màxim del cilindre per a cadascuna de les velocitats en estudi i que es produeix al voltant de l'instant de temps de 0,05 s, d'acord amb la figura 5.12.

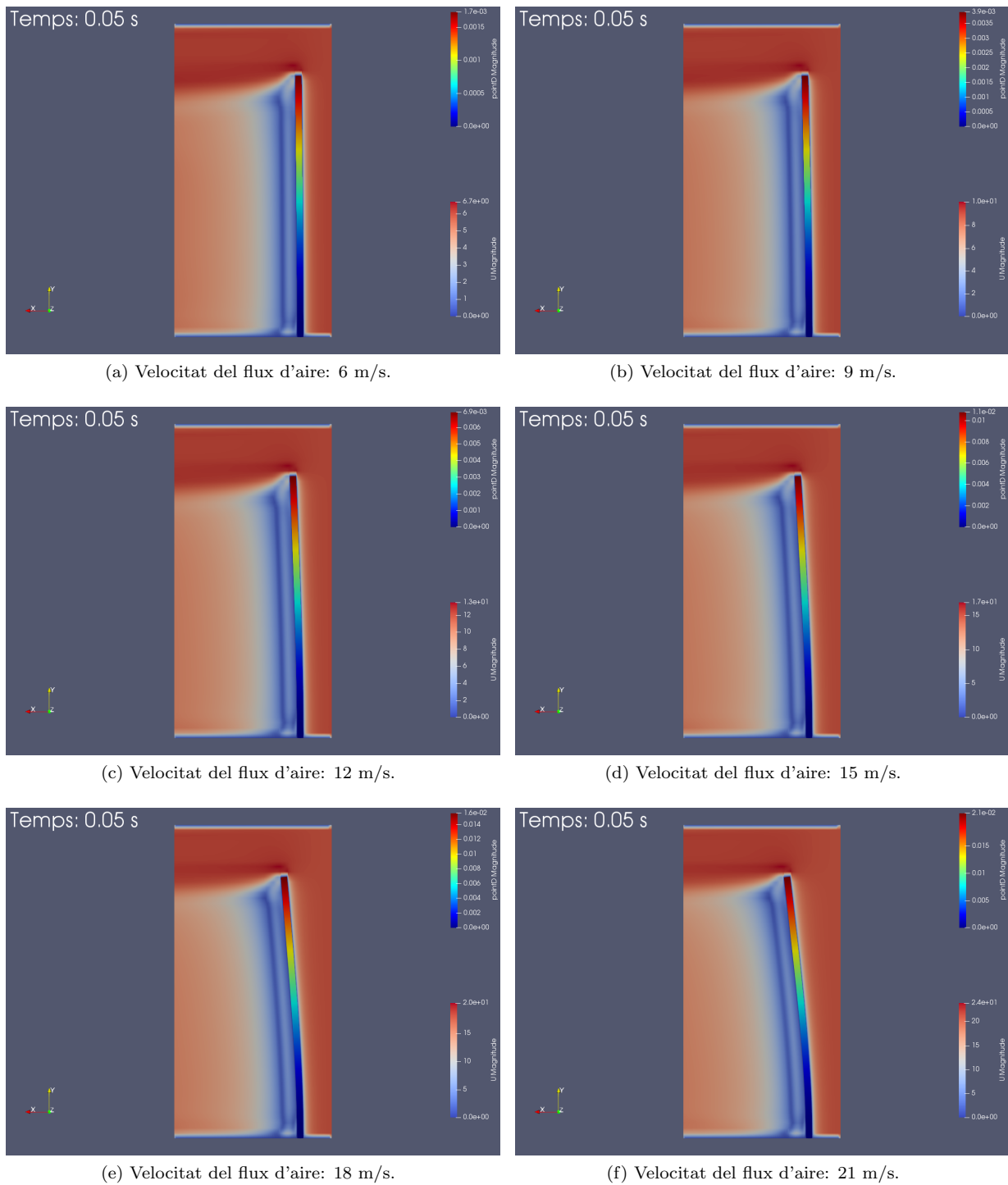


Figura 5.14: Visualització amb ParaView del desplaçament ( $pointD$ ) del cilindre i del camp de velocitat ( $U$ ) al seu voltant a l'instant de temps de 0,05 s per a les sis velocitats del flux d'aire estudiades.

L'aspecte important a destacar de les representacions mostrades en la figura 5.14 és que visualment i segons els valors de la llegenda corresponent, el desplaçament del cilindre mostrat en aquest instant de temps en que el desplaçament és màxim i obtingut de les segones simulacions numèriques efectuades, s'assimila en bona mesura a la posició d'equilibri del cilindre obtinguda experimentalment per a cadascuna de les sis velocitats, observada al laboratori aproximadament segons la figura 4.14 i amb els valors mostrats en la taula 4.7.

## Capítol 6

# Comparació entre els resultats experimentals i els numèrics

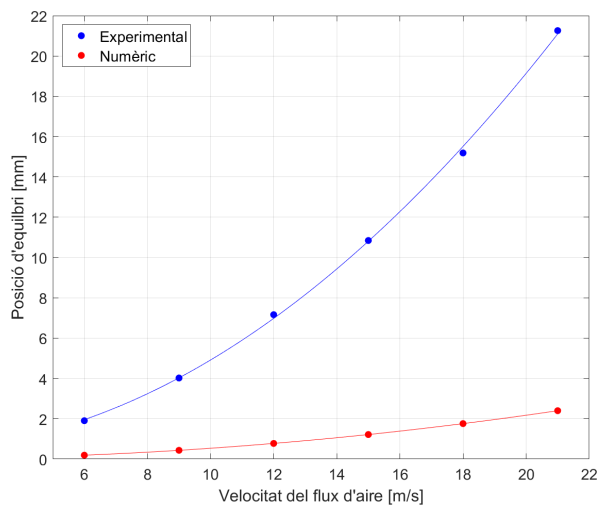
En aquest capítol es presenta la comparació entre els resultats experimentals i els numèrics obtinguts a partir del desplaçament de l'extrem lliure del cilindre. Concretament, es realitza la comparació entre els valors de la posició d'equilibri, l'amplitud d'oscil·lació, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació del cilindre en funció de la velocitat del flux d'aire.

L'equiparació entre els resultats experimentals i numèrics es realitza per als dos tipus de simulacions dutes a terme en l'estudi numèric, en que en les primeres simulacions s'han considerat les propietats de la fitxa tècnica i en les segones simulacions s'han considerat les propietats obtingudes experimentalment per al material de niló Ertalon. En particular, les propietats esmentades són el mòdul de Young i la densitat del material.

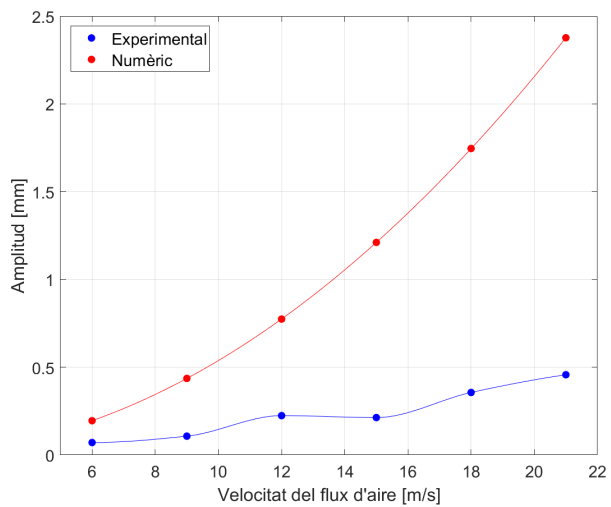
L'objectiu principal d'aquest capítol és el d'observar si el model numèric és capaç de reproduir correctament el que succeeix en la realitat experimentalment, en relació a la interacció entre el fluid i la estructura.

### 6.1 Comparació amb les primeres simulacions: propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica del niló Ertalon

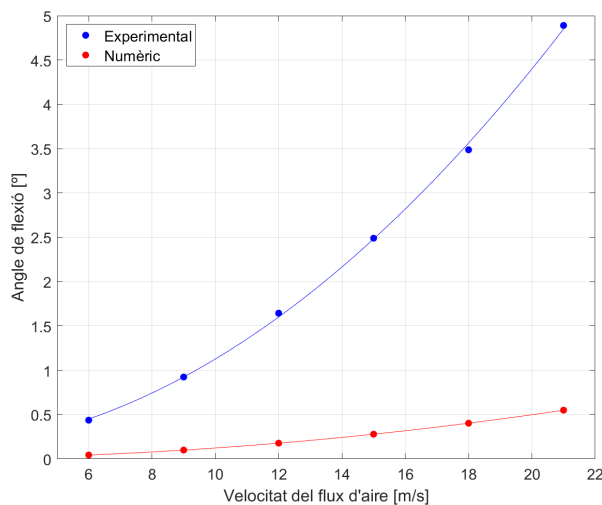
Atenent als resultats experimentals definitius mostrats en la taula 4.7 i als resultats numèrics de les primeres simulacions dutes a terme presentats en la taula 5.13, s'obté la figura 6.1. En aquesta figura es representen els resultats experimentals en color blau i els resultats numèrics en color vermell per a cadascun dels 4 paràmetres en estudi en funció de la velocitat del flux d'aire.



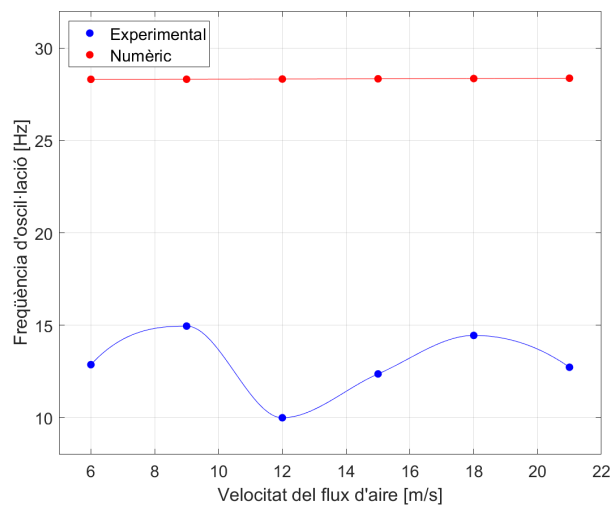
(a) Posició d'equilibri ( $p$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(b) Amplitud ( $A$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(c) Angle de flexió ( $\theta$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(d) Freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).

Figura 6.1: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat obtingudes a partir dels resultats experimentals (color blau) i numèrics (color vermell), per al cilindre de niló Ertalon.

Segons la figura 6.1 s'observa una diferència considerable entre els resultats experimentals i numèrics en totes les 4 variables en estudi. En el cas de la posició d'equilibri (6.1a) tant el comportament dels resultats experimentals com numèrics és el d'augmentar quadràticament amb la velocitat. Pel que fa a l'angle de flexió (6.1c) s'observa que el comportament és el mateix. En aquests dos casos, els resultats experimentals són més elevats que els numèrics per a cada velocitat del flux d'aire. Això significa que en el cas experimental el cilindre es troba més flexionat i oscil·la respecte un punt més llunyà (posició equilibri) que en el cas numèric. Ara bé, en el cas de l'amplitud (6.1b) passa al contrari i per a cadascuna de les velocitats l'amplitud numèrica és superior a l'amplitud experimental. Aquest fet era d'esperar, perquè tal com s'ha comentat anteriorment i segons la figura 5.9, en el model numèric el cilindre torna a la posició inicial en cada oscil·lació fent que aquesta amplitud sigui molt més elevada en comparació amb la petita amplitud observada experimentalment. Per acabar, la freqüència d'oscil·lació del cilindre (6.1d) segons els resultats numèrics està al voltant dels 28 Hz de manera que és bastant més elevada que la experimental, que està al voltant dels 13 Hz.



Per a conèixer exactament quina és la magnitud de l'error entre els resultats experimentals i els numèrics, es calcula en cada cas l'error relatiu, que es tracta de la divisió entre l'error absolut i el resultat experimental (valor real), segons la següent equació:

$$\varepsilon_r [\%] = \frac{\varepsilon_a}{\text{Resultat experimental}} \cdot 100 = \frac{|\text{Resultat experimental} - \text{Resultat numèric}|}{\text{Resultat experimental}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Utilitzant l'equació de l'error relatiu mostrada amb els resultats experimentals definitius de la taula 4.7 i els resultats numèrics de les primeres simulacions de la taula 5.13, s'obté la taula 6.1.

Taula 6.1: Errors relatius entre els valors experimentals i numèrics per a la posició d'equilibri ( $\varepsilon_{r,p}$ ), l'amplitud d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,A}$ ), l'angle de flexió ( $\varepsilon_{r,\theta}$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,f}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.

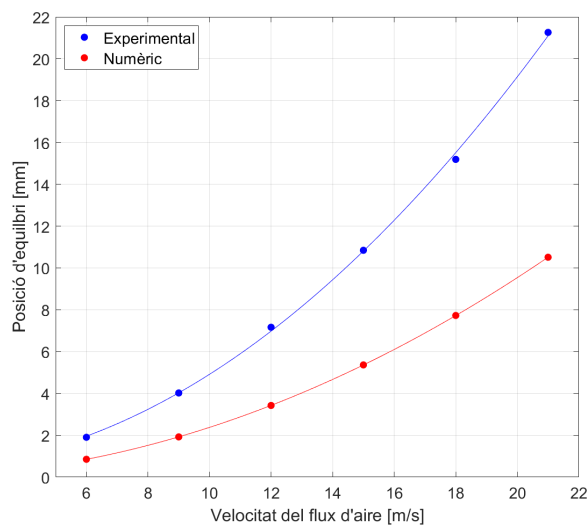
Velocitat (U) [m/s]	$\varepsilon_{r,p}$ [%]	$\varepsilon_{r,A}$ [%]	$\varepsilon_{r,\theta}$ [%]	$\varepsilon_{r,f}$ [%]
6	89,9	176,2	89,9	120,1
9	89,2	307,5	89,2	89,4
12	89,2	245,5	89,2	183,6
15	88,8	468,5	88,8	129,3
18	88,4	390,4	88,4	96,3
21	88,7	420,1	88,8	123,0

Segons els resultats de l'error relatiu mostrats en la taula 6.1, l'error relatiu de la posició d'equilibri ( $\varepsilon_{r,p}$ ) i de l'angle de flexió ( $\varepsilon_{r,\theta}$ ) és molt similar i està al voltant del 89% per a cada velocitat. Aquesta similitud és deguda a que la posició d'equilibri afecta directament al càlcul de l'angle de flexió. En referència a l'error de l'amplitud ( $\varepsilon_{r,A}$ ), aquest és més elevat en cada cas ja que està al voltant d'un 176% i un 469% aproximadament. El fet que sigui més elevat aquest error és causat perquè en el cas experimental l'amplitud és molt petita en comparació amb el cas numèric en que aquesta es molt més accentuada. Finalment l'error de la freqüència ( $\varepsilon_{r,f}$ ) es troba aproximadament entre un 89% i un 184%. La diferència entre les freqüències experimentals i numèriques és clarament observable i la variació en l'error relatiu al llarg de les velocitats del flux d'aire és causada perquè tot i ser gairebé constant en el cas numèric, en el cas experimental la freqüència varia bastant segons quina sigui la velocitat i mostra oscil·lació respecte un valor de 13 Hz de manera aproximada.

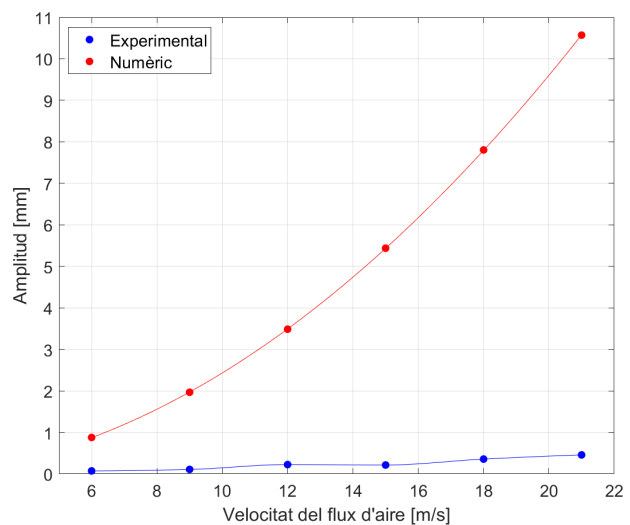
Les conclusions que es poden extreure de la comparació efectuada és que el model numèric en aquestes primeres simulacions no és capaç de reproduir el que passa experimentalment de manera adequada, ja que l'error relatiu és elevat per a totes les 4 variables en estudi. El concepte més important a remarcar és que el model numèric en cada oscil·lació del cilindre torna a la posició inicial i no succeeix com al cas experimental en que el cilindre es troba en una posició d'equilibri i oscil·la relativament poc (amb una baixa amplitud) respecte aquesta posició d'equilibri. Conseqüentment aquest aspecte concret és el que causa principalment el gran error relatiu observat en l'amplitud i a més a més també afecta en l'error relatiu de la posició d'equilibri i de l'angle de flexió.

## 6.2 Comparació amb les segones simulacions: propietats físiques i mecàniques experimentals del niló Ertalon

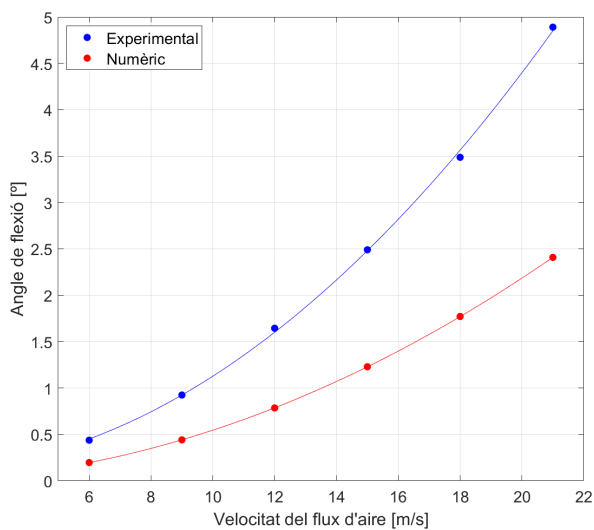
Considerant els resultats experimentals definitius exposats en la taula 4.7 i els resultats numèrics de les segones simulacions efectuades mostrats en la taula 5.14, de la mateixa manera que en l'apartat anterior s'obté la figura 6.2 amb les representacions corresponents i la taula 6.2 amb els valors de l'error relatiu en cada cas.



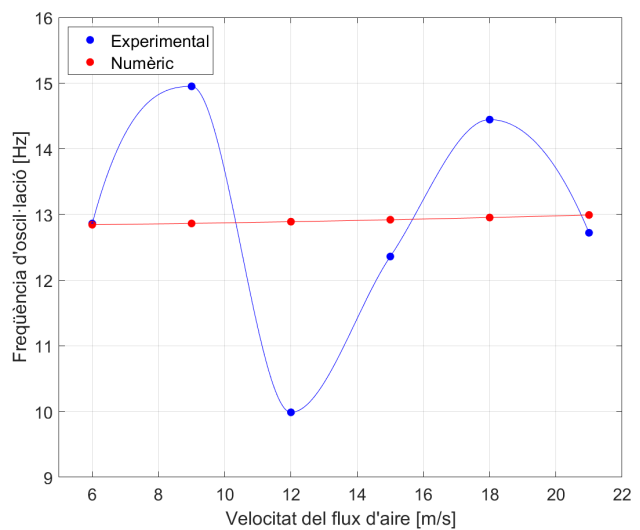
(a) Posició d'equilibri ( $p$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(b) Amplitud ( $A$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(c) Angle de flexió ( $\theta$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).



(d) Freqüència d'oscil·lació ( $f$ ) en funció de la velocitat ( $U$ ).

Figura 6.2: Representacions gràfiques de la posició d'equilibri, l'amplitud, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació en funció de la velocitat obtingudes a partir dels resultats experimentals (color blau) i numèrics (color vermell), per al cilindre de niló Ertalon.

Taula 6.2: Errors relatius entre els valors experimentals i numèrics per a la posició d'equilibri ( $\varepsilon_{r,p}$ ), l'amplitud d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,A}$ ), l'angle de flexió ( $\varepsilon_{r,\theta}$ ) i la freqüència d'oscil·lació ( $\varepsilon_{r,f}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.

Velocitat (U) [m/s]	$\varepsilon_{r,p}$ [%]	$\varepsilon_{r,A}$ [%]	$\varepsilon_{r,\theta}$ [%]	$\varepsilon_{r,f}$ [%]
6	55,2	1142,2	55,1	0,1
9	52,2	1737,4	52,3	14,0
12	52,2	1456,3	52,3	29,1
15	50,5	2452,6	50,6	4,5
18	49,1	2092,1	49,2	10,3
21	50,6	2212,9	50,8	2,1

En primer lloc, en aquestes segones simulacions els resultats numèrics de la posició d'equilibri (6.2a) i l'angle de flexió (6.2c) en certa mesura s'assimilen molt més als experimentals en comparació amb les primeres simulacions efectuades ja que segons la taula 6.2 l'error relatiu associat en els dos casos ( $\varepsilon_{r,p}$  i  $\varepsilon_{r,\theta}$ ) està al voltant d'un 52% i per tant és molt inferior al de les primeres simulacions en que estava al voltant d'un 89%. Tot i així, per contra, la diferència en l'amplitud (6.2b) experimental i numèrica en aquest cas és molt més gran per a cada una de les velocitats en estudi. Tal com es pot observar l'error relatiu de l'amplitud ( $\varepsilon_{r,A}$ ) està entre un 1142% i un 2453% aproximadament al llarg de velocitats del flux d'aire en estudi. Tal com ja s'ha comentat en l'apartat anterior, la causa d'aquesta gran magnitud de l'error en l'amplitud és perquè en el cas experimental l'amplitud és molt petita al voltant de la posició d'equilibri i com que en aquestes segones simulacions el desplaçament màxim del cilindre en el temps augmenta en comparació amb les primeres simulacions i a més a més el cilindre torna a la seva posició inicial en cada oscil·lació, en conseqüència l'amplitud numèrica també augmenta molt més. Per acabar, en aquest cas la freqüència d'oscil·lació del cilindre (6.2d) és molt similar experimentalment i numèricament amb l'única diferència que en el cas experimental aquesta varia amb la velocitat mentre que segons el mètode numèric és pràcticament constant i igual a uns 13 Hz. Tal com es mostra en la taula 6.2 l'error relatiu de la freqüència d'oscil·lació del cilindre ( $\varepsilon_{r,f}$ ) està únicament entre un 0,1% i un 29%. Per tant, s'observa que en general aquest error relatiu és molt baix, indicant que els resultats experimentals i numèrics de la freqüència són molt similars.

L'aspecte més important a destacar d'aquestes segones simulacions és la gran similitud entre la posició d'equilibri experimental i la suma entre la posició d'equilibri i l'amplitud numèriques, que equivaldria al desplaçament màxim numèric del cilindre observat en la figura 5.12. D'aquesta manera, en la taula 6.3 s'exposa per a cada velocitat del flux d'aire la posició d'equilibri experimental (obtinguda de la taula 4.7 en que es mostren els resultats experimentals definitius) i la suma entre la posició d'equilibri i l'amplitud numèriques (obtinguda de la taula 5.14 en que es mostren els resultats numèrics de les segones simulacions) amb el corresponent error relatiu associat.

Taula 6.3: Errors relatiu entre els valors experimentals de la posició d'equilibri i els numèrics per a la posició d'equilibri més l'amplitud ( $\varepsilon_{r, p+A}$ ), per a cadascuna de les sis velocitats (U) d'estudi.

Velocitat (U) [m/s]	$p_{exp}$ [mm]	$(p+A)_{num}$ [mm]	$\varepsilon_{r, p+A}$ [%]
6	1,904	1,730	9,1
9	4,023	3,889	3,3
12	7,164	6,912	3,5
15	10,844	10,801	0,4
18	15,189	15,532	2,3
21	21,259	21,081	0,8

Segons la taula 6.3 presentada, l'error relatiu ( $\varepsilon_{r, p+A}$ ) entre la posició d'equilibri experimental ( $p_{exp}$ ) i la suma de la posició d'equilibri i l'amplitud numèriques ( $(p+A)_{num}$ ) és molt baix per a cada velocitat ja que únicament està entre un 0,4% i un 9,1%. Observant aquest rang de l'error, és important destacar que d'acord amb l'estudi numèric-experimental de de Tabatabaei et al. [6] (explicat al capítol 2) l'error entre els resultats experimentals i numèrics de la deformació màxima de la biga va resultar d'entre un 4%-5% i va servir per a validar el model numèric. Per tant, es pot concloure que en el cas d'estudi aquest aspecte és molt similar a l'estudi dut a terme per Tabatabaei et al. A més a més, els valors mostrats en la taula 6.3 també s'assimilen molt als obtinguts analíticament per a la posició d'equilibri considerant un mòdul de Young igual a 741 MPa, exposats en la taula 5.11 de l'apartat 5.4 en que s'efectua el càlcul analític de la posició d'equilibri i l'angle de flexió del cilindre.

Tenint en compte aquesta gran similitud exposada, es pot extreure la conclusió que les propietats físiques i mecàniques adequades per al niló Ertalon són les obtingudes experimentalment i utilitzades en aquestes segones simulacions, en que el mòdul de Young és igual a 741 MPa i la densitat del material és de 1265 kg/m<sup>3</sup>. El problema que hi ha és que en el model numèric el cilindre no és capaç concretament de mantenir-se en una posició d'equilibri i oscil·lar amb una petita amplitud respecte aquest punt, ja que tal com s'ha comentat, en cada oscil·lació el cilindre torna a la seva posició inicial. D'aquesta manera, si en el model numèric el cilindre fos capaç de mantenir-se en la posició d'equilibri equivalent a la suma entre la posició d'equilibri i l'amplitud obtingudes ( $(p+A)_{num}$ ) i oscil·lar relativament poc respecte aquest punt amb una petita amplitud, els resultats numèrics serien molt similars i pràcticament iguals als experimentals, fent que la interacció entre el fluid i l'estructura fos la correcta.

## Capítol 7

# Resum del pressupost

En aquest capítol es presenta un resum del pressupost de l'estudi, que resulta en un cost final total de 11403,98 €.

Tal com es mostra en la taula 7.1, el cost total s'ha calculat considerant quatre costos diferents: el cost dels materials utilitzats per a l'estudi experimental, el del programari informàtic fet servir per a desenvolupar els càlculs i gràfics necessaris tant en l'estudi numèric com en l'experimental, el relacionat amb el consum elèctric dels aparells utilitzats per a dur a terme tot l'estudi i finalment el dels honoraris professionals.

Taula 7.1: Cost total de l'estudi.

Aspecte	Preu total [€]
Materials per a l'estudi experimental	7,20
Programari informàtic	4200,00
Consum elèctric	52,46
Honoraris professionals	7144,32
<b>TOTAL</b>	<b>11403,98</b>

Es tracta d'un cost total relativament elevat, destacant la rellevància del cost associat als honoraris professionals i del programari informàtic.

## Capítol 8

# Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials

En l'estudi realitzat, en tot moment s'han tingut en consideració les implicacions ambientals i socials associades. D'aquesta manera, per tal de desenvolupar tant l'estudi experimental com el numèric, s'han utilitzat únicament els recursos justos i necessaris per a poder efectuar els dos estudis de manera correcta, amb efectivitat i alhora evitant en la major mesura possible implicacions negatives cap al medi ambient i la societat.

En primer lloc i en relació a l'estudi experimental, els dies seleccionats per a prendre les mesures experimentals al laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'ESEIAAT, han sigut de manera que no fos necessari haver d'arribar fins a la universitat únicament per aquest motiu sinó que fos en un mateix dia d'horari lectiu a l'ESEIAAT i, d'aquesta manera, aprofitar el viatge. En relació a aquest mateix punt, s'han escollit els mínims dies possibles per a obtenir les dades experimentals de manera satisfactòria, evitant així implicacions ambientals i socials negatives prescindibles. Així mateix, per a aquest estudi únicament s'han comprat els recursos o materials primordials per al correcte desenvolupament de l'estudi en sí, com per exemple els cilindres i la cartolina blanca col·locada a la zona de gravació. És a dir, l'estudi s'ha dut a terme sense malgastar recursos innecessaris i reutilitzant en la major mesura possible els recursos disponibles. D'aquesta manera, la resta de materials i dispositius per a prendre les mesures experimentals s'han reutilitzat del laboratori, com per exemple el dispositiu d'encastament del cilindre, els dispositius per a mesurar la velocitat al túnel de vent o la càmera utilitzada per a les gravacions juntament amb la resta d'elements disposats en la zona de gravació. A més a més, en el procés de presa de mesures al túnel de vent, únicament s'ha tingut el túnel de vent emetent flux d'aire en els instants de gravació i, per tant, s'ha parat en els moments en els quals es canviava el cilindre i era innecessari tenir-lo en funcionament per tal de no malgastar energia. Pel que fa al procés del càlcul del mòdul de Young experimental del niló Ertalon, el cilindre utilitzat per l'assaig a tracció ha sigut el restant de la barra comprada, aprofitant així la resta del material comprat. Amb tot això, únicament s'han dut a terme dos assaigs a tracció (els mínims possibles) per a obtenir dades fiables i

ahora estalviar energia. En finalitzar l'estudi, tots els materials comprats i utilitzats no útils per a altres futures aplicacions, s'han reciclat correctament.

Tanmateix, en la realització de l'estudi experimental i en relació a la seguretat a l'hora de prendre les mesures experimentals, en tot moment s'han tingut en compte les senyalitzacions de seguretat per tal de dur a terme de manera segura el procés de presa de mesures juntament amb l'ús dels equips de protecció individual corresponents i oportuns en cada cas.

En segon lloc i en relació a l'estudi numèric, únicament s'han executat al clúster Flexicast les proves/simulacions justes i necessàries per a obtenir els resultats numèrics definitius més correctes possibles. És a dir, s'han realitzat una sèrie de proves/simulacions per tal de poder aconseguir en tot moment el millor model numèric possible, però efectuant tan sols les imprescindibles i reduint d'aquesta manera l'energia associada als càlculs numèrics al clúster per tal d'obtenir els resultats definitius. A més a més, atenent a les implicacions socials de l'estudi numèric, s'ha utilitzat un clúster d'ús compartit el que significa i promou un correcte ensenyament de diferents valors fonamentals en l'actualitat com per exemple la cooperació i comunicació entre els usuaris juntament amb el desenvolupament sostenible.

Per acabar, els Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) són els 17 objectius proposats per les Nacions Unides per tal d'aconseguir un futur millor i més sostenible [57]. Atenent a aquests objectius i considerant els aspectes explicats de l'estudi realitzat, es conclou que s'han tingut en compte els següents objectius:

- **Objectiu 4: Educació de qualitat.** Amb l'estudi s'han adquirit competències tècniques i professionals juntament amb coneixements per a promoure el desenvolupament sostenible.
- **Objectiu 7: Energia assequible i no contaminant.** S'han utilitzat dispositius electrònics i bombetes energèticament eficients.
- **Objectiu 11: Ciutats i comunitats sostenibles.** Per a l'estudi experimental s'ha arribat a les instal·lacions de la universitat caminant i d'aquesta manera evitant contaminació de l'aire innecessària provocada per les emissions de diòxid de carboni de mitjans de transport personals, com per exemple el cotxe.
- **Objectiu 12: Producció i consum responsables.** S'han reutilitzat elements del laboratori per tal de desenvolupar l'estudi experimental i s'han reciclat els materials utilitzats no útils per a futures aplicacions.
- **Objectiu 13: Acció pel clima.** Reduint en la major mesura possible les implicacions negatives ambientals i socials s'ha millorat la educació i sensibilització respecte el canvi climàtic.

## Capítol 9

# Conclusions

En el present estudi numèric i experimental de la interacció fluid-estructura (FSI) entre un cilindre circular recte i elàstic encastat pel seu extrem inferior i un flux d'aire extern creuat constant i uniforme, s'han dut a terme de manera efectiva els dos corresponents anàlisis per a posteriorment realitzar la comparació entre aquests resultats numèrics i experimentals amb l'objectiu principal de validar el model numèric realitzat amb un programari de codi obert en base a les mesures experimentals obtingudes al túnel de vent.

En primer lloc, l'estudi experimental s'ha basat en el processament d'imatges de la gravació de diversos vídeos a càmera super-lenta per tal de captar el desplaçament del cilindre en la direcció del flux d'aire, emès pel túnel de vent present al laboratori del Departament de Mecànica de Fluids de l'ESEIAAT. Aquests diversos vídeos s'han realitzat considerant sis velocitats diferents per al flux d'aire i la finalitat principal ha sigut la d'obtenir la posició d'equilibri, l'amplitud d'oscil·lació, l'angle de flexió i la freqüència d'oscil·lació del cilindre a partir del desplaçament del seu extrem lliure. Per al cilindre de niló Ertalon escollit com a millor opció per tal de desenvolupar l'estudi general, s'ha observat un augment quadràtic tant de la posició d'equilibri com de l'angle de flexió amb la velocitat del flux d'aire. Pel que fa a l'amplitud d'oscil·lació del cilindre, aquesta és d'entre un i dos ordres de magnitud inferior a la posició d'equilibri i segueix una funció cúbica amb un pic (màxim relatiu) en l'instant en qual la velocitat del flux d'aire és de 12 m/s. Respecte a la freqüència d'oscil·lació, aquesta aproximadament oscil·la (entre valors de 10 Hz i 15 Hz) respecte un valor de 13 Hz en el rang de velocitats en estudi. Per acabar i en relació amb el pic d'amplitud d'oscil·lació del cilindre mostrat a 12 m/s, s'ha realitzat l'estudi adimensional de les vibracions induïdes per vòrtexs (VIV) i s'ha contemplat que aquest pic es produeix perquè a aquesta velocitat el cilindre entra en ressonància, moment en el qual la freqüència d'oscil·lació del cilindre s'igualava amb la seva freqüència natural. No obstant, s'ha observat que l'amplitud en ressonància no és significant a conseqüència del gran amortiment estructural del niló.

En segon lloc, l'estudi numèric s'ha desenvolupat utilitzant l'eina per a OpenFOAM anomenada solids4Foam, amb capacitats per als anàlisis d'interacció fluid-estructura. En relació al pre-processament del cas d'estudi, s'ha creat tant la malla del sòlid com la del fluid aprofitant la simetria del cas perquè d'aquesta manera es redueixen els càlculs numèrics necessaris i en conseqüència el temps de computació. A més a més, s'ha creat



una malla conforme de manera que en la interfície els nodes de la malla del fluid coincideixin perfectament amb els nodes de la malla del sòlid. En relació a la selecció dels models, per al sòlid s'ha utilitzat un model de geometria lineal que considera la hipòtesi de petites deformacions juntament amb la llei elàstica lineal de Hooke com a llei mecànica constitutiva. Per al fluid s'ha utilitzat un model per a flux incompressible, transitori i turbulent que fa servir l'algorisme PISO per a la resolució de les equacions de Navier-Stokes. Pel que fa a la turbulència, s'ha considerat un model de turbulència  $k-\omega$  SST per tal de considerar l'efecte de les condicions d'un flux turbulent. En la metodologia de resolució d'interacció fluid-estructura s'ha utilitzat un mètode particionat amb un algorisme d'acoblament de Dirichlet-Neumann fortament acoblat amb el mètode de sota-relaxació dinàmica d'Aitken. Amb els paràmetres mencionats especificats, s'han realitzat dues tandes de simulacions: en les primeres simulacions considerant les propietats físiques i mecàniques de la fitxa tècnica i en les segones simulacions considerant les propietats físiques i mecàniques determinades experimentalment per al material de niló Ertalon. Concretament les propietats esmentades són la densitat i el mòdul de Young del material, i existeix principalment una diferència significant en el mòdul de Young, ja que segons la fitxa tècnica és de 3300 MPa i segons l'experimentació (assaig a tracció efectuat) és de 741 MPa. Segons els resultats numèrics de les dues tandes de simulacions efectuades s'ha contemplat un augment quadràtic amb la velocitat del flux d'aire de totes les quatre variables en estudi, amb la particularitat que l'augment de la freqüència és molt poc significatiu, indicant que aquesta es manté gairebé constant en el rang de velocitats en estudi. La diferència entre les dues tandes de simulacions és que en les segones simulacions (en les quals es considera un mòdul de Young igual a 741 MPa) com a conseqüència d'especificar un inferior mòdul de Young per al material, el desplaçament màxim de l'extrem lliure cilindre és major que en les primeres. Això implica que la posició d'equilibri, l'amplitud i l'angle de flexió siguin majors. En canvi, al captar menys oscil·lacions en el mateix interval de temps, la freqüència en aquestes segones simulacions disminueix. L'aspecte important a destacar és que en totes les simulacions efectuades el cilindre no es manté en una posició d'equilibri i oscil·la amb una amplitud petita respecte aquest punt (com succeeix experimentalment), sinó que en cada oscil·lació torna a la seva posició inicial fent que en cada cas el valor de la posició d'equilibri sigui molt similar al valor de l'amplitud d'oscil·lació.

En tercer lloc, la comparació dels resultats experimentals amb els numèrics s'ha realitzat per als resultats numèrics tant de les primeres simulacions com de les segones simulacions. En el cas de la primera comparació amb els resultats numèrics de les primeres simulacions (considerant les propietats de la fitxa tècnica del niló Ertalon), per a totes les quatre variables en estudi la diferència entre els resultats experimentals i els numèrics és relativament elevada. En canvi, en la segona comparació efectuada amb els resultats numèrics de les segones simulacions (considerant les propietats experimentals del niló Ertalon) les variables numèriques de la posició d'equilibri, l'amplitud i sobretot la freqüència s'assimilen en major mesura a les experimentals. Ara bé, en comparació amb les primeres simulacions, l'error relatiu de l'amplitud augmenta molt més. Tal com s'ha comentat, l'augment d'aquest error relatiu és a conseqüència de l'augment de l'amplitud numèrica causat per l'increment en el desplaçament màxim del cilindre i el conseqüent retorn a la seva posició inicial en cada oscil·lació i perquè l'amplitud experimental és molt petita en tot el rang de velocitats en estudi. Tot i així, l'aspecte de més rellevància en aquesta segona comparació és que si es realitza la comparació entre

la posició d'equilibri experimental i la suma de la posició d'equilibri i amplitud numèriques, l'error relatiu és molt baix indicant una gran similitud entre aquests resultats experimentals i numèrics. A més a més, en l'estudi numèric-experimental de de Tabatabaei et al. [6] (explicat al capítol 2) va ser possible validar el model numèric tenint en compte un error d'entre un 4%-5% entre els resultats numèrics i experimentals de la defomració màxima de la biga, aspecte molt similar al present cas d'estudi, tal com s'ha comentat. Això permet extreure dues conclusions importants: la primera és que les propietats físiques i mecàniques adequades del niló Ertalon en el cas d'estudi són les obtingudes experimentalment i la segona és que el principal problema és que el model numèric no es capaç de mantenir el cilindre en una posició d'equilibri (en aquest cas equivalent a la suma entre la posició d'equilibri i l'amplitud obtingudes numèricament) i oscil·lar amb una amplitud petita respecte aquest punt, tal com succeeix en la realitat experimentalment.

Resumint, l'objectiu principal de l'estudi que consisteix en la validació del model numèric a partir de les mesures experimentals no ha sigut possible complir-lo acuradament a causa de la limitació del propi model numèric de l'eina solids4Foam, en particular a la limitació del model del sòlid. Tot i així, s'ha arribat a obtenir un model numèric en que considerant les propietats físiques i mecàniques per al niló Ertalon obtingudes experimentalment, aquest és relativament adequat i en el qual en principi únicament realitzant la millora corresponent per tal que el cilindre sigui capaç de mantenir-se en una posició d'equilibri i no torni a la seva posició inicial en cada oscil·lació, permetria obtenir resultats numèrics fiables i d'aquesta manera permetria validar el model numèric.

Per acabar, com a recomanacions de continuació del treball, en primer lloc s'hauria de procedir a determinar exactament quin és el motiu pel qual el model numèric de l'eina solids4Foam no es capaç de reproduir correctament el que succeeix en la realitat experimentalment, concretament el fet pel qual el cilindre no es capaç de mantenir-se en una posició d'equilibri i oscil·lar amb una petita amplitud respecte aquest punt. Una vegada solucionat, s'hauria de realitzar un estudi de convergència de malla (*Grid Convergence Index (GCI) analysis*) per a conèixer si la malla realitzada dóna resultats suficientment fiables i precisos. Finalment, en relació a l'estudi experimental i com a millora, es podria utilitzar un micròmetre d'escaneig làser d'alta velocitat per tal de captar amb major exactitud el desplaçament de l'extrem lliure del cilindre i així també poder contemplar el grau de precisió de les mesures obtingudes a partir del processament d'imatges dels vídeos gravats a càmera super-lenta.

# Referències

- [1] solids4foam-release. A: *Bitbucket* [en línia]. Philip Cardiff, 2022. [Consulta: 16 març 2022]. Disponible a: [https://bitbucket.org/philip\\_cardiff/solids4foam-release/src/master/](https://bitbucket.org/philip_cardiff/solids4foam-release/src/master/).
- [2] Research. A: *University of Waterloo* [en línia]. University of Waterloo Fluid Mechanics Research Laboratory, 2022. [Consulta: 9 març 2022]. Disponible a: <https://uwaterloo.ca/fluid-mechanics-research-lab/research>.
- [3] Vortex Induced Vibration. A: *Ivory Research* [en línia]. Dave Oneil, 2019. [Consulta: 10 març 2022]. Disponible a: <https://www.ivoryresearch.com/samples/vortex-induced-vibration/>.
- [4] Konstantinidis, E.; Dorogi, D.; Baranyi, L. Resonance in vortex-induced in-line vibration at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* [en línia]. 2021, vol. 907, A34. doi: 10.1017/jfm.2020.850 [Consulta: 30 juny 2022]. Disponible a: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/resonance-in-vortexinduced-inline-vibration-at-low-reynolds-numbers/38148BE5AB376D6F552CBE81DB7F8023>.
- [5] D. Blevins, Robert. Flow-Induced Vibration. Second Edition. Florida: Krieger Publishing Company, 2001. ISBN 1-57524-183-8.
- [6] Tabatabaei, M.; Taha, E.; Luo, J.; Mi, S.; Temir, G. Three-Dimensional Fluid–Structure Interaction Case Study on Elastic Beam. *Journal of Marine Science and Engineering* [en línia]. 2020, 8, 714. [Consulta: 25 abril 2022]. Disponible a: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/9/714/htm>.
- [7] Sheshtawy, H.; Tödter, S.; Moctar, O.; Neugebauer, J.; Schellin, T. Experimentally investigated vortex-induced vibration of a high aspect ratio and small mass ratio circular cylinder oscillating in low reduced velocity flows. *Ocean Engineering* [en línia]. 2021, vol. 238. ISSN 0029-8018 [Consulta: 11 març 2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821011045>.
- [8] Lee, S.; Kim, J. J.; Yeom, E. Vortex-induced reconfiguration of a tandem arrangement of flexible cylinders. *Wind and Structures An International Journal* [en línia]. 2015, vol. 21, no. 1, p. 25-40. [Consulta: 25 abril 2022]. Disponible a: [https://www.researchgate.net/publication/281401616\\_Vortex-induced\\_reconfiguration\\_of\\_a\\_tandem\\_arrangement\\_of\\_flexible\\_cylinders](https://www.researchgate.net/publication/281401616_Vortex-induced_reconfiguration_of_a_tandem_arrangement_of_flexible_cylinders).

- 
- [9] Heydari, S.; A. Patankar, N.; J. Z. Hartmann, M.; K. Jaiman, R. On the fluid-structure interaction of a flexible cantilever cylinder at low Reynolds numbers. *Physical Review Fluids* [en línia]. 2022, vol. 7, Issue 2. [Consulta: 22 febrer 2022]. Disponible a: <https://arxiv.org/abs/2105.11663>.
- [10] Sensor head - LS-5041. A: *Keyence* [en línia]. Keyence Corporation, 2022. [Consulta: 14 març 2022]. Disponible a: <https://www.keyence.eu/products/measure/micrometer/ls-5000/models/ls-5041/>.
- [11] Sony RX100 IV: Características. A: *Sony* [en línia]. Sony Europe B. V., 2022. [Consulta: 26 abril 2022]. Disponible a: [https://www.sony.es/electronics/camaras-compactas-cyber-shot/dsc-rx100m4#features\\_benefits\\_35607496595930691371079843](https://www.sony.es/electronics/camaras-compactas-cyber-shot/dsc-rx100m4#features_benefits_35607496595930691371079843).
- [12] Kdenlive - Video Editing Freedom. A: *Kdenlive* [en línia]. Kdenlive, 2022. [Consulta: 8 juny 2022]. Disponible a: <https://kdenlive.org/es/>.
- [13] Resumen de la versión R2022a. A: *MathWorks* [en línia]. The MathWorks, Inc., 2022. [Consulta: 8 juny 2022]. Disponible a: [https://es.mathworks.com/products/new\\_products/latest\\_features.html](https://es.mathworks.com/products/new_products/latest_features.html).
- [14] The cluster Flexicast [en línia]. Roberto Castilla, 2022. [Consulta: 25 abril 2022]. Disponible a: [https://docs.google.com/document/d/1b-LkgxtuKKvJFCEE\\_meCV\\_c0YkysIvgqNLQ4vEpL1WQ/edit](https://docs.google.com/document/d/1b-LkgxtuKKvJFCEE_meCV_c0YkysIvgqNLQ4vEpL1WQ/edit).
- [15] PuTTY. A: *Viquipèdia* [en línia]. Wikimedia Foundation, Inc., 2022. [Consulta: 3 maig 2022]. Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/PuTTY>.
- [16] Download PuTTY. A: *PuTTY* [en línia]. PuTTY.org, 2021. [Consulta: 22 març 2022]. Disponible a: <https://www.putty.org/>.
- [17] ParaView. A: *ParaView* [en línia]. Kitware Inc., 2022. [Consulta: 3 maig 2022]. Disponible a: <https://www.paraview.org/>.
- [18] FileZilla - The free FTP solution. A: *FileZilla* [en línia]. FileZilla, 2022. [Consulta: 3 maig 2022]. Disponible a: <https://filezilla-project.org/>.
- [19] Principio de Bernoulli. A: *Wikipedia* [en línia]. Wikimedia Foundation, Inc., 2022. [Consulta: 21 abril 2022]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli).
- [20] Período de oscilación. A: *Wikipedia* [en línia]. Wikimedia Foundation, Inc., 2021. [Consulta: 2 juny 2022]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Per%C3%ADodo\\_de\\_oscilaci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Per%C3%ADodo_de_oscilaci%C3%B3n).
- [21] Bonheure, D.; Gazzola, F.; Sperone, G. Regimes of flow across a smooth cylinder [il·lustració]. A: Eight(y) mathematical questions on fluids and structures [en línia]. Rendiconti Linecei - Matematica e Applicazioni, 2019, vol. 30, p. 759-815. 10.4171/RLM/870. [Consulta: 30 juny 2022]. Disponible a: [https://www.researchgate.net/publication/337037148\\_Eighty\\_mathematical\\_questions\\_on\\_fluids\\_and\\_structures](https://www.researchgate.net/publication/337037148_Eighty_mathematical_questions_on_fluids_and_structures).

- [22] Anexo: Momentos de inercia de áreas. A: *Wikipedia* [en línia]. Wikimedia Foundation, Inc., 2022. [Consulta: 5 maig 2022]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Momentos\\_de\\_inercia\\_de\\_%C3%A1reas](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Momentos_de_inercia_de_%C3%A1reas).
- [23] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R. Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears. *Polymer testing* [en línia]. 2006, vol. 25, Issue 1, p. 56-62. ISSN 0142-9418 [Consulta: 30 juny 2022]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941805001522>.
- [24] Mesh generation using blockMesh: blockMesh guided tutorials. A: *Wolf Dynamics* [en línia]. Wolf Dynamics, 2022. [Consulta: 5 abril 2022]. Disponible a: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi518bdjMH3AhWZhPOHHY1YAdcQFnoECD4QAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.wolfdynamics.com%2Fwiki%2Fmeshing\\_OF\\_blockmesh.pdf&usq=A0vVaw2TUqQwubuZJiX94ip04nY](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi518bdjMH3AhWZhPOHHY1YAdcQFnoECD4QAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.wolfdynamics.com%2Fwiki%2Fmeshing_OF_blockmesh.pdf&usq=A0vVaw2TUqQwubuZJiX94ip04nY).
- [25] 2.2 Flow around a cylinder. A: *OpenFOAM* [en línia]. OpenCFD Ltd, 2022. [Consulta: 6 abril 2022]. Disponible a: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/2-incompressible-flow/2.2-flow-around-a-cylinder>.
- [26] solids4foam training. A: *Dropbox* [en línia]. Philip Cardiff, 2021. [Consulta: 18 març 2022]. Disponible a: <https://www.dropbox.com/sh/gqi9icrof74go75/AAAGHvVIXi4P04Txfms27rCua?dl=0&preview=Philip+Cardiff+-+2020+-+Solid+mechanics+and+fluid-solid+interaction+using+the+solids4foam+toolbox.pdf>.
- [27] Cardiff, P.; Karač, A.; Jaeger, P.; Jasak, H.; Nagy, J.; Ivankovic, A.; Tukovic, Z. An open-source finite volume toolbox for solid mechanics and fluid-solid interaction simulations. *Computer Physics Communications* [en línia]. Elsevier Ltd., 2018. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: [https://www.researchgate.net/publication/327392312\\_An\\_open-source\\_finite\\_volume\\_toolbox\\_for\\_solid\\_mechanics\\_and\\_fluid-solid\\_interaction\\_simulations](https://www.researchgate.net/publication/327392312_An_open-source_finite_volume_toolbox_for_solid_mechanics_and_fluid-solid_interaction_simulations).
- [28] Paràmetres de Lamé. A: *Viquipèdia* [en línia]. Wikimedia Foundation, Inc., 2022. [Consulta: 16 maig 2022]. Disponible a: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Par%C3%A0metres\\_de\\_Lam%C3%A9](https://ca.wikipedia.org/wiki/Par%C3%A0metres_de_Lam%C3%A9).
- [29] [solids4Foam] solver settings for unsLinearGeometry. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2021. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/233122-solver-settings-unlineargeometry.html>.
- [30] Numerical solution parameters. A: *CFD Support* [en línia]. CFD Support, 2022. [Consulta: 19 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node81.html>.
- [31] OpenFOAM v6 User Guide - 4.4 Numerical schemes. A: *CFD Direct - The Architects of OpenFOAM* [en línia]. CFD Direct Ltd., 2018. [Consulta: 19 maig 2022]. Disponible a: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v6/fvschemes>.

- [32] OpenFOAM v6 User Guide - 4.5 Solution and algorithm control. A: *CFD Direct - The Architects of OpenFOAM* [en línia]. CFD Direct Ltd., 2018. [Consulta: 19 maig 2022]. Disponible a: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v6/fvsolution>.
- [33] Ertalon 6 SA. A: *Polifluor: Plásticos técnicos para ingeniería* [en línia]. Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2019. [Consulta: 16 maig 2022]. Disponible a: [https://polifluor.com/wp-content/uploads/2021/03/Ertalon\\_6\\_SA.pdf](https://polifluor.com/wp-content/uploads/2021/03/Ertalon_6_SA.pdf).
- [34] Modulus of elasticity and Poisson's coefficient of polymeric materials. A: *Sonelastic - Advanced Impulse Excitation Technique* [en línia]. ATCP Physical Engineering, 2022. [Consulta: 16 maig 2022]. Disponible a: <https://www.sonelastic.com/en/fundamentals/tables-of-materials-properties/polymers.html>.
- [35] solids4Foam + sixDoFRigidBodyDisplacement - 2. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2020. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/222353-solids4foam-sixdofrigidbodydisplacement-2.html>.
- [36] pisoFoam. A: *OpenFOAM: User Guide v2112 - The open source CFD toolbox* [en línia]. OpenCFD Ltd., 2018. [Consulta: 1 maig 2022]. Disponible a: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-incompressible-pisoFoam.html>.
- [37] Çengel, Y. A.; Cimbala, J. M. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* [en línia]. 1a edició. McGraw-Hill, 2006. [Consulta: 4 abril 2022]. Disponible a: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjFurOTw-r4AhUMxYUKHdpTDBkQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Ftesis.pucp.edu.pe%2F repositorio%2Fbitstream%2Fhandle%2F20.500.12404%2F5421%2FSOTOMAYOR\\_DENIS\\_SIMULACION\\_NUMERICA\\_INTERCAMBIADOR\\_CALOR\\_FLUJO\\_TRANSVERSAL\\_ALETEADO\\_ANEXOS.pdf%3Fsequence%3D2%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw0Y6cuILe7PY14rNmHOJxQf](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjFurOTw-r4AhUMxYUKHdpTDBkQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Ftesis.pucp.edu.pe%2F repositorio%2Fbitstream%2Fhandle%2F20.500.12404%2F5421%2FSOTOMAYOR_DENIS_SIMULACION_NUMERICA_INTERCAMBIADOR_CALOR_FLUJO_TRANSVERSAL_ALETEADO_ANEXOS.pdf%3Fsequence%3D2%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw0Y6cuILe7PY14rNmHOJxQf).
- [38] OpenFOAM v6 User Guide - 7.3 Transport/rheology models. A: *CFD Direct - The Architects of OpenFOAM* [en línia]. CFD Direct Ltd., 2018. [Consulta: 18 maig 2022]. Disponible a: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v6/transport-rheology>.
- [39] [solids4Foam] dynamicMeshDict. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Hojatollah Gholami, 2022. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/241297-dynamicmeshdict.html>.
- [40] solids4Foam + sixDoFRigidBodyDisplacement. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2019-2020. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/222353-solids4foam-sixdofrigidbodydisplacement.html>.
- [41] Parameter Definitions - dynamicMotionSolverFvMesh. A: *OpenFOAMWiki* [en línia]. OpenFOAMWiki, 2016. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: [https://openfoamwiki.net/index.php/Parameter\\_Definitions\\_-\\_dynamicMotionSolverFvMesh#Diffusivity\\_Parameter](https://openfoamwiki.net/index.php/Parameter_Definitions_-_dynamicMotionSolverFvMesh#Diffusivity_Parameter).

- [42] SST k-omega model. A: *CFD Online. CFD-Wiki* [en línia]. CFD Online, 2011. [Consulta: 18 maig 2022]. Disponible a: [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model).
- [43] K-Omega and K-Omega SST. A: *Simscale* [en línia]. Simscale, 2021. [Consulta: 18 maig 2022]. Disponible a: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>.
- [44] k-omega Shear Stress Transport (SST). A: *OpenFOAM: User Guide v2112 - The open source CFD toolbox* [en línia]. OpenCFD Ltd., 2016-2017. [Consulta: 18 maig 2022]. Disponible a: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>.
- [45] Solids4Foam:Solution crashes after changing fluid and material properties. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2022. [Consulta: 21 juny 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/240719-solids4foam-solution-crashes-after-changing-fluid-material-properties.html>.
- [46] [solids4Foam] FSI case does not converge, foam extend 4.0. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2022. [Consulta: 21 juny 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/241365-fsi-case-does-not-converge-foam-extend-4-0-a.html>.
- [47] Boundary condition: solidTraction question. A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2019. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/218757-boundary-condition-solidtraction-question.html>.
- [48] Slip vs noSlip BC. A: *CFD Support* [en línia]. CFD Support, 2022. [Consulta: 6 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node118.html>.
- [49] zeroGradient Boundary Condition. A: *CFD Support* [en línia]. CFD Support, 2022. [Consulta: 6 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node113.html>.
- [50] Kinematic pressure. A: *OpenFOAM: User Guide v2112 - The open source CFD toolbox* [en línia]. OpenCFD Ltd., 2018. [Consulta: 6 maig 2022]. Disponible a: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-variable-transform-kinematic-pressure.html>.
- [51] [solidMechanics] Support thread for "Solid Mechanics Solvers added to OpenFOAM Extend". A: *CFD Online. CFD Online Discussion Forums* [en línia]. Philip Cardiff, 2022. [Consulta: 4 maig 2022]. Disponible a: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-cc-toolkits-fluid-structure-interaction/126706-support-thread-solid-mechanics-solvers-added-openfoam-extend-33.html>.
- [52] Turbulence free-stream boundary conditions. A: *CFD Online. CFD-Wiki* [en línia]. CFD Online, 2014. [Consulta: 18 maig 2022]. Disponible a: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_free-stream\\_boundary\\_conditions](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions).

- [53] How To Keep the Courant Number Below 1? A: *Simscale* [en línia]. Simscale, 2022. [Consulta: 25 maig 2022]. Disponible a: <https://www.simscale.com/knowledge-base/what-is-a-courant-number/>.
- [54] controlDict. A: *OpenFOAM: User Guide v2112 - The open source CFD toolbox* [en línia]. OpenCFD Ltd., 2016. [Consulta: 25 maig 2022]. Disponible a: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-case-system-controldict.html>.
- [55] OpenFOAM v6 User Guide - 4.3 Time and data input/output control. A: *CFD Direct - The Architects of OpenFOAM* [en línia]. CFD Direct Ltd., 2018. [Consulta: 25 maig 2022]. Disponible a: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v6/controldict>.
- [56] Gil, Ll. *Estructures aeroespacials: El problema de flexió i el problema axial*. Terrassa: 2021.
- [57] Take Action for the Sustainable Development Goals. A: *Sustainable Development Goals* [en línia]. United Nations, 2022. [Consulta: 25 juliol 2022]. Disponible a: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.