

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Títol:** Estudi comparatiu de diferents metodologies utilitzades en dinàmica de fluids computacional per calcular la pèrdua de càrrega de medis porosos en filtres pressuritzats.

**Document:** Memòria i annexos

**Alumne:** Pau Herrera i Bosque

**Tutor:** Toni Pujol Sagaró

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Mecànica de Fluids

**Convocatòria (mes/any):** Juny 2020



## **ÍNDIX**

Índex .....	i
Índex de figures .....	ii
Índex de taules.....	iv
1 Introducció .....	1
1.1 Antecedents .....	1
1.2 Objecte .....	2
1.3 Abast i especificacions.....	3
2 Metodologia .....	5
2.1 Introducció.....	5
2.2 Dades experimentals .....	6
2.3 Equacions medi porós.....	9
2.3.1 Equació d'Ergun.....	9
2.3.2 Equació de Darcy amb pèrdues inercials.....	9
2.3.3 Equació de Kozeny-Carman.....	9
2.3.4 Equació de tipus potencial.....	10
2.4 Tractament de dades amb CFD.....	12
2.5 Geometria.....	16
3 Efectes de la configuració del model .....	19
3.1 Introducció.....	19
3.2 Tipus de geometria .....	19
3.3 Tipus de malla .....	21
3.4 Models de turbulència .....	23
3.5 Esquema numèric .....	25
3.6 Condicions inicials i de contorn.....	27
3.7 Estat estacionari o transitori.....	29
4 Resultats per a diferents medis.....	31
4.1 Introducció.....	31
4.2 Sorra SSI2.....	31

4.3	Sorra SSI3.....	33
4.4	Vidre reciclat VEI3.....	35
4.5	Vidre tractat AFM3 .....	36
4.6	Microesferes ESF3.....	38
4.7	Discussió .....	39
5	Resum del pressupost.....	43
6	Conclusions .....	45
7	Relació de documents .....	47
8	Bibliografia .....	49
	Annex A: Geometria del model.....	51
	Generació de sòlids en 3D – extrusió, forats .....	51
	Assemblatge i relacions de posició.....	53
	Annex B: Discretització del domini .....	57
	Annex C: Configuració del model.....	63
	Annex D: Cost d’elaboració del projecte .....	67

## ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1:	Muntatge experimental de l’estudi realitzat el 2015 (Bové et al. 2015). .....	1
Figura 2:	Esquema del filtre a escala amb la vista explosionada de la crepina (dimensions en mm).....	2
Figura 3:	Disposició dels manòmetres del filtre a escala (dimensions en mm) .....	5
Figura 4:	Caiguda de pressió total en l’assaig SSI2 H317 .....	8
Figura 5:	Exemple d’ajust de les dades experimentals a un model de segon ordre.....	11
Figura 6:	Exemple d’ajust de les dades experimentals a un model potencial.....	12
Figura 7:	Pressió a l’entrada del filtre respecte el nombre d’iteracions del cas SSI2 H317 Ergun.....	15
Figura 8:	Filtre amb forma simètrica respecte l’eix longitudinal.....	16
Figura 9:	Vista ampliada de l’interior del filtre i la crepina .....	17
Figura 10:	Conducte d’entrada de 100mm.....	19
Figura 11:	Model del filtre simulat amb conductes d’entrada i sortida de 300mm .....	20
Figura 12:	Caiguda de pressió amb barres d’error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.....	21

Figura 13: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.....	22
Figura 14: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2T5 .....	23
Figura 15: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de pressió a l'entrada del filtre.....	24
Figura 16: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw .....	25
Figura 17: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.....	26
Figura 18: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw .....	27
Figura 19: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.....	28
Figura 20: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw .....	29
Figura 21: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.....	30
Figura 22: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas SSI2	32
Figura 23: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental SSI2 .....	32
Figura 24: Caiguda de pressió al llarg del filtre per al cas SSIE8 simulada amb el Fluent .....	33
Figura 25: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas SSI3	34
Figura 26: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental SSI3 .....	34
Figura 27: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas VEI3	35
Figura 28: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental VEI3 .....	36
Figura 29: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas AFM3 .....	37
Figura 30: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental AFM3 .....	37
Figura 31: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas ESF3 .....	38
Figura 32: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental ESF3.....	39
Figura 33: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode d'Ergun.....	40
Figura 34: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de Darcy .....	40
Figura 35: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de Koceny-Carman.....	41
Figura 36: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de la llei potencial .....	41
Figura 37: Croquis del perímetre del filtre .....	51

Figura 38: Exemple d'operació <i>extruir</i> per genera el cilindre massís del filtre .....	52
Figura 39: Exemple de l'operació <i>cortar</i> per buidar el cilindre i obtenir un tub .....	52
Figura 40: Cos del filtre.....	53
Figura 41: Imatge de SolidWorks on es mostra la relació de posició entre la carcassa del filtre (de color blau) i la tapa superior (de color taronja). .....	53
Figura 42: Geometria de la carcassa del filtre .....	54
Figura 43: Secció de la crepina explosionada. ....	54
Figura 44: Cotes de la crepina (mm).....	55
Figura 45: Disposició del Project Schematic on veiem els diferents mòduls de treball de l'ANSYS. ....	57
Figura 46: Definició de les regions del filtre a l'entorn Mesh. ....	57
Figura 47: Llista de superfícies de la malla i exemple d'una inflació a la paret del filtre ..	58
Figura 48: Definició de la inclinació dels elements .....	59
Figura 49: Definició de la ràtio d'aspecte .....	60
Figura 50: Definició de la qualitat ortogonal dels elements de la malla .....	60
Figura 51: Malla del filtre i detall de la malla a la zona de la crepina. ....	61
Figura 52: Models de turbulència amb els que permet treballar el Fluent .....	63
Figura 53: Configuració dels paràmetres que modelen el medi filtrant. ....	64
Figura 54: Definició de la rugositat dins del <i>boundary conditions</i> . ....	64
Figura 55: Exemple de la configuració dels mètodes dins del Fluent. ....	65

## ÍNDEX DE TAULES

Taula 1: Tipus de medi filtrant .....	6
Taula 2: Mida dels grans del medi filtrant .....	6
Taula 3: Altura del medi filtrant.....	6
Taula 4: Casos dels quals es tenen dades experimentals .....	7
Taula 5: Casos simulats en aquest estudi .....	7
Taula 6: Dades experimentals cas SSI2 H317 .....	7
Taula 7: Paràmetres físics dels medis .....	10
Taula 8: Resum de paràmetres $1/\alpha$ i $C_2$ de l'equació (2).....	11
Taula 9: Resum de paràmetres $C_0$ i $C_1$ de l'equació (4).....	12
Taula 10: Arxius generats per l'ANSYS Fluent per a cada cas .....	13
Taula 11: Exemple de valors generats pel Fluent en el cas SSI2 H317 Ergun .....	14
Taula 12: Estadístics del cas SSI2 H317 Ergun .....	15
Taula 13: Resultats de les simulacions amb diferents geometries.....	20

Taula 14: Resultats de les simulacions amb diferents tipus de malles .....	22
Taula 15: Resultats de les simulacions amb diferents models de turbulència.....	24
Taula 16: Resultats de les simulacions amb diferents configuracions de l'esquema numèric .....	26
Taula 17: Resultats de les simulacions amb diferents condicions inicials i de contorn .....	28
Taula 18: Resultats de les simulacions del cas estacionari i transitori.....	29
Taula 19: Resultat de les simulacions del cas SSI2 amb diferents equacions i cabals.....	31
Taula 20: Resultat de les simulacions del cas SSI3 amb diferents equacions i cabals.....	33
Taula 21: Resultat de les simulacions del cas VEI3 amb diferents equacions i cabals.....	35
Taula 22: Resultat de les simulacions del cas AFM3 amb diferents equacions i cabals ...	36
Taula 23: Resultat de les simulacions del cas ESF3 amb diferents equacions i cabals ...	38
Taula 24: Mides màximes dels elements a les superfícies ( <i>Face size function</i> ) .....	58
Taula 25: Mides màximes dels elements a les superfícies dels volums ( <i>Body size function</i> ) .....	59
Taula 26: Mides màximes dels elements a les superfícies dels cossos ( <i>Body of influence</i> ) .....	59
Taula 27: Mètriques de les malles.....	60
Taula 28: Estadístics de les malles .....	61





# 1 INTRODUCCIÓ

## 1.1 Antecedents

Els sistemes de filtració amb medi porós són molt utilitzats en agricultura de reg per degoters. D'aquí l'interès en millorar-ne el disseny mitjançant simulació amb dinàmica de fluids computacional (CFD). Però els models CFD disposen de diferents mètodes per avaluar les pèrdues de càrrega en el medi porós: l'equació d'Ergun, l'equació de Kozeny-Carman, l'equació de Darcy, aproximació d'equació potencial, etc. Alhora, també utilitzen diferents aproximacions per calcular-les com utilitzar la velocitat superficial o la velocitat local. És necessari un estudi comparatiu de les diferents metodologies disponibles en els CFDs per determinar la seva validesa quan s'apliquen a filtres reals.

Els antecedents d'aquest estudi és un experiment realitzat l'any 2015 del qual es tenen dades experimentals. L'estudi va ser dut a terme pel departament d'Enginyeria Mecànica i De la Construcció Industrial conjuntament amb el departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.

L'experiment va consistir en realitzar uns assajos de filtració amb un filtre comercial a escala i amb diferents medis filtrants. Es van fer circular diferents cabals compresos entre 0,4 i 1,1L/s pel filtre i alhora també es van variar les alçades de columna de medi filtrant per tal de registrar les pèrdues de càrrega en els diferents casos.

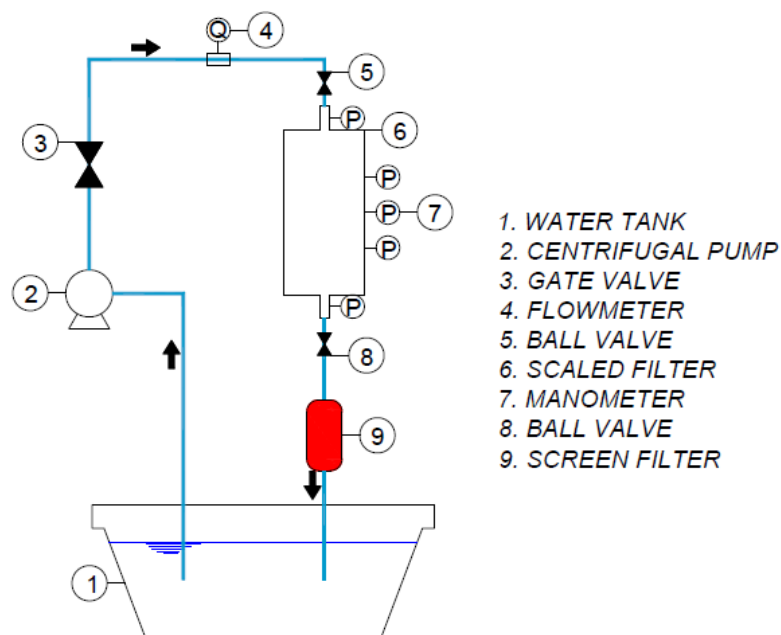


Figura 1: Muntatge experimental de l'estudi realitzat el 2015 (Bové et al. 2015).

A la Figura 2: Esquema del filtre a escala amb la vista explosionada de la crepina, es mostra el funcionament del filtre de sorra en mode filtració, en el cas del contrarentat el sentit de circulació seria al contrari. El procés és senzill: entra l'aigua bruta, travessa el medi filtrant i surt l'aigua neta. A l'interior del filtre, just a sota del medi filtrant, hi trobem la crepina, que és un element dissenyat per drenar. La crepina es compon de tres elements: la cúpula amb escletxes, el col·lector i la coberta inferior. La seva funció és evitar que la sorra la travessi ja que les escletxes són més estretes que un gra de sorra i això permet que només passi l'aigua neta.

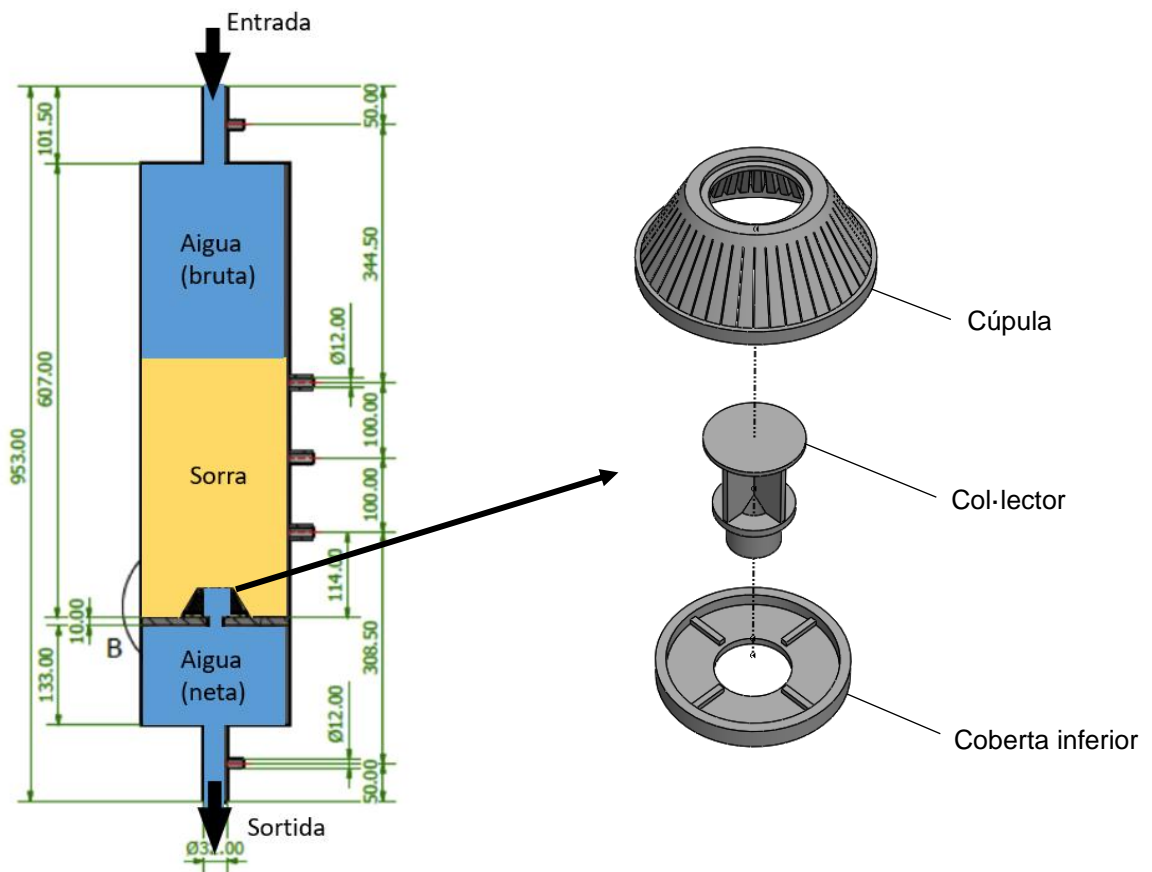


Figura 2: Esquema del filtre a escala amb la vista explosionada de la crepina (dimensions en mm)

## 1.2 Objecte

L'objecte del present projecte és comparar les diferents metodologies disponibles en el programa ANSYS-Fluent per calcular la caiguda de pressió en medis porosos i determinar-ne la validesa en la simulació d'un filtre de laboratori.

### **1.3 Abast i especificacions**

Es farà el disseny CAD del filtre de laboratori que ha estat utilitzat en estudis previs (Figura 1) i del qual es tenen dades experimentals quan el medi porós és: sorra, vidre, vidre reciclat i microesferes. S'aplicaran les diferents metodologies proposades en ANSYS-Fluent per calcular la caiguda de pressió en el medi porós i en el filtre sencer. Es compararan els resultats obtinguts pels diferents medis per tal de recomanar la metodologia més adient en la simulació de filtres d'aigua pressuritzats.



## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Introducció

L'experiment del 2015 va consistir en realitzar uns assajos de filtració amb diferents medis filtrants (Mollera, 2015). Es van fer circular diferents cabals compresos entre 0,4 i 1,1L/s pel filtre i també es van variar les alçades de columna de sorra i la mida dels grans dels medis filtrants.

El filtre amb el que es van dur a terme els assajos és un filtre a escala d'un model comercial. Es va utilitzar la velocitat superficial (velocitat mitjana de l'aigua en l'interior del filtre) compresa entre 0.004 i 0.025 m/s per escalar la geometria del filtre. A la Figura 3 es mostren les dimensions del filtre, de les quals destaquem els 200 mm de diàmetre interior i la llargada total de 750 mm. També podem comprovar que els manòmetres 2,3,4 estan col·locats a 100 mm l'un de l'altre per tal de poder mesurar pressions en diferents trams del filtre i a diferents altures del medi filtrant.

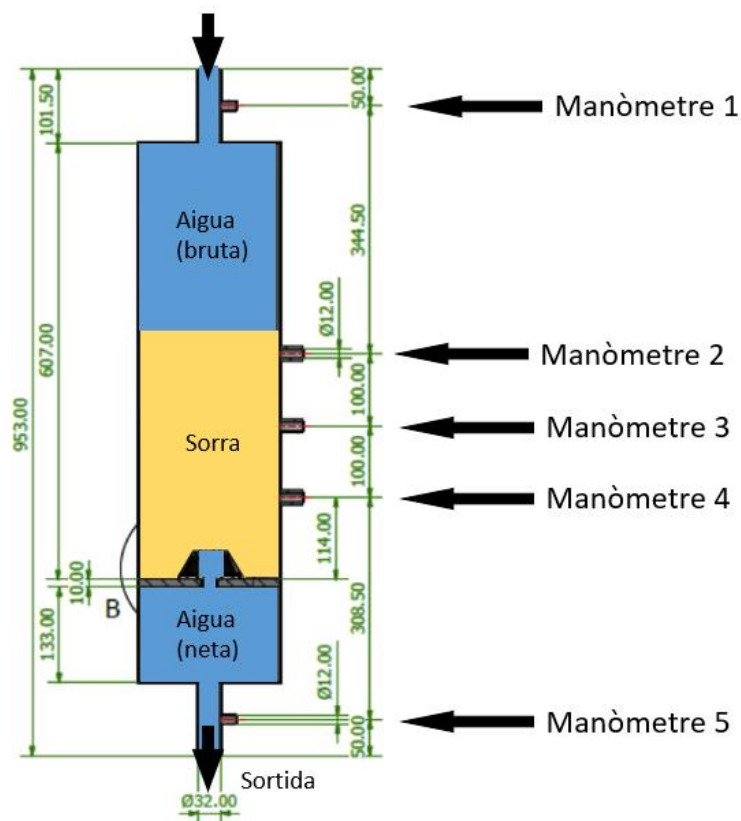


Figura 3: Disposició dels manòmetres del filtre a escala (dimensions en mm)

## 2.2 Dades experimentals

Durant els assajos es van utilitzar 4 tipus de medis filtrants: sorra silícia, vidre reciclat, vidre tractat i microesferes.

La taules 1, 2 i 3 mostren les denominacions que classifiquen els assajos segons el tipus de medi filtrant, la mida dels grans i l'altura del medi filtrant, respectivament.

Taula 1: Tipus de medi filtrant

Medi	Denominació
Sorra silícia	SSI
Vidre reciclat	VEI
Vidre tractat	AFM
Microesferes	Esferes

Taula 2: Mida dels grans del medi filtrant

	Denominació	Rang de diàmetre de les partícules del medi filtrant (mm)
Interval 1	1	0.85 - 1.50
Interval 2	2	0.75 - 0.85
Interval 3	3	0.63 - 0.75

Taula 3: Altura del medi filtrant

Altura medi filtrant (mm)	Denominació
317	H317
217	H217
117	H117

Es van obtenir dades experimentals dels diferents casos indicats a la Taula 4. En el present estudi només hem tractat les dades dels casos SSI2, SSI3, VEI3, Esferes3 i AFM3, totes en la configuració H317, Taula 5. Això és degut a que els hem considerat suficients per estudiar les diferents opcions del software ANSYS-Fluent per determinar quin mètode és el més adequat per resoldre el comportament del flux en medi porós en un filtre de sorra. Els resultats dels anteriors casos els estudiarem en l'apartat 4 d'aquest estudi.

Taula 4: Casos dels quals es tenen dades experimentals

Medi/interval	SSI	VEI	AFM	Esferes
1		VEI1 H317		
2	SSI2 H117	VEI2 H117	AFM2 H117	
	SSI2 H317	VEI2 H317	AFM2 H317	
3	SSI3 H117	VEI3 H117	AFM3 H117	Esferes3 H117
	SSI3 H217	VEI3 H217	AFM3 H317	Esferes3 H317
	SSI3 H317	VEI3 H317		

Taula 5: Casos simulats en aquest estudi

Medi/interval	SSI	VEI	AFM	Esferes
2	SSI2 H317			
3	SSI3 H317	VEI3 H317	AFM3 H317	Esferes3 H317

Tot seguit a la Taula 6 veiem un exemple de les dades que es van enregistrar durant els experiments per al cas SSI2 H317. Van ser mesurades les pressions relatives a cada manòmetre alhora que es variava el cabal d'aigua que circulava. Aquests valors van permetre representar gràficament la caiguda de pressió total al llarg del filtre respecte el cabal, Figura 4.

Taula 6: Dades experimentals cas SSI2 H317

Q (L/s)	Pressió (Pa)				
	manòmetre 01	manòmetre 02	manòmetre 03	manòmetre 04	manòmetre 05
0,106	15.172,3	14.997,0	14.598,0	14.145,8	12.430,6
0,153	18.499,4	18.243,2	17.504,0	16.850,0	14.157,2
0,164	13.414,4	13.257,8	12.740,3	12.118,0	9.730,3
0,187	16.117,2	16.014,3	15.355,8	14.474,4	11.664,9
0,197	17.384,6	17.174,2	16.506,1	15.696,8	12.614,9
0,224	21.076,1	20.885,1	20.056,9	18.973,4	15.417,2
0,234	27.635,1	27.212,3	26.015,0	25.113,9	20.534,7
0,254	25.279,0	24.931,4	24.066,7	22.983,6	18.586,4
0,289	31.418,7	31.122,8	29.974,4	28.555,6	23.273,0
0,292	36.147,5	35.746,9	34.199,1	32.947,2	26.910,7
0,300	33.288,1	32.892,3	31.773,3	30.458,8	24.689,4
0,323	37.767,5	37.300,2	36.083,8	34.717,7	28.142,9
0,343	41.751,9	41.395,7	40.106,2	38.193,9	31.195,0
0,358	47.314,3	46.873,2	45.024,1	43.442,7	35.196,7
0,370	47.928,6	47.394,9	45.674,6	44.142,7	36.064,0

0,387	51.649,6	51.210,8	49.415,5	47.546,9	38.872,7
0,399	56.045,9	55.579,2	53.494,9	51.617,4	41.852,3
0,425	60.798,2	60.226,9	58.137,8	56.232,7	46.071,0
0,456	69.842,6	69.299,2	66.859,2	64.711,3	52.680,1
0,458	69.643,1	69.030,0	66.735,4	64.642,6	53.145,3
0,476	74.702,7	74.111,9	71.531,1	69.307,8	56.963,3
0,525	89.207,0	88.563,0	85.630,9	83.225,8	68.536,7
0,551	97.735,8	97.080,9	94.058,6	91.257,6	74.839,2
0,578	106.618,5	105.748,5	102.524,7	99.789,4	82.495,2
0,584	108.500,0	107.781,6	104.469,6	101.673,6	83.943,7
0,611	117.055,5	116.192,2	112.777,7	109.744,6	90.710,5
0,641	127.474,7	126.570,2	122.980,0	119.811,7	99.196,9
0,662	135.135,5	134.163,6	130.490,7	127.032,2	105.166,4
0,694	147.636,5	146.657,7	142.698,7	139.061,5	115.260,9
0,702	150.655,0	149.684,4	145.561,0	142.001,0	117.890,5
0,722	158.927,9	157.738,5	153.578,6	149.882,5	124.465,2
0,734	163.864,6	163.518,3	158.467,1	154.639,6	128.237,9
0,761	175.567,8	174.325,9	169.968,5	165.879,9	137.990,4
0,794	191.203,8	190.024,8	185.166,3	180.927,0	150.401,0

A continuació es mostra la representació gràfica de la caiguda de pressió total envers el cabal que circula pel filtre en el cas SSI2 H317.

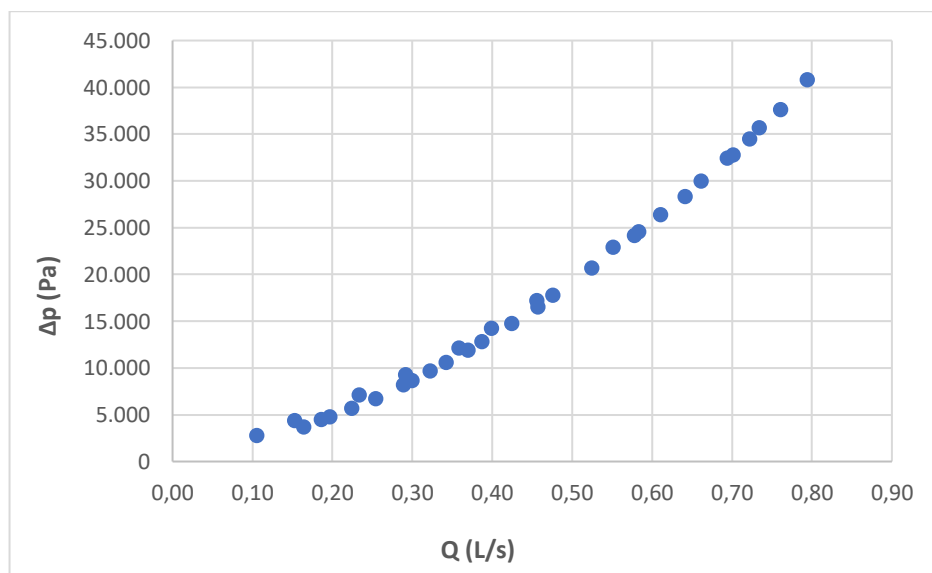


Figura 4: Caiguda de pressió total en l'assaig SSI2 H317



## 2.3 Equacions medi porós

Existeixen diferents mètodes per calcular la caiguda de pressió per unitat de longitud a la sorra. Els més habituals es llisten a continuació:

### 2.3.1 Equació d'Ergun

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = 150 \frac{\mu v_s}{D_{eq}^2 \psi^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho v_s^2}{D_{eq} \psi} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

On:  $\mu$  és la viscositat de l'aigua,  $\varepsilon$  és la porositat del medi (volum de buits entre partícules dividit pel volum total que ocupa (màxim és 1, mínim és 0),  $\rho$  és la densitat de l'aigua,  $\psi$  és el coeficient d'esfericitat de les partícules (1 si són totalment esfèriques,  $< 1$  si no ho són),  $D_{eq}$  és el diàmetre equivalent de la partícula i  $v_s$  és la velocitat superficial (igual al cabal dividit per la secció total del filtre).

La velocitat superficial no és igual a la velocitat real de les partícules a dins del medi, ja que l'aigua disposa d'una àrea més petita per on poder passar.

L'equació anterior, com les que es llisten a continuació, calcula la caiguda de pressió per unitat de longitud ( $\Delta p/\Delta L$ ) en l'interior del medi.

### 2.3.2 Equació de Darcy amb pèrdues inercials

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{\mu}{\alpha} v_s + \frac{C_2}{2} \rho v_s^2 \quad (2)$$

on:  $\alpha$  és la permeabilitat del medi i  $C_2$  és el factor de resistència inercial (valors trobats empíricament a partir dels experiments)

L'equació de Darcy és la mateixa que l'equació d'Ergun si es compleix:

$$\frac{1}{\alpha} = 150 \frac{1}{D_{eq}^2 \psi^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad i \quad C_2 = 3.5 \frac{1}{D_{eq} \psi} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

### 2.3.3 Equació de Kozeny-Carman

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = 150 \frac{\mu v_s}{D_{eq}^2 \psi^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

És la part lineal de l'equació d'Ergun.

### 2.3.4 Equació de tipus potencial

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = C_0 v_s^{C_1} \quad (4)$$

On:  $C_0$  i  $C_1$  són coeficients empírics a determinar amb els experiments.

La variable de les equacions anteriors és la velocitat superficial  $v_s$ . Tots els altres termes són constants que s'han de determinar amb ajustos experimentals.

El software ANSYS-Fluent permet incloure els efectes del medi porós a partir de configurar la simulació amb els valors d' $\alpha$  i  $C_2$  o de  $C_0$  i de  $C_1$ . Això no vol dir que només es puguin fer simulacions pel model de Darcy (2) i el de la llei potencial (4). Els valors d' $\alpha$  i  $C_2$  de l'equació (2) es poden igualar als termes de l'Equació d'Ergun (1) com es diu en el punt 2.3.2 o de l'Equació Kozeny-Carman (3) amb  $C_2 = 0$ .

Els valors dels paràmetres de les equacions (1) i (3) s'han obtingut a partir de les dades del medi tabulades en l'experiment del 2015.

Taula 7: Paràmetres físics dels medis

Medi	Tamany gra (mm)	E	Deq (mm)	$\psi$
SSI2	0,8	0,4	0,922	0,89
SSI3	0,69	0,42	0,715	0,89
VEI3	0,69	0,44	0,711	0,71
AFM3	0,69	0,49	0,602	0,598
Esferes3	0,69	0,38	0,652	1

Els paràmetres de l'equació (2), s'han aconseguit fent un ajust experimental de les dades entre els manòmetres 2 i 4 (efecte només del medi) a una equació del tipus :

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = a v_s + b v_s^2 \quad (5)$$

On  $a$  i  $b$  són constants per obtenir els valors d' $\alpha$  i  $C_2$ .

A la Figura 5 es mostra la representació gràfica de la caiguda de pressió entre els manòmetres 2 i 4 envers la velocitat del fluid que circula pel filtre en el cas SSI2 H317. Fent un ajust amb les eines del full de càlcul s'han obtingut directament els paràmetres  $a$  i  $b$  de l'equació (5).

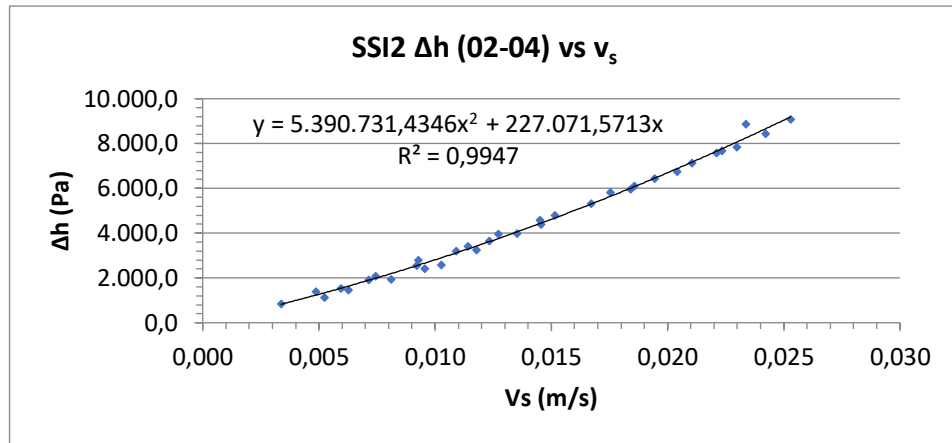


Figura 5: Exemple d'ajust de les dades experimentals a un model de segon ordre

Un cop ajustades les dades dels casos experimentals, s'igualen les equacions (2) i (5) i es troben els paràmetres  $1/\alpha$  i  $C_2$  que es resumeixen a la Taula 8.

Taula 8: Resum de paràmetres  $1/\alpha$  i  $C_2$  de l'equació (2)

Medi	$1/\alpha$ (m <sup>-2</sup> )	$C_2$ (m <sup>-1</sup> )
SSI2	1.135.357.856,50	53.907,31
SSI3	1.426.866.416,00	67.809,71
VEI1	794.666.385,50	49.944,82
VEI2	1.043.068.813,00	74.554,78
VEI3	1.681.643.290,00	84.367,54
AFM2	1.585.056.433,50	51.025,81
AFM3	2.241.677.508,50	80.062,87
Esferes3	2.770.785.712,50	52.576,00

Per a l'equació de Kozeny-Carman (3) es fan els càlculs amb una coeficient de 180 enlloc de 150 com diu la fórmula original ja que estudis anteriors demostren que s'obtenen millors resultats (Bové et al. 2015). Cal remarcar doncs, que no es tracta estrictament del primer terme de l'equació d'Ergun (1).

La nova versió de l'equació Kozeny-Carman és la següent:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = 180 \frac{\mu v_s}{D_{eq}^2 \psi^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

Per altra banda, l'ajust de les dades per a l'equació ( 4) es fa a una equació del tipus potencial i obtenim una gràfica com la Figura 6. Aquesta és la mateixa gràfica que la Figura 5 però aquest cas s'ajusta a una línia de tendència exponencial de la qual se n'extreuen els valors de  $C_0$  i  $C_1$  resumits a la Taula 9:

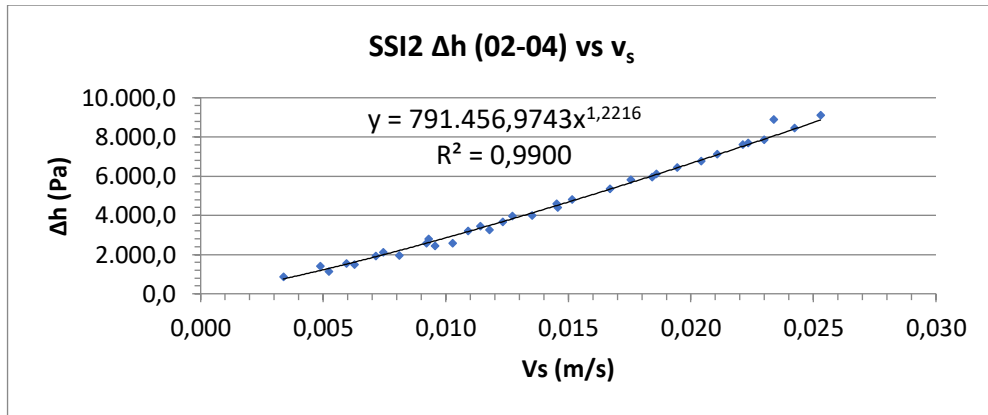


Figura 6: Exemple d'ajust de les dades experimentals a un model potencial

Taula 9: Resum de paràmetres  $C_0$  i  $C_1$  de l'equació (4)

Medi	$C_0$	$C_1$
SSI2	791.456,97	1,2216
SSI3	1.006.273,35	1,2233
VEI1	649.078,21	1,2392
VEI2	2.093.796,98	1,4456
VEI3	1.087.306,01	1,1975
AFM2	719.268,29	1,1403
AFM3	1.012.239,45	1,1332
Esferes3	1.026.610,72	1,1134

En les taules resums dels paràmetres calculats hi ha també alguns casos que no estudiarem en aquest estudi però que poden ser útils per a futurs estudis.

## 2.4 Tractament de dades amb CFD

L'eina amb la que tractarem les dades és l'ANSYS-Fluent. La simulació de cada cas parteix d'unes condicions inicials determinades. El Fluent va iterant i modifica els anteriors valors d'acord amb les equacions de la dinàmica de fluids fins a trobar el resultat final. Entenem per resultat final aquell estat en què la velocitat i pressió no canvien d'una iteració a una altra, és a dir, quan assolim un estat estacionari.

Una possible manera de saber que s'ha arribat a aquest estat estacionari és utilitzar el concepte de residual que és un valor que té en compte la diferència de la variable que estem estudiant entre la iteració actual i l'anterior. Si el residual és proper a zero voldrà dir que ens estem apropant a l'estat estacionari.

Hi ha tants residuals com variables tingui el problema o, equivalentment, equacions de conservació. Per això, tenim els residuals de:

- Continuitat (associat a l'equació de conservació de la massa)
- X-velocitat, y-velocitat, z-velocitat (associats a les equacions de conservació de la quantitat de moviment en x, y i z)
- K i  $\omega$  (associats a les equacions de turbulència per a l'energia cinètica k i a la taxa de dissipació de la turbulència  $\omega$ ).

Però aquests residuals mai arriben a ser zero ja que hi ha molts factors, com el truncament de les xifres decimals dels valors numèrics, que fa que sigui impossible arribar-hi.

Això sí, quan s'estabilitzen, vol dir que segurament s'ha arribat a una solució estacionària.

Però els residuals no són l'única eina per saber que s'ha arribat a una solució estacionària. Els valors dels residuals, que normalment s'escalen en funció dels valors inicials, varien molt si la suposició del flux inicial (és a dir, les condicions inicials) són molt diferents del resultat estacionari.

Per exemple, si la suposició de la pressió i velocitat inicial en el fluid és molt propera al resultat correcte, els residuals escalats respecte la variació inicial pot ser que siguin alts perquè molt poc després de l'inici ja estarem gairebé en la solució final. Per això estudiem la tendència de les variables objectiu. En el filtre, les variables objectiu són la pressió i el cabal a l'entrada i a la sortida del filtre.

Per a cada cas simulat amb el Fluent, es guarda l'historial de pressions i cabals màssics a l'entrada i a la sortida en arxius indicats a la Taula 10.

Taula 10: Arxius generats per l'ANSYS Fluent per a cada cas

pressure_inlet =>	Arxiu de dades de pressió a l'entrada (Pa)
pressure_exit =>	Arxiu de dades de pressió a la sortida (Pa)
massflow_inlet =>	Arxiu de dades de cabal (màssic) a l'entrada (kg/s)
massflow_exit =>	Arxiu de dades de cabal (màssic) a la sortida (kg/s)

Un cop obtinguts els arxius del Fluent, s'importen en un full de càlcul, Taula 11 per a l'exemple del cas SSI2 H317 i equació d'Ergun fixant un cabal d'entrada de 0.4 L/s per a tot el filtre (la meitat per a la simulació ja que s'aprofita la simetria del model, com s'exposa a l'annex A), per tal de representar gràficament els valors en funció de la iteració. La Figura 7 mostra un exemple de l'evolució de la pressió a l'entrada del filtre envers el nombre d'iteracions.

Taula 11: Exemple de valors generats pel Fluent en el cas SSI2 H317 Ergun

Iteration	massflow_exit	Iteration	massflow_inlet	Iteration	pressure_exit	Iteration	pressure_inlet
1	-0,1923789	1	0,1995135	1	141325	1	141725,4
2	-0,1786027	2	0,1995135	2	141325	2	142224,8
3	-0,1610991	3	0,1995135	3	141325	3	142314,3
4	-0,1684776	4	0,1995135	4	141325	4	142535,5
5	-0,1658615	5	0,1995135	5	141325	5	142699,5
6	-0,1728368	6	0,1995135	6	141325	6	142883,5
7	-0,167072	7	0,1995135	7	141325	7	143039,1
8	-0,1717759	8	0,1995135	8	141325	8	143138,2
9	-0,175924	9	0,1995135	9	141325	9	143241,8
10	-0,0818406	10	0,1995135	10	141325	10	143353,1
11	-0,09549474	11	0,1995135	11	141325	11	143458,8
12	-0,08679451	12	0,1995135	12	141325	12	143600,2
13	-0,09496077	13	0,1995135	13	141325	13	143750,9
14	-0,1494594	14	0,1995135	14	141325	14	143867,6
15	-0,1031051	15	0,1995135	15	141325	15	143998,8
16	-0,1587275	16	0,1995135	16	141325	16	144102,6
17	-0,1561648	17	0,1995135	17	141325	17	144148,6
18	-0,1743527	18	0,1995135	18	141325	18	144282,8
19	-0,1785604	19	0,1995135	19	141325	19	144313,7
20	-0,1148902	20	0,1995135	20	141325	20	144456,5
21	-0,1758971	21	0,1995135	21	141325	21	144579
22	-0,1539301	22	0,1995135	22	141325	22	144636,9
23	-0,1144267	23	0,1995135	23	141325	23	144774,4
24	-0,1696807	24	0,1995135	24	141325	24	144890,5
25	-0,1597336	25	0,1995135	25	141325	25	144927,2

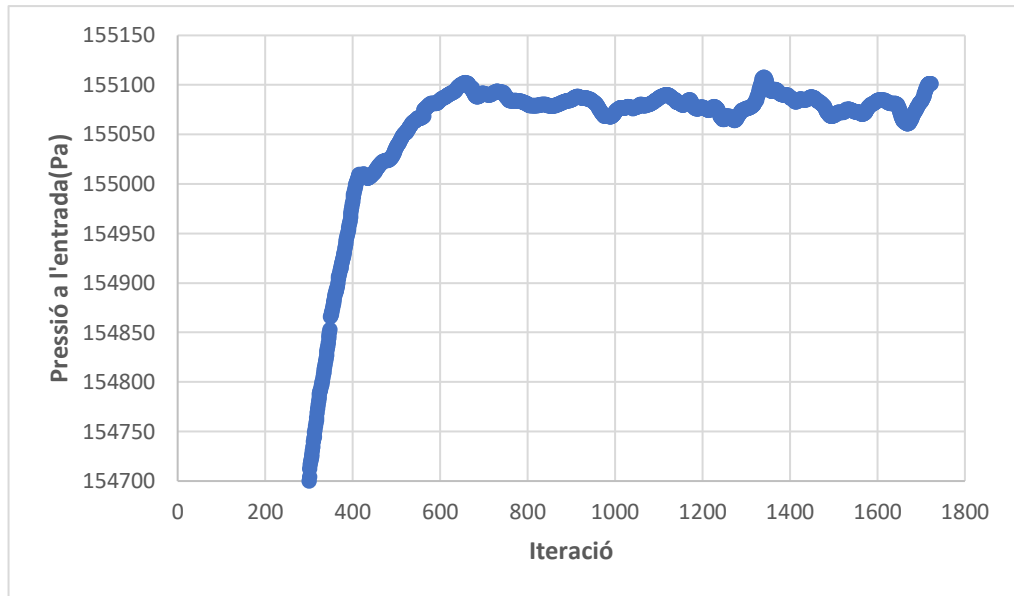


Figura 7: Pressió a l'entrada del filtre respecte el nombre d'iteracions del cas SSI2 H317 Ergun

Un cop importats els valors al full de càlcul, es calculen els estadístics de mitjana, desviació estàndard, màxim, mínim i rang per a cada un dels 4 conjunts de valors. Analitzem els estadístics en les últimes 150 iteracions ja que tot i ser un nombre arbitrari ens proporciona més precisió que només agafar l'última iteració.

Ens interessa trobar la pèrdua de càrrega simulada per a tot el filtre, la diferència entre la pressió a l'entrada,  $p_{in}$ , i la pressió a la sortida,  $p_{out}$ . I també calculem el valor de *imbalance* o desequilibri, que ens permet saber si la simulació ha arribat a un estat estacionari o no. Es calcula amb el percentatge de la diferència entre el cabal màssic que entra al filtre,  $Min$ , i el cabal màssic que surt,  $Mout$ . Acceptarem un valor d'*imbalance*  $<0.1\%$  com adequat.

A la Taula 12 es mostren els estadístics calculats per al cas SSI2 H317 amb un cabal de 0,4 l/s segons el mètode d'Ergun.

Taula 12: Estadístics del cas SSI2 H317 Ergun

	Average	Desvest	Max	Min	Rang
$p_{out}$ (Pa)	141325	0,000	141325,0	141325	0,0
$p_{in}$ (Pa)	155079	9,9	155101	155061	40,5
$Mout$ (kg/s)	-0,19937	0,00059	-0,19810	-0,20101	0,00290
$Min$ (kg/s)	0,19951	0,00000	0,19951	0,19951	0,00000
$Pin - Pout$ (Pa)	13754				
$Min - Mout$ (kg/s)	0,00014	Imbalance $Min\_Mout$ (%) =			0,070719

Totes les simulacions requerides en aquest estudi amb el software ANSYS Fluent, s'han dut a terme en un dispositiu Workstation ubicat al despatx D-101, que és propietat de la Universitat de Girona, que consta d'un processador Intel XEON W-2155 10 cores (x2) amb 128 GB de memòria RAM.

Els models s'han simulat de 4 en 4 i han trigat unes 12 hores cada bloc, fent us de 5 CPUs i uns 25GB de memòria RAM cadascun d'ells.

## 2.5 Geometria

El filtre estudiat presenta una geometria simètrica respecte l'eix longitudinal. Tant el cos del filtre (Figura 8) com la crepina que conté a l'interior (Figura 9) s'han dissenyat com cossos de revolució respecte aquest eix. En el cas de la crepina, la cúpula té 45 escletxes i el col·lector i la coberta inferior tenen plans de simetria a  $90^\circ$ . Això fa que només hi hagi un únic pla de simetria pel conjunt del filtre. Això ens permet estalviar temps de càlcul en les simulacions del programari Fluent ja que només simularem mig filtre.



Figura 8: Filtre amb forma simètrica respecte l'eix longitudinal



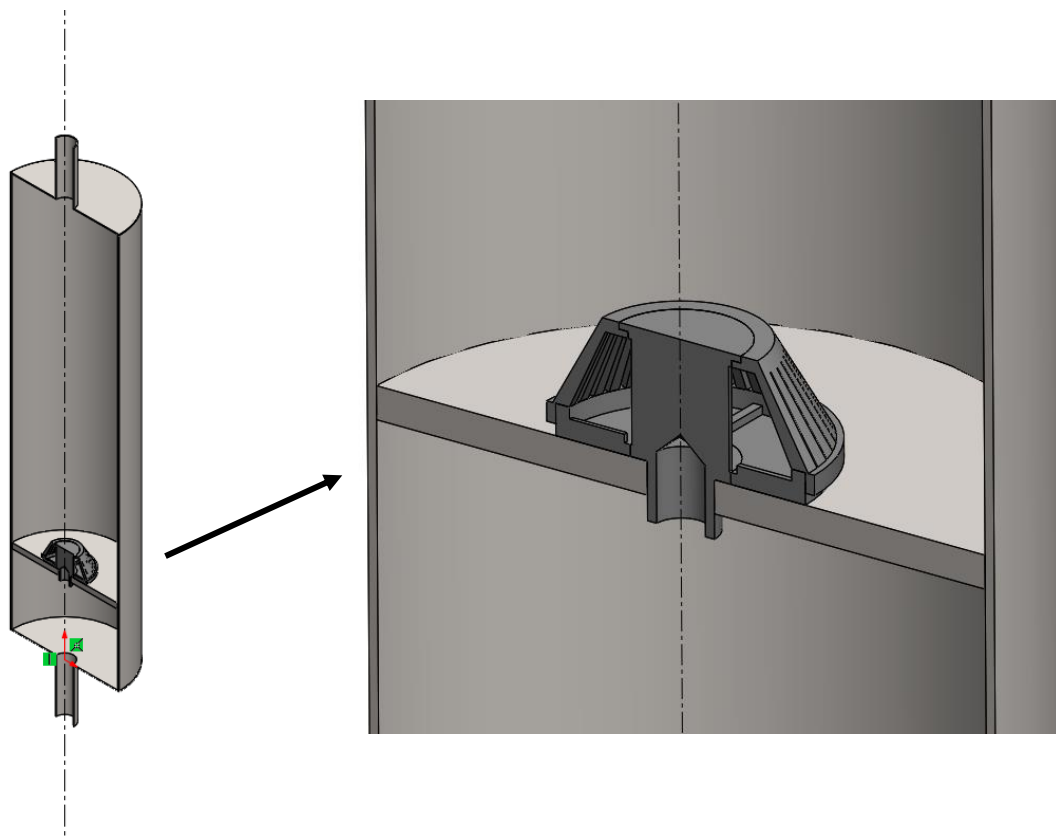


Figura 9: Vista ampliada de l'interior del filtre i la crepina



### 3 EFECTES DE LA CONFIGURACIÓ DEL MODEL

#### 3.1 Introducció

En aquest apartat del projecte s'estudien els efectes de la configuració del model en ANSYS Fluent sobre els resultats de les simulacions obtinguts. Més concretament, s'estudia el bloc *Set Up* del Fluent. Es parteix d'un cas inicial, SSI2 Ergun H317 que més endavant anomenarem E2Ckw, i es modifiquen les particularitats que permet el software. Es comparen els resultats de les diferents configuracions possibles respecte el cas experimental d'aquest mateix medi.

Tots els casos estudiats en aquest apartat número 3 del present estudi, es basen en simulacions de cabal de 0,4 l/s.

Per algunes de les diferents comparatives que s'estudien a continuació, utilitzem un codi que reflecteix els canvis d'un cas respecte l'altre. Aquest codi indica per exemple el tipus d'equació utilitzada, l'ordre de l'equació i el tipus de malla entre d'altres paràmetres.

#### 3.2 Tipus de geometria

Es simulen dos dissenys del filtre amb els codis:

E2Ckw100 → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = model SST kw turbulència, 100 = 100mm

E2Ckw300 → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = model SST kw turbulència, 300 = 300mm

L'única variació entre ambdós casos és la llargada dels conductes d'entrada i sortida del filtre (que tenen les mateixes dimensions, veure pàgina 51 dels annexos). En el cas E2Ckw100 la llargada és de 100 mm, Figura 10. En el cas E2Ckw300 la llargada és més gran, concretament 300mm, Figura 11. S'allarguen els conductes amb la intenció de crear un flux més estable tant a l'entrada com a la sortida del filtre. Els resultats d'aquestes simulacions es recullen a la Taula 13.

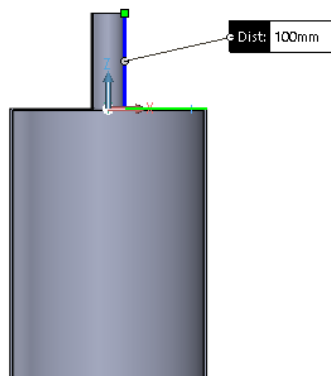


Figura 10: Conducte d'entrada de 100mm



Figura 11: Model del filtre simulat amb conductes d'entrada i sortida de 300mm

Taula 13: Resultats de les simulacions amb diferents geometries

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2Ckw100	154.872	141.325	13.547	0,051
E2Ckw300	154.968	141.325	13.643	-0,061

A la Figura 12 es representa la caiguda de pressió del filtre en els dos tipus de geometria. En el cas de la geometria allargada, observem que la caiguda total és major que en la geometria inicial i a més a més també presenta una diferència més gran en la pressió a l'entrada. Aquest increment de les pèrdues de càrrega ja era esperable perquè la longitud a simular era més llarga. Ara bé, el càlcul de la pressió a l'entrada i a la sortida en els mateixos punts que en el cas E2Ckw100 dona 154.917 Pa a l'entrada i 141.359 Pa a la sortida, amb una diferència de pressió per als mateixos punts que el E2Ckw100 de 13.558 Pa, un augment de només 0,08% respecte el cas sense haver d'allargar les entrades. Per tant, aquest allargament es considera innecessari.

Pel que fa a la desviació estàndard dels casos, ens trobem que el cas E2Ckw300 té una desviació el doble de gran que el cas E2Ckw100, 10,76 Pa en comptes de 5,37 Pa.

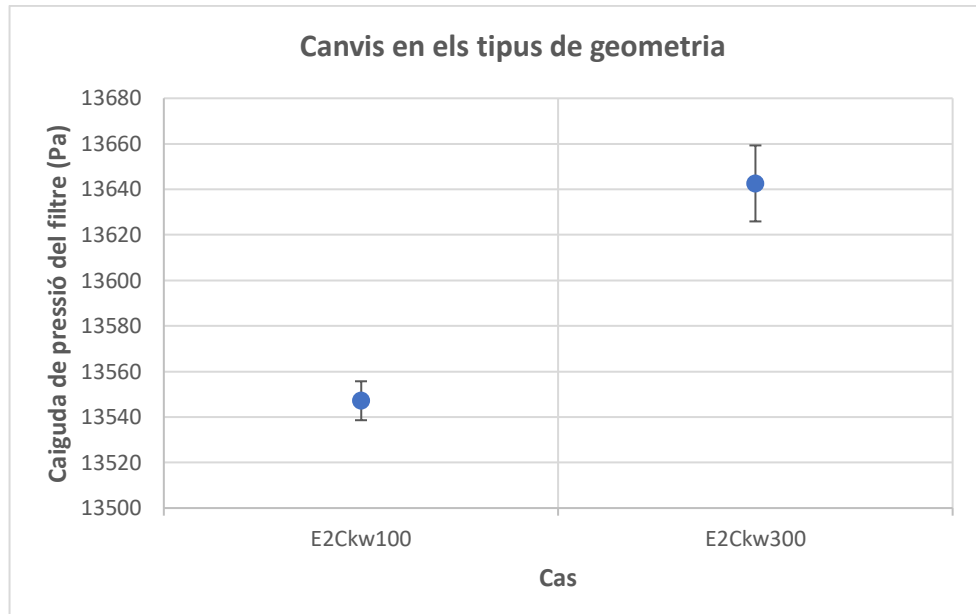


Figura 12: Caiguda de pressió amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.

Si comparem els resultats de la diferència de la caiguda de pressió de la geometria modificada respecte l'original, obtenim que el valor és un 0,7% superior.

### 3.3 Tipus de malla

La malla es genera amb L'ANSYS Mesh, que permet el mètode de mallatge avançat per capes prismàtiques (Annex B) i millorar la qualitat respecte a la malla automàtica que genera el programa.

En aquesta comparativa utilitzem el següent codi per diferenciar els tipus de malla amb els que s'ha discretitzat la geometria del filtre:

- E2T5-2 → E = Ergun, 2 = 2n oder, T = tetraedre, 5-2 = 5 capes de prismes malla 2
- E2T5 → E = Ergun, 2 = 2n oder, T = tetraedre, 5 = 5 capes de prismes
- E2T10 → E = Ergun, 2 = 2n oder, T = tetraedre, 10 = 10 capes de prismes
- E2T20 → E = Ergun, 2 = 2n oder, T = tetraedre, 20 = 20 capes de prismes
- E2P5 → E = Ergun, 2 = 2n oder, P = Poliedre, 5 = 5 capes de prismes
- E2T5-2r → E = Ergun, 2 = 2n oder, T = tetraedre, 5-2r = 5 capes prismes, malla 2 reduïda

Els principals canvis que s'han estudiat són : augmentar el nombre de capes prismàtiques (casos E2T5, E2T10 i E2T20), canviar la geometria dels elements de la malla, poliedres en

comptes de tetraedres (E2P5) i estudiar la sensibilitat de la malla amb un nombre reduït d'elements ( casos E2T5-2 i E2T5-2r). Els resultats es mostren a la següent taula:

Taula 14: Resultats de les simulacions amb diferents tipus de malles

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2T5	155.079	141.325	13.754	0,071
E2T5-2	154.872	141.325	13.547	0,051
E2T5-2r	154.894	141.325	13.569	0,042
E2T10	155.170	141.325	13.845	0,030
E2T20	154.971	141.325	13.646	-0,056
E2P5	154.712	141.325	13.387	-0,057

A la figura que hi ha a continuació (Figura 13), observem que entre els casos E2T5-2 i E2T5r només s'ha disminuït una mica la desviació estàndard dels resultats de la caiguda de pressió a l'entrada del filtre. Respecte els casos on variem les capes de prismes, el cas E2T5 és el que té una desviació estàndard més gran per a la sèrie de 150 iteracions últimes, i el cas E2T10 és el que té una caiguda de pressió en el filtre més elevada. Aquest últim és també el cas que presenta una caiguda més semblant al cas experimental. El cas E2T20 veiem que torna a allunyar-se dels resultats experimentals i per tant podem dir que no val la pena augmentar el nombre de capes prismàtiques. Per últim, el cas E2P5 és el que dona uns resultats més allunyats del cas experimental.

Tot i que el cas que té un rang de pressió a l'entrada més gran és el cas E2T5, el cas que presenta una desviació estàndard més gran és el E2T20 amb un valor de 11,47 Pa.

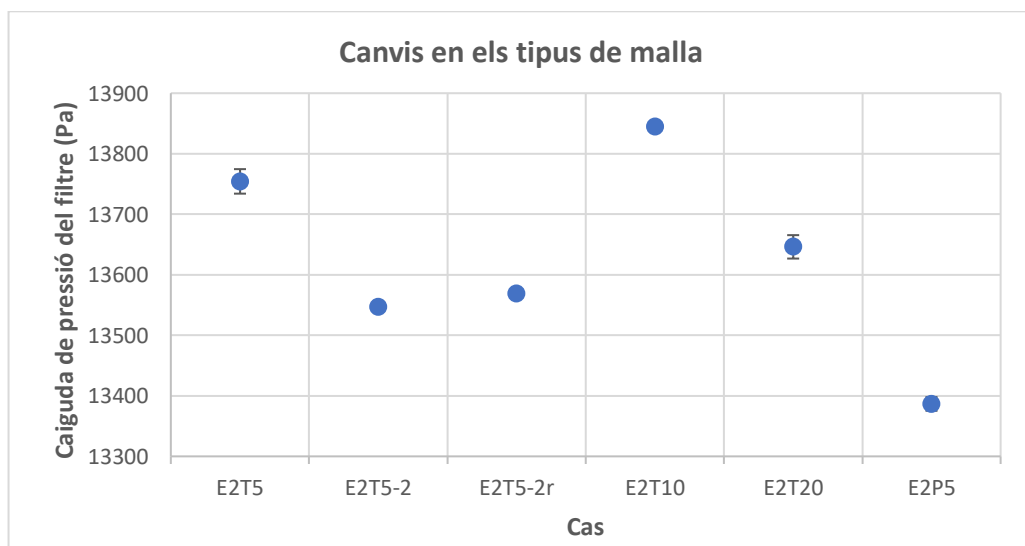


Figura 13: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.

Si estudiem la diferència de la caiguda de pressió respecte el cas de referència E2T5 (Figura 14), cal destacar els casos E2T10 i E2P5, el primer presenta un augment de 0,66% i el segon una disminució de 2,67% respecte el cas E2T5.

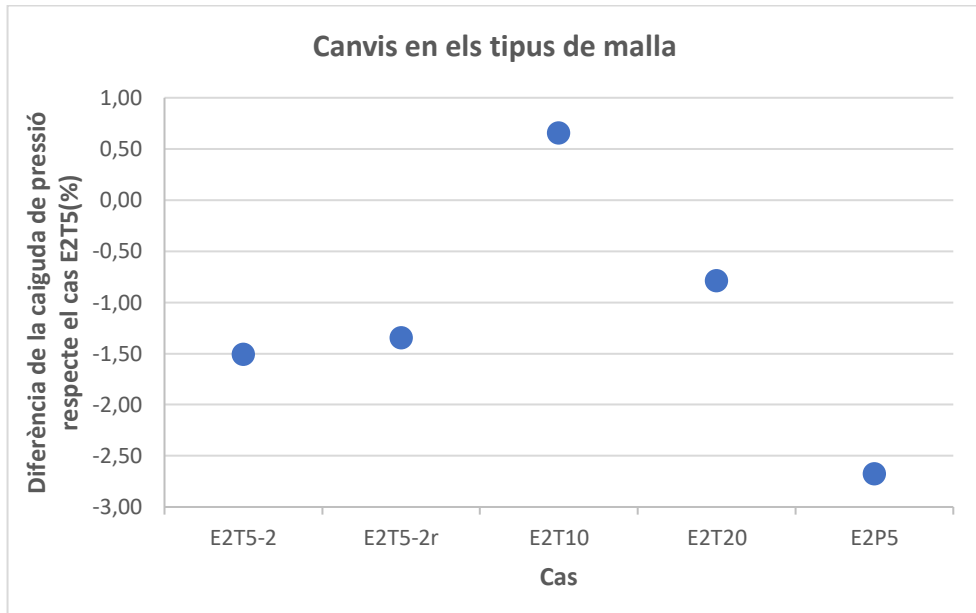


Figura 14: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2T5

### 3.4 Models de turbulència

S'estudien les 4 configuracions de turbulència més reconegudes del Fluent: SST k- $\omega$ , SST k- $\omega$  amb medi porós laminar, RSS, k-e Standard i k-e Realizable.

El codi que es fa servir per als models és el següent:

- E2Ckw → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = SST k- $\omega$  model turbulència
- E2CRSS → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, RSS = model RSS turbulència
- E2Cstd → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, std = model k-e standard de turbulència
- E2CRe → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, Re = model k-e Realizable de turbulència
- E2CkwLam → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = model SST kw, Lam = laminar medi porós

La configuració que recomana el software és la SST k- $\omega$ , és per això que prenem el cas E2Ckw de referència. A la Taula 15, es resumeixen els resultats obtinguts a les simulacions.

Taula 15: Resultats de les simulacions amb diferents models de turbulència

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2Ckw	155.079	141.325	13.754	0,071
E2CRSS	155.562	141.325	14.237	-0,007
E2Cstd	155.165	141.325	13.840	0,003
E2CRe	155.101	141.325	13.776	-0,026
E2CkwLam	155.072	141.325	13.747	0,021

A la Figura 15 observem com la caiguda de pressió del cas E2CRSS és la més gran amb diferència i sobresurt respecte els altres casos. Tot i això és el cas que dona més proper a l'experimental. La resta de casos simulats presenten millors resultats pel que fa la diferència en la caiguda de pressió a l'entrada del filtre.

El model de turbulència que menys desviació estàndard ha presentat és l'E2Cstd (desviació de 0,668 Pa) i el que més és l'E2Ckw (desviació de 9,91 Pa).

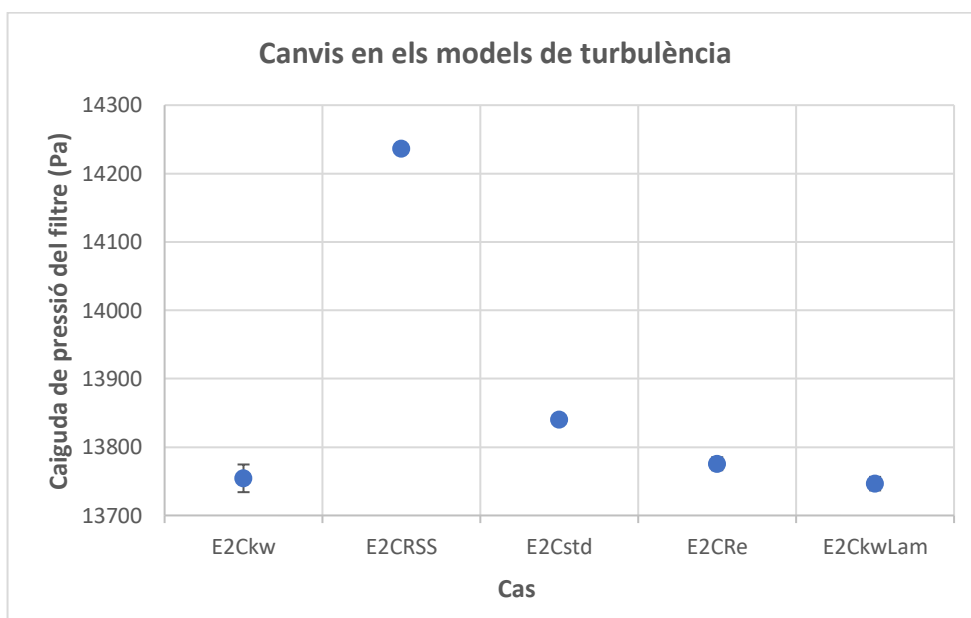


Figura 15: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de pressió a l'entrada del filtre

Si estudiem la diferència de la caiguda de pressió respecte al cas E2Ckw, el cas E2CRSS també és el més gran amb un valor de 3,5% respecte el cas de referència, Figura 16.



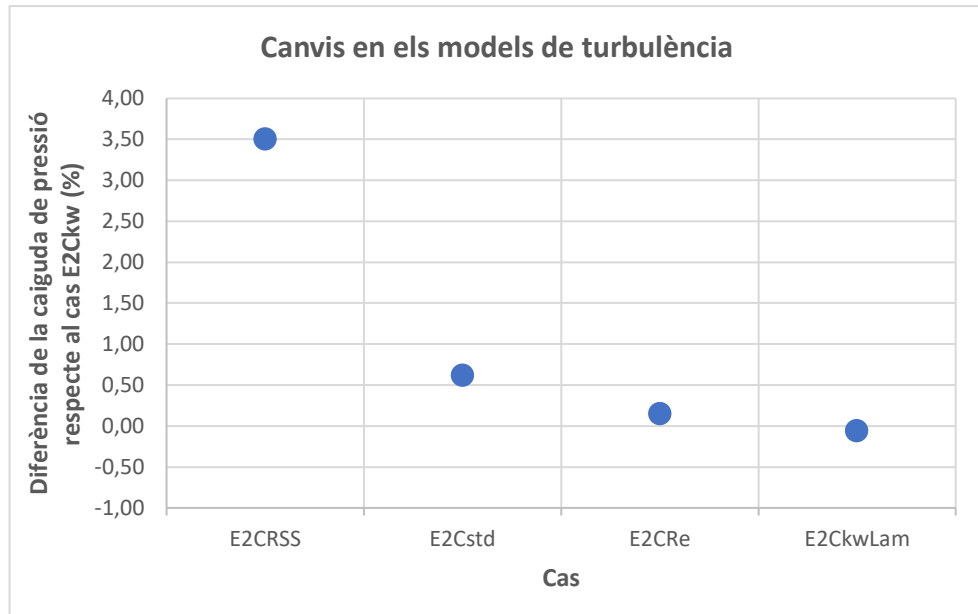


Figura 16: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw

### 3.5 Esquema numèric

Les diferents configuracions de l'esquema numèric que s'estudien en aquest projecte les anomenem amb el codi descrit a continuació:

- E2Ckw → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = model SST kw turbulència
- E2CkwN → E = Ergun, 2 = 2n oder, C = coupled, kw = model SST kw turbulència, Node based
- E2Skw → E = Ergun, 2 = 2n oder, S = segregated, kw = model SST kw turbulència
- E1Skw → E = Ergun, 1 = 1st oder, S = segregated, kw = model SST kw turbulència

Les diferències respecte el cas de referència són:

En el cas E2CkwN la resolució de les equacions es fa en base als nodes enlloc de en les cel·les. Aquest algoritme de resolució de les equacions no és el que hi ha per defecte a l'ANSYS-Fluent però si hi ha problemes de convergència és el que recomana la guia d'usuari. També tenim el cas E2Skw, en el que la diferència és que el Fluent utilitza equacions segregades (*segregated*) en lloc d'acoblades (*coupled*) per solucionar les pressions i velocitats. La diferència del cas E1Skw respecte el de referència és que el Fluent utilitza una solució de 1r ordre per a la discretització dels gradients a les cel·les de la malla en comptes del més precís de 2n ordre (ANSYS Fluent User's Guide, 2020). Els resultats de les esmentades simulacions es mostren a la següent taula:

Taula 16: Resultats de les simulacions amb diferents configuracions de l'esquema numèric

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2Ckw	155.079	141.325	13.754	0,071
E2CkwN	155.011	141.325	13.686	-0,005
E2Skw	155.061	141.325	13.736	-0,002
E1Skw	155.346	141.325	14.021	-0,001

La següent figura representa la caiguda de pressió total del filtre. Comprovem que el cas E1Skw és el que s'allunya més de la resta i té una pèrdua total més gran, per sobre de 14.000 Pa. Pel que fa als casos E2CkwN i E2Skw, disminueixen tant la caiguda de pressió total al filtre com la diferència de pressió a l'entrada del filtre lleugerament respecte el cas de referència.

El cas E1Skw és també el cas amb millor desviació estàndard i té un valor molt reduït en comparació als altres casos, 0,93 Pa per davant dels 7, 8 i 9 Pa que presenten la resta de casos en la mostra de les últimes 150 iteracions.

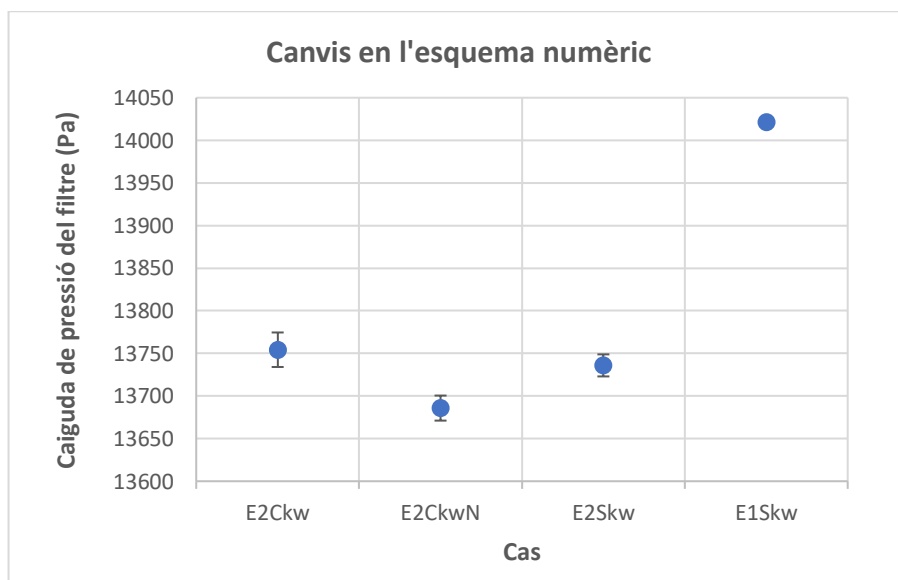


Figura 17: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.

A la Figura 18 es veu com el cas E1Skw és el cas que presenta una major diferència de la caiguda de pressió respecte al cas de referència, gairebé un 2%.

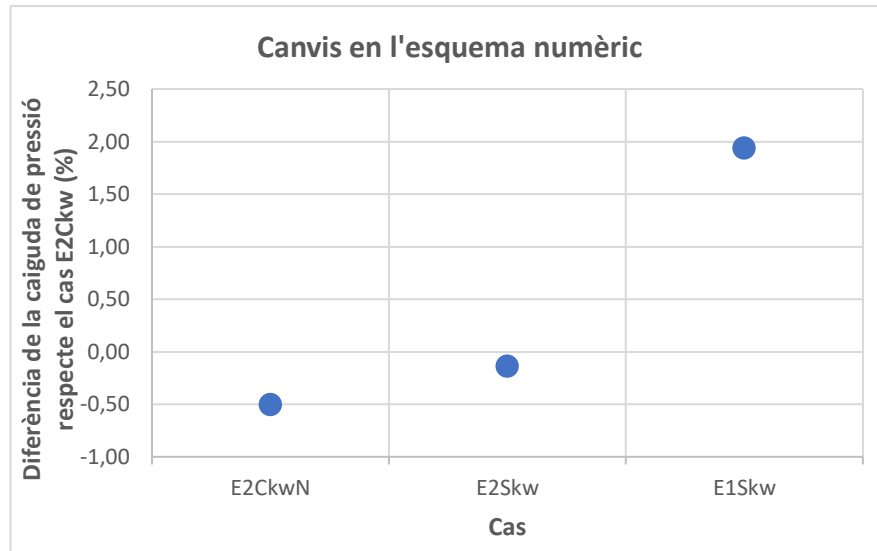


Figura 18: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw

### 3.6 Condicions inicials i de contorn

Les diferents configuracions de les condicions inicials i de contorn s'anomenen amb el codi descrit a continuació:

- E2Ckw → E = Ergun, 2 = 2n order, C = coupled
- E2CCI → E = Ergun, 2 = 2n order, C = coupled, CI = 0Prel i 3 m/s
- E2CR → E = Ergun, 2 = 2n order, C = coupled, R = rugositat (PVC = 0.0015 mm; r\_steel = 0.1 mm)
- E2Ctur → E = Ergun, 2 = 2n order, C = coupled, tur = intensitat turbulència 10%
- E2Cinv → E = Ergun, 2 = 2n order, C = coupled, inv = inlet pressió, outlet massflow

S'han estudiat diferents situacions pel que fa a les condicions inicials, Taula 17. Es pretén estudiar fins a quin punt les condicions inicials influiran en els resultats ja que sabem que no haurien de tindre repercussió si el nostre model està ben definit. En altres paraules, els resultats del model haurien de ser independents de les condicions inicials.

En el cas E2CCI s'ha optat per definir, a l'inici, una pressió relativa de 0 Pa, és a dir, pressió atmosfèrica i una velocitat de 3 m/s per a tots els elements en l'interior del filtre. En el cas E2CR es modifiquen les rugositats de les parets dels filtres amb uns valors de 0,0015mm PVC per a la crepina i 0,1mm per a les parets del filtre (acer). En tots els altres casos, la rugositat no s'ha tingut en compte. També s'estudia la influència de la intensitat de turbulència, cas E2Ctur, en el que es dobla la intensitat recomanada pel Fluent (des d'un 5% fins a un 10% les entrades i sortides del filtre). Per últim, el cas E2Cinv proposa un canvi en les dades fixades al model: en comptes de fixar la velocitat a l'entrada i la pressió a la sortida, es fa el contrari, es fixa la pressió a l'entrada i la velocitat a la sortida del filtre.

Taula 17: Resultats de les simulacions amb diferents condicions inicials i de contorn

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2Ckw	155.079	141.325	13.754	0,071
E2CCI	155.087	141.325	13.762	-0,022
E2CR	155.068	141.325	13.743	-0,036
E2Ctur	155.033	141.325	13.708	0,028
E2Cinv	159.876	146.134	13.742	0,004

Si observem la Figura 19, comprovem que els diferents canvis descrits anteriorment no han variat gaire els resultats excepte el casos E2Ctur i E2Cinv. El primer sí que ha disminuït la caiguda de pressió en el filtre i el segon no presenta una diferència de pressió a l'entrada del filtre ja que precisament és el cas en el que s'ha fixat aquesta pressió. En tot cas s'hauria d'estudiar apart l'error de pressió a la sortida del filtre pel cas E2Cinv.

De la mateixa manera que podem observar els casos que tenen un rang de pressió aproximat, també es compleix amb la desviació estàndard.

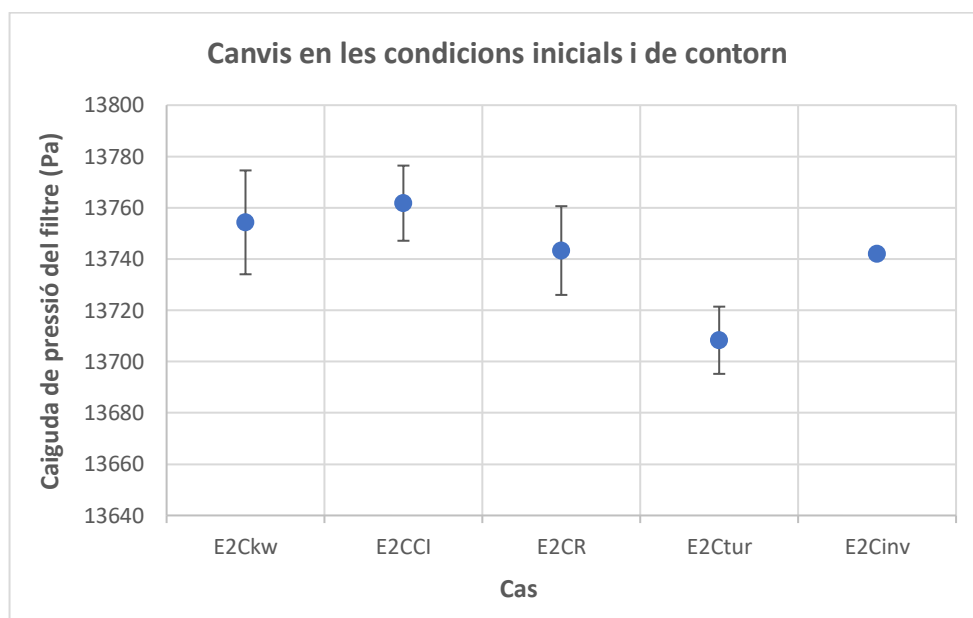


Figura 19: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.

Pel que fa a la diferència de la caiguda de pressió respecte el cas de referència (Figura 20) observem que els casos es mantenen pràcticament iguals que el E2Ckw i només el cas E2Ctur disminueix la diferència en un 0,33%.

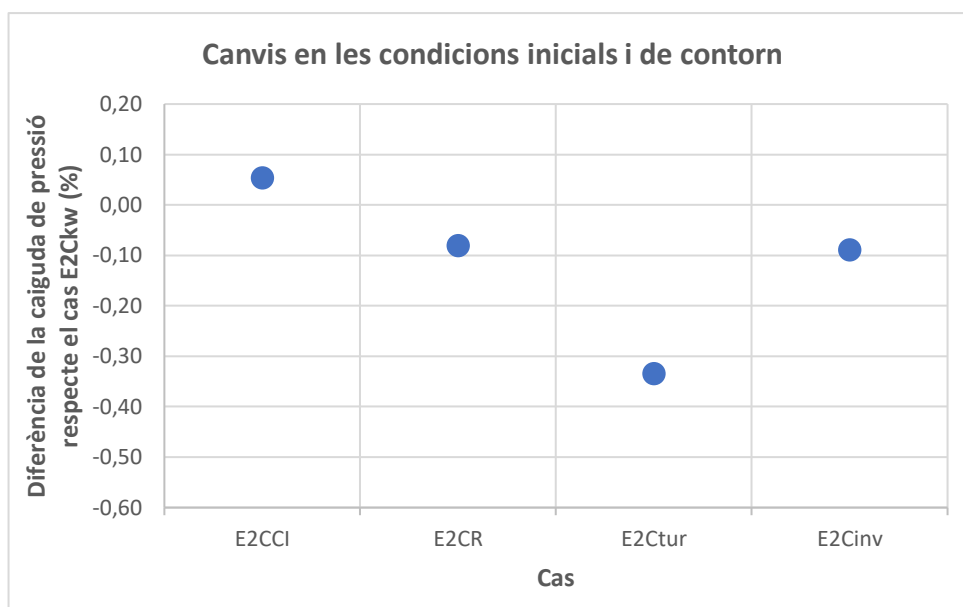


Figura 20: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas E2Ckw

### 3.7 Estat estacionari o transitori

S'estudia un cas transitori ja que és interessant en el cas que la solució del flux real presenti oscil·lacions. En el cas del filtre simulat en aquest estudi, el difusor que hi ha a l'entrada podria ser un causant de les esmentades oscil·lacions que dificultarien l'obtenció d'un estat estacionari ben definit.

Els resultats de les simulacions es mostren a taula següent:

Taula 18: Resultats de les simulacions del casos estacionari i transitori

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental	156.047	141.852	14.195	
E2Ckw	155.079	141.325	13.754	0,071
E2CkwTRANS	155.108	141.325	13.783	0,000

A la figura que tenim a continuació, observem que el cas E2CkwTRANS ha augmentat lleugerament la caiguda de pressió del filtre respecte el cas de referència, però ha fet desaparèixer pràcticament la variació de la pressió a l'entrada del filtre entre iteracions ( de 40,5 a 2,7 Pa). Això implica també que la desviació estàndard s'hagi vist molt reduïda: de 9,91 Pa pel cas estacionari a 0,84 Pa pel cas transitori.

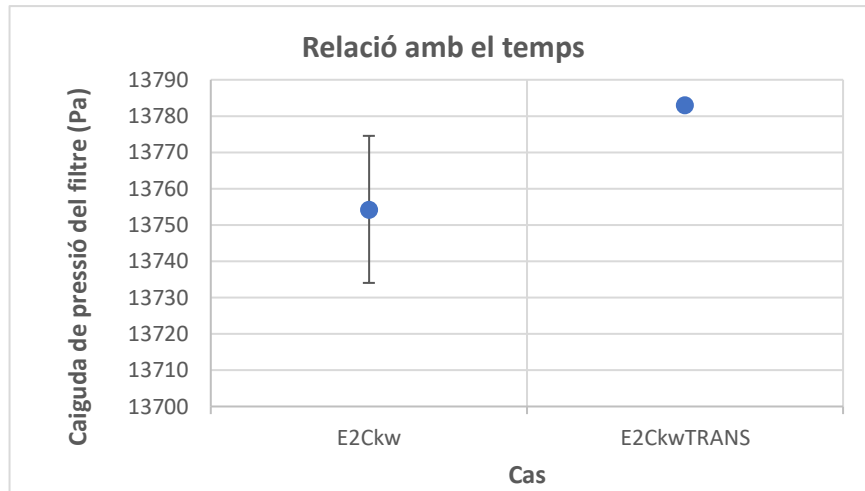


Figura 21: Caiguda de pressió del filtre amb barres d'error indicant el rang de les últimes 150 iteracions.

Quan comparem la diferència en la caiguda de pressió a l'entrada del filtre observem que en el cas transitori aquesta diferència augmenta en un 0,21% respecte el cas estacionari.

## 4 RESULTATS PER A DIFERENTS MEDIS

### 4.1 Introducció

En aquest apartat del projecte s'estudien els resultats obtinguts en les simulacions per a diferents medis filtrants, amb diferents equacions i també a diferents cabals. Els paràmetres obtinguts dels resultats experimentals (apartat 2.3) són els que es configuren a l'ANSYS Fluent per simular els diferents medis filtrants.

Com ja s'ha fet anteriorment, també utilitzarem un codi per anomenar i diferenciar els casos. Ens serveix d'exemple el cas SSI-2-E, on el primer terme fa referència al medi (Taula 1), el segon terme a l'interval de la mida del gra (Taula 2) i l'últim terme és la lletra inicial de l'equació utilitzada (en aquest cas E = Ergun ).

Tots els casos estudiats en aquest apartat es corresponen a una altura de 317 mm de medi filtrant.

### 4.2 Sorra SSI2

A la Taula 19 es mostren els resultats del model simulat amb sorra SSI2. La simulació que presenta resultats més propers al cas experimental és la SSI2D per un cabal de 0,4L/s i la SSI2E per un cabal de 0,8 L/s.

Taula 19: Resultat de les simulacions del cas SSI2 amb diferents equacions i cabals

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental 0,4 L/s	156.047	141.852	14.195	
SSI2E4	155.079	141.325	13.754	0,071
SSI2D4	155.605	141.325	14.280	-0,068
SSI2KC4	153.111	141.325	11.786	-0,007
SSI2P4	147.718	141.325	6.393	-0,056
Experimental 0,8 L/s	291.204	250.401	40.803	
SSI2E8	284.493	241.325	43.168	-0,033
SSI2D8	287.692	241.325	46.367	-0,037
SSI2KC8	274.460	241.325	33.135	-0,006
SSI2P8	264.130	241.325	22.805	-0,002

La Figura 22 mostra, a més de les dades simulades, els resultats experimentals per a diferents cabals. Veiem com els casos per a un cabal de 0,4 L/s s'apropen molt als valors experimentals, a excepció del cas SSI2P que està notablement allunyat amb un valor d'una caiguda de pressió pràcticament la meitat que la resta de casos. Si observem els resultats per a cabals superiors, notem com les simulacions de Kozeny-Carman i Potencial es diferencien

molt dels resultats a esperar i no els consideràriem adequats per calcular un model amb aquest medi.

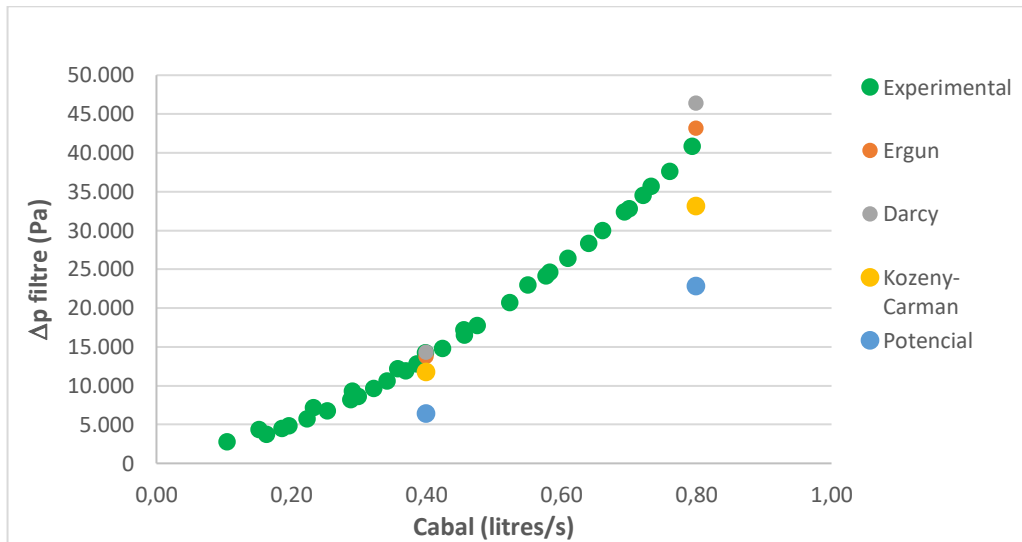


Figura 22: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas SSI2

Si estudiem la diferència de la caiguda de pressió mostrada en la Figura 23, podem observar com el cas SSIP és el més desfavorable respecte el cas experimental (diferència de 44% en el cabal de 0,8L/s i 56% en cabal de 0,4L/s). Per contra, la utilització de l'equació d'Ergun dona un error inferior al 9%

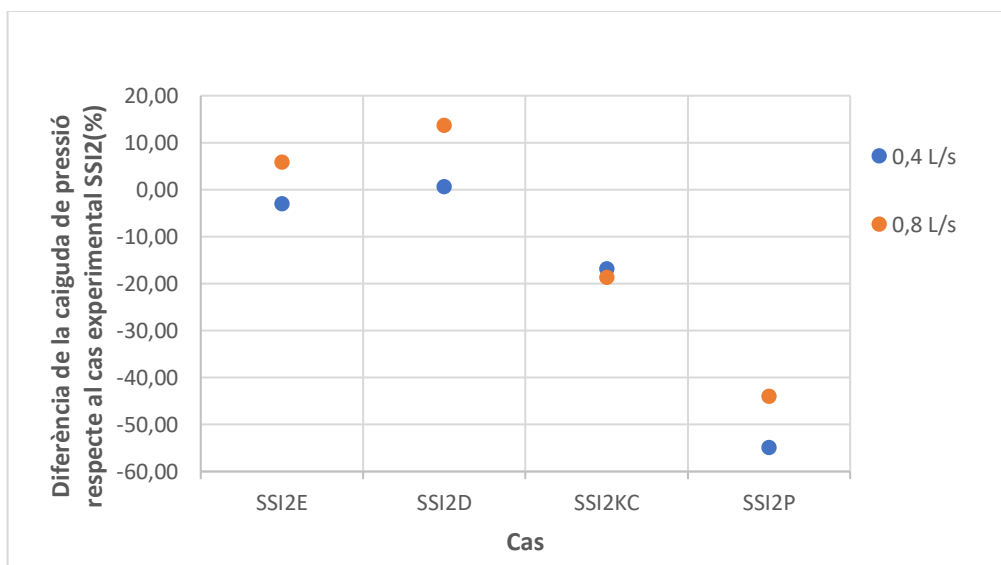


Figura 23: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental SSI2



### 4.3 Sorra SSI3

Quan estudiem el mateix medi SSI amb una mida de gra de sorra més petita, veiem que els resultats també varien respecte l'apartat anterior (Taula 20). En aquest cas és el mètode d'Ergun el que assoleix uns valors més propers a l'experiment tant per a un cabal de 0,4 L/s com per a un de 0,8 L/s.

Taula 20: Resultat de les simulacions del cas SSI3 amb diferents equacions i cabals

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental 0,4 L/s	166.086	150.124	15.962	
SSI3E4	165.942	150.000	15.942	0,000
SSI3D4	166.699	150.000	16.699	0,100
SSI3KC4	164.146	150.000	14.146	0,010
SSI3P4	156.822	150.000	6.822	0,043
Experimental 0,8 L/s	359.749	309.651	50.098	
SSI3E8	198.082	150.000	48.082	0,021
SSI3D8	203.279	150.000	53.279	0,059
SSI3KC8	187.893	150.000	37.893	0,002
SSI3P8	173.817	150.000	23.817	0,043

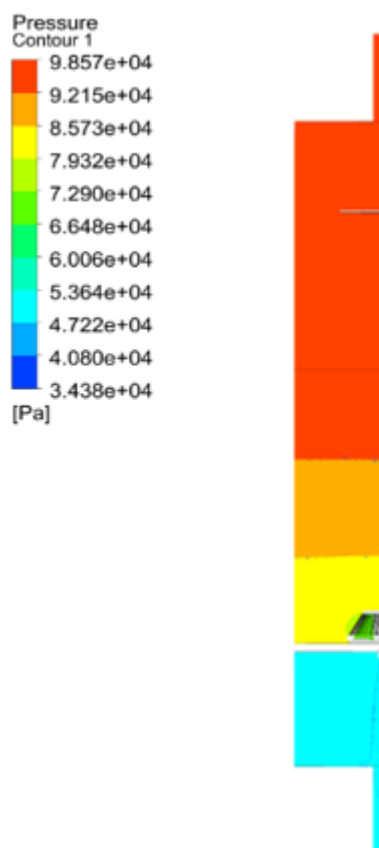


Figura 24: Caiguda de pressió al llarg del filtre per al cas SSIE8 simulada amb el Fluent

La Figura 25 mostra que com ja hem vist anteriorment, les simulacions amb la llei potencial s'allunyen notablement dels resultats experimentals. Els resultats obtinguts a partir d'aquesta formulació mostren uns valors de pèrdua de pressió molt inferiors respecte als altres casos. També el cas SSI3KC queda força diferenciat de la resta quan l'estudiem per un cabal de 0,8 L/s.

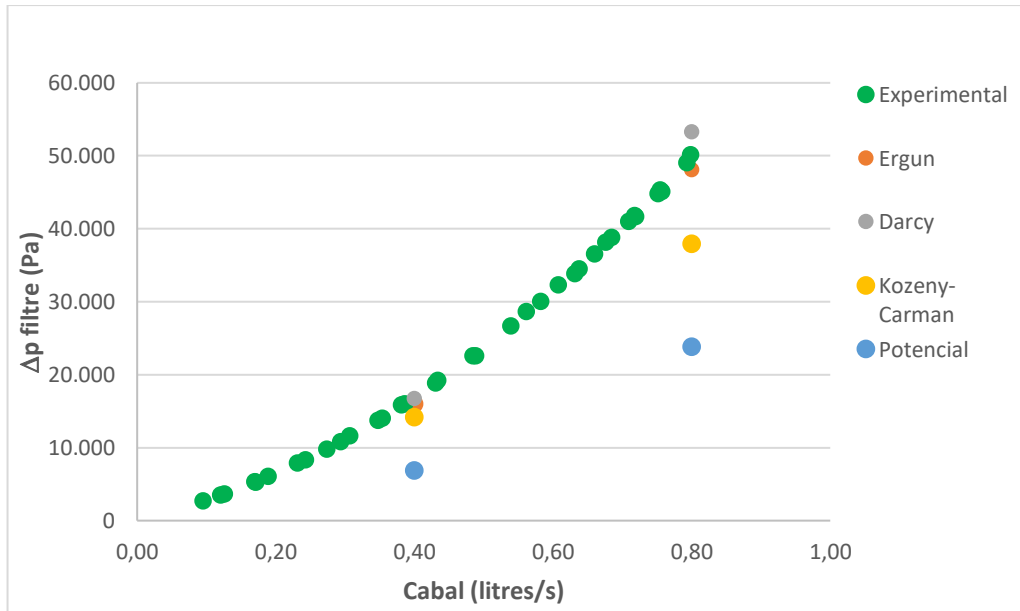


Figura 25: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas SSI3

Pel que fa a la diferència de la caiguda de pressió respecte al cas experimental SSI3 (Figura 26), només els casos SSI3E i SSI3D ofereixen uns valors acceptables per a qualsevol cabal. El cas SSI3P torna a ser el cas més desfavorable ja que té una diferència de més d'un 50% respecte al cas de referència.

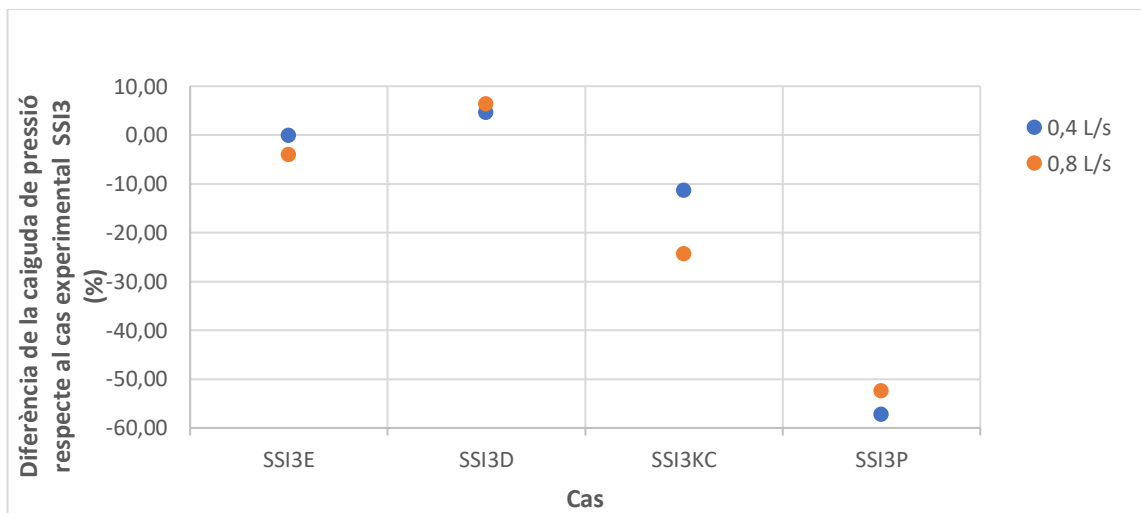


Figura 26: Diferència de la caiguda de pressió respecte al cas experimental SSI3

#### 4.4 Vidre reciclat VEI3

En aquest cas ens trobem que el model de Kozeny-Carman és el que té els resultats més semblants al cas experimental quan estudiem un cabal proper a 0,4 L/s. I el mateix passa amb el model d'Ergun quan parlem de cabals superiors. Tot i això, el comportament de Kozeny-Carman en funció del cabal no sembla reproduir la tendència de les dades experimentals. Per contra, el model amb l'equació d'Ergun sí que manté el mateix comportament. A la Taula 21 tenim el resum dels resultats de les simulacions:

Taula 21: Resultat de les simulacions del cas VEI3 amb diferents equacions i cabals

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental 0,4 L/s	169.779	153.370	16.410	
VEI3E4	168.380	150.000	18.380	0,028
VEI3D4	169.131	150.000	19.131	0,000
VEI3KC4	166.803	150.000	16.803	-0,015
VEI3P4	157.178	150.000	7.178	0,004
Experimental 0,8 L/s	374.347	321.642	52.705	
VEI3E8	203.308	150.000	53.308	-0,020
VEI3D8	210.707	150.000	60.707	-0,008
VEI3KC8	193.214	150.000	43.214	-0,007
VEI3P8	174.574	150.000	24.574	0,008

Referent a la Figura 27, quan estudiem un cabal de 0,4 L/s ens trobem que l'únic cas que no s'apropa als resultats de referència és el model potencial. A mesura que augmenta el cabal, les solucions de les simulacions es van allunyant i només el cas d'Ergun es manté sobre els valors experimentals.

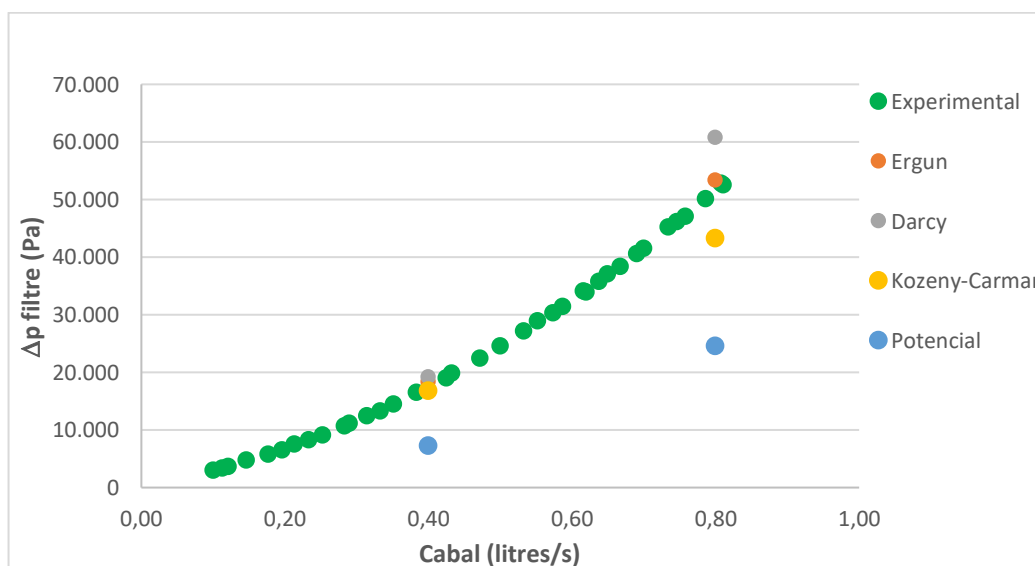


Figura 27: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas VEI3

Gràcies a la següent figura podem comprovar el que hem dit anteriorment, els casos VEI3E (per un cabal de 0,4 L/s) i el VEI3KC (per un cabal de 0,8 L/s) presenten molt poca diferència respecte les dades experimentals, 1,14 i 2,4% respectivament. Cal destacar també, que els casos simulats segons el model de llei potencial tenen una diferència de la caiguda de pressió molt elevada, com ja hem vist en els altres medis.

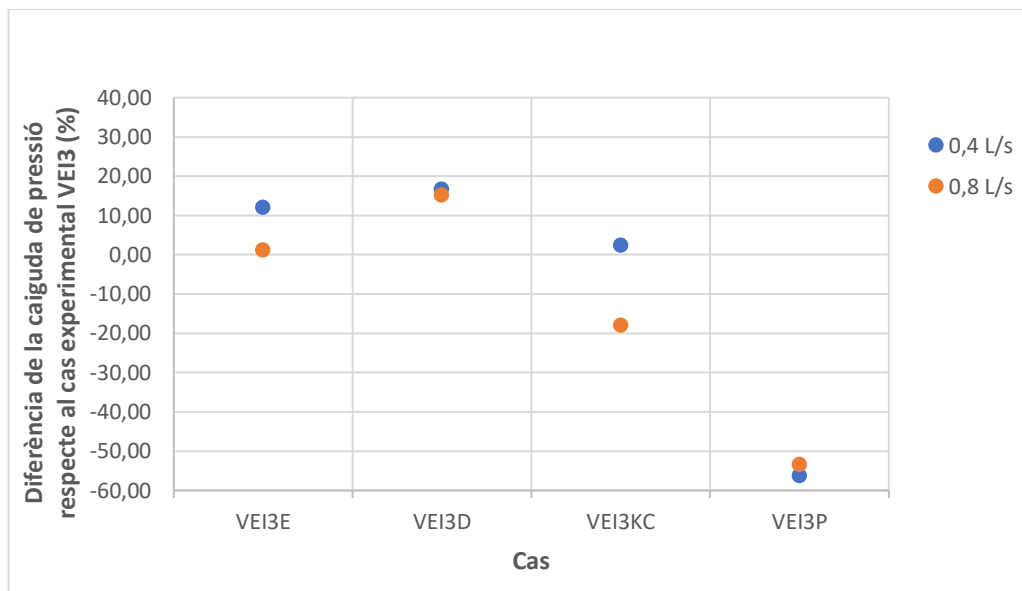


Figura 28: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental VEI3

#### 4.5 Vidre tractat AFM3

A la taula mostrada a continuació (Taula 22), podem identificar el cas AFM3E4 com el més precís dels que s'han simulat, obtingut per a un cabal de 0,4 L/s ja que la seva caiguda de pressió és de 19.876 Pa i la caiguda de pressió del respectiu cas experimental és de 19.923 Pa. Això representa una diferència de només un 0,2% (Figura 30).

Taula 22: Resultat de les simulacions del cas AFM3 amb diferents equacions i cabals

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental 0,4 L/s	172.617	152.694	19.923	
AFM3E4	169.876	150.000	19.876	0,003
AFM3D4	171.386	150.000	21.386	0,071
AFM3KC4	168.955	150.000	18.955	-0,038
AFM3P4	157.636	150.000	7.636	0,023
Experimental 0,8 L/s	341.974	286.421	55.553	
AFM3E8	205.837	150.000	55.837	-0,028
AFM3D8	214.571	150.000	64.571	0,011
AFM3KC8	197.508	150.000	47.508	-0,032
AFM3P8	175.361	150.000	25.361	0,031

Per a aquest medi, els models simulats amb les equacions de Darcy, Ergun i Kozeny-Carman presenten una caiguda de pressió semblant al cas experimental quan parlem d'un cabal de 0,4 L/s (Figura 29). En aquesta situació, el model potencial queda molt allunyat de les dades experimentals ( caiguda de 7.636 Pa respecte els 19.923 Pa reals que es van enregistrar a l'experiment).

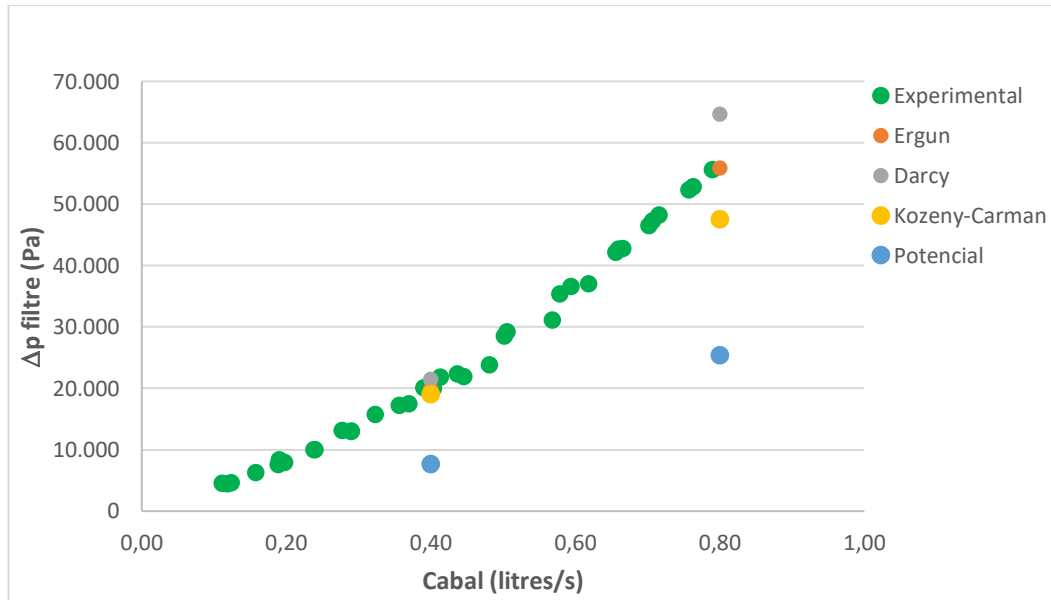


Figura 29: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas AFM3

Com ja s'ha dit en aquest apartat, la Figura 30 ens indica que el mètode més proper al cas experimental és el que utilitza el model d'Ergun. Els models de Darcy i Kozeny-Carman, presenten una diferència respecte els valors experimentals d'entre un 5 i 7,5% per a cabals de 0,4 L/s. Per a cabals superiors, aquesta diferència augmenta encara més, fins a un 15% aproximadament en els dos casos. Per últim tenim el model potencial que com ja hem vist en altres situacions, respon amb uns valor massa allunyats del cas real, i sempre inferior.

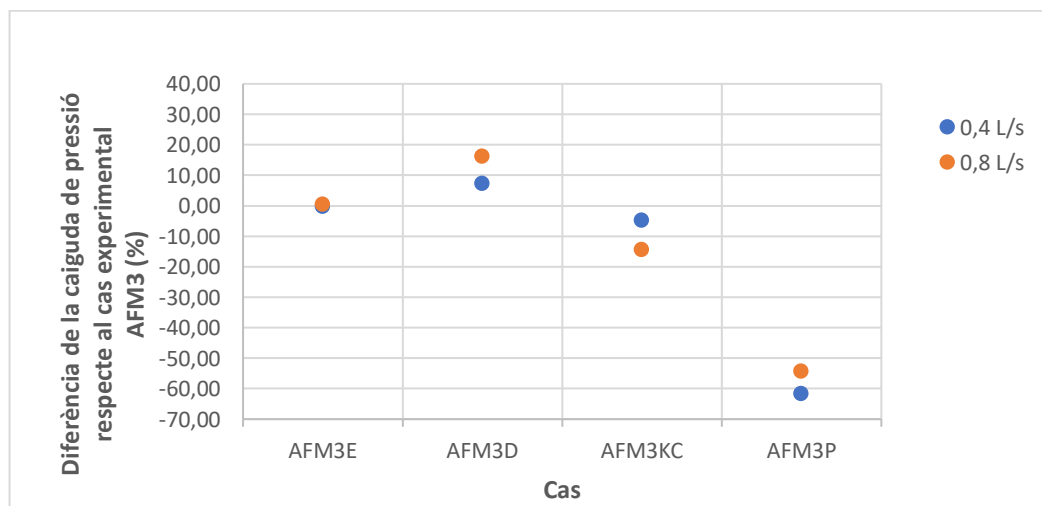


Figura 30: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental AFM3

#### 4.6 Microesferes ESF3

A la Taula 23 es presenten els resultats de les simulacions del medi amb microesferes. Observem que tant per a un cabal de 0,4 com per el de 0,8 L/s el model que més s'aproxima a les dades experimentals és, ara, el mètode de Kozeny-Carman.

Taula 23: Resultat de les simulacions del cas ESF3 amb diferents equacions i cabals

Cas	Pressió in (Pa)	Pressió out (Pa)	p in - p out (Pa)	Qin - Qout (%)
Experimental 0,4 L/s	145.921	128.466	17.455	
ESF3E4	170.933	150.000	20.933	-0,019
ESF3D4	171.681	150.000	21.681	-0,037
ESF3KC4	168.462	150.000	18.462	-0,022
ESF3P4	157.910	150.000	7.910	-0,024
Experimental 0,8 L/s	254.346	203.212	51.134	
ESF3E8	210.665	150.000	60.665	0,004
ESF3D8	210.971	150.000	60.971	-0,008
ESF3KC8	196.562	150.000	46.562	-0,005
ESF3P8	175.852	150.000	25.852	0,027

Per un cabal de 0,4 L/s, els models presenten uns valors aproximats als experimentals (Figura 31), exceptuant el model potencial. Quan augmenta el cabal el cas del model de Kozeny-Carman és el que proporciona una caiguda de pressió més propera al cas experimental, tot i que està allunyada uns 5.000 Pa per sota del cas real.

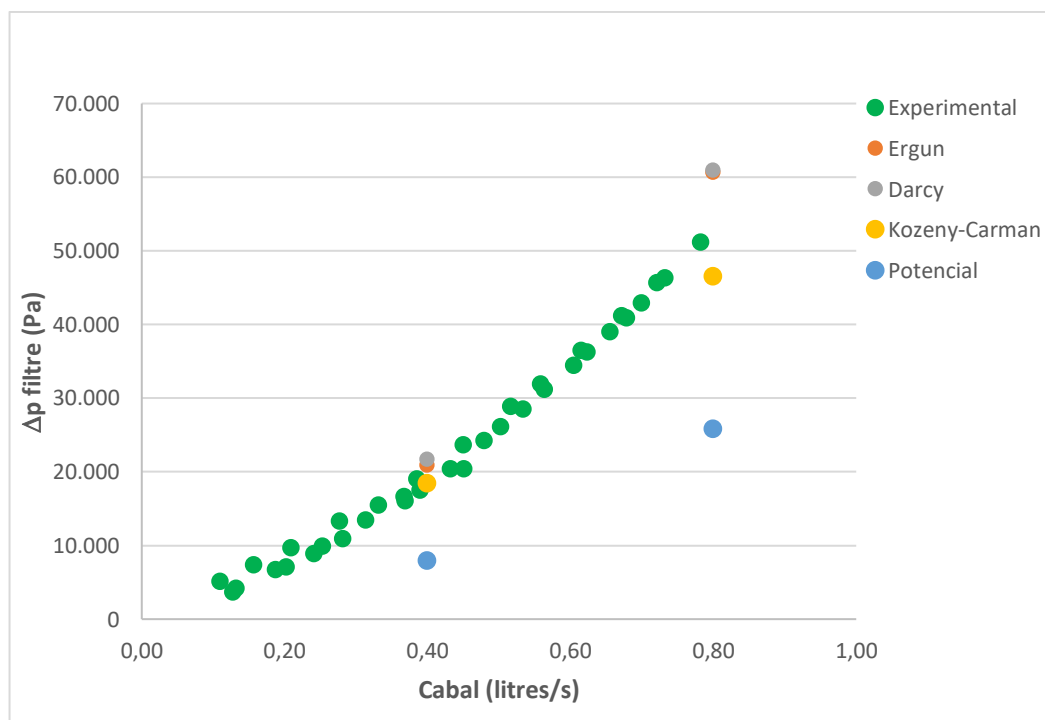


Figura 31: Caiguda de pressió en el filtre calculada amb els 4 mètodes per al cas ESF3

A la Figura 32 es mostra la diferència de la caiguda de pressió respecte el cas real, i podem comprovar que el cas ESF3KC és el que menys diferència té. Presenta valors per sota del 10% en els casos per ambdós cabals. Com s'ha vist en totes les figures comentades anteriorment, per al medi de microesferes el model de la llei potencial també és el més desfavorable.

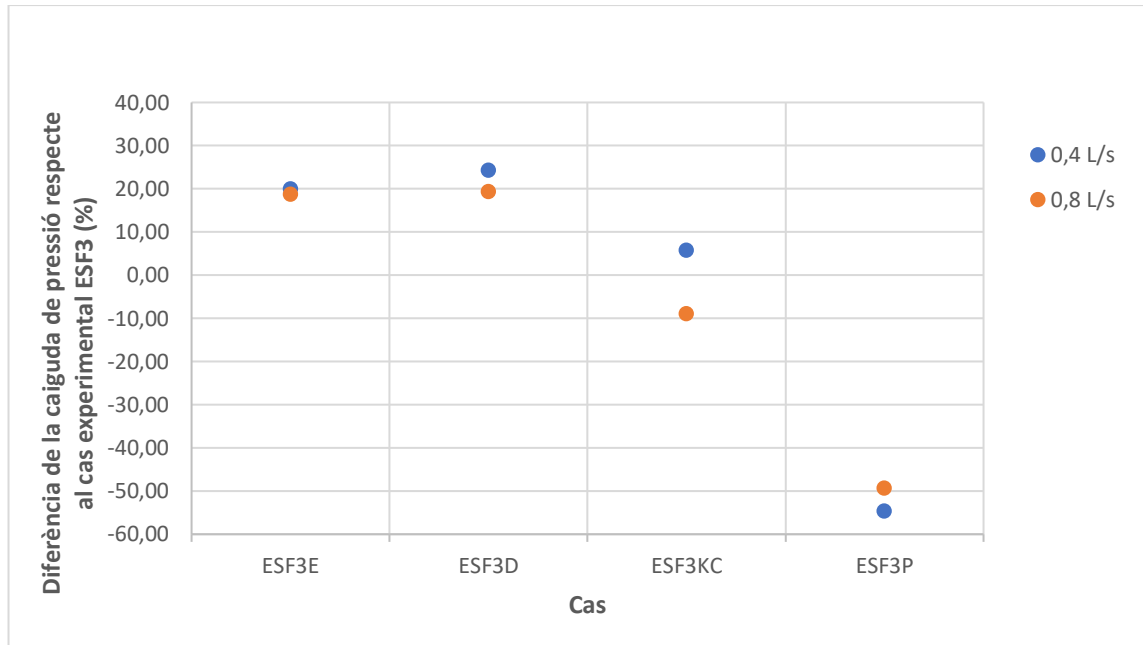


Figura 32: Diferència de la caiguda de pressió respecte el cas experimental ESF3

#### 4.7 Discussió

En aquest apartat de l'estudi, analitzem els resultats des d'un altre punt de vista per tal de decidir quins mètodes són millors. Amb les figures que es mostren a continuació comparem la diferència de la caiguda de pressió de les simulacions dels 5 tipus de medi filtrant respecte les dades experimentals corresponents per a cadascun d'aquests casos i per als dos cabals que es tracten en aquestes simulacions.

La Figura 33 mostra els resultats del mètode d'Ergun. Exceptuant el medi de les esferes, els altres medis responen bé i ofereixen poca diferència en la caiguda de pressió respecte els casos experimentals (la majoria de casos amb diferència inferior al 10%). En concret el medi SSI i l'AFM són els dos medis que més s'aproximen als resultats dels casos reals.

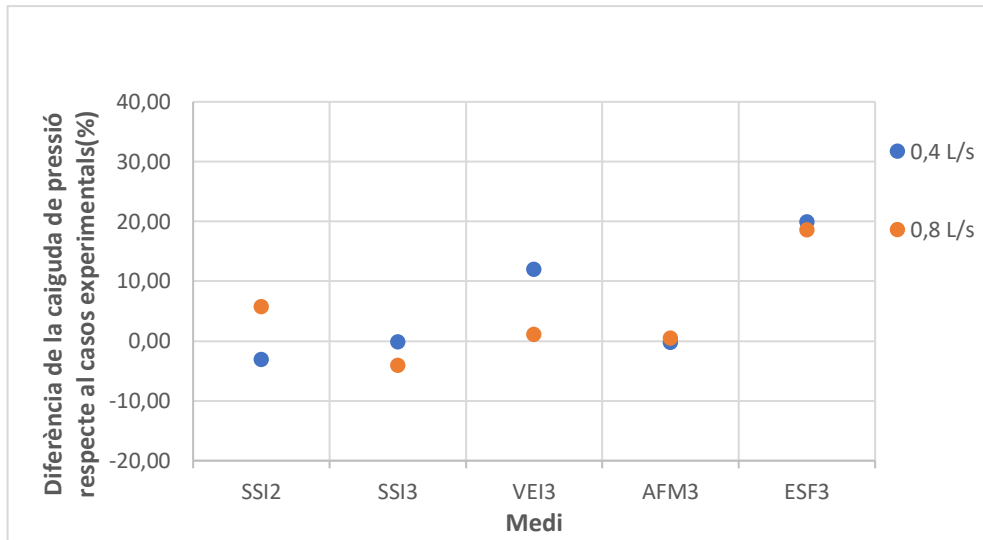


Figura 33: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode d'Ergun

La Figura 34 compara els resultats obtinguts pels diferents medis fent ús del mètode de Darcy. En aquest cas no obtenim tant bons resultats com pel mètode d'Ergun. Només hi ha una configuració, el cas SSI2 amb un cabal de 0,8 L/s, que pren uns valors de diferència de la caiguda de pressió fidels al cas experimental. La resta de medis presenten resultats de l'ordre de 10,15,20 i fins gairebé 25% d'augment en la diferència de la caiguda de pressió en comparació amb els valors experimentals. En tots els casos, l'utilització de l'equació de Darcy sobreestima la pèrdua de càrrega realment observada.

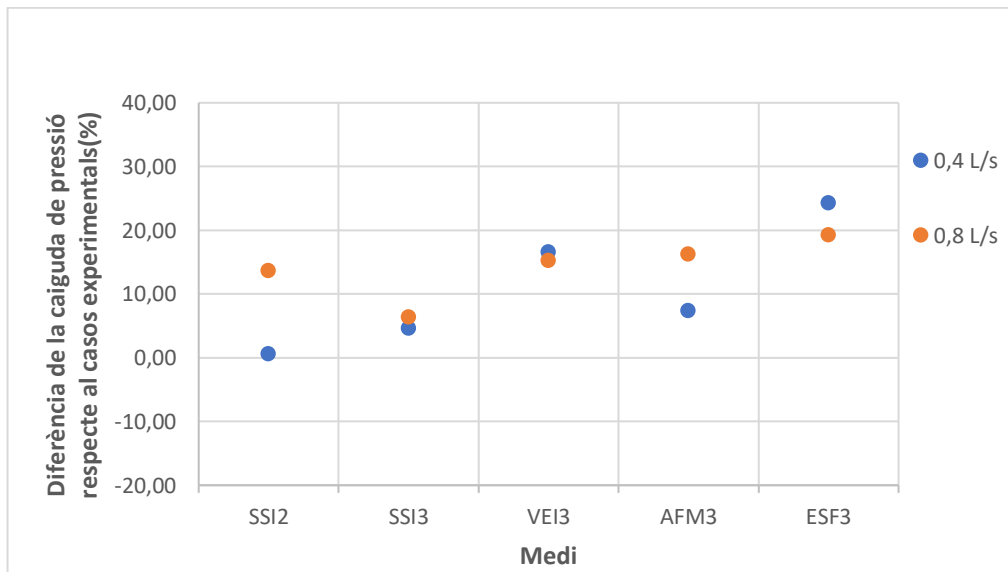


Figura 34: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de Darcy

A la Figura 35 estan representats els resultats corresponents al mètode de Kozeny-Carman. La diferència de la caiguda de pressió és negativa per a totes les configuracions dels



diferents medis excepte pels medis VEI i ESF amb cabals de 0,4 L/s. Això ens indica que aquest mètode tendeix a donar uns resultats per sota dels reals.

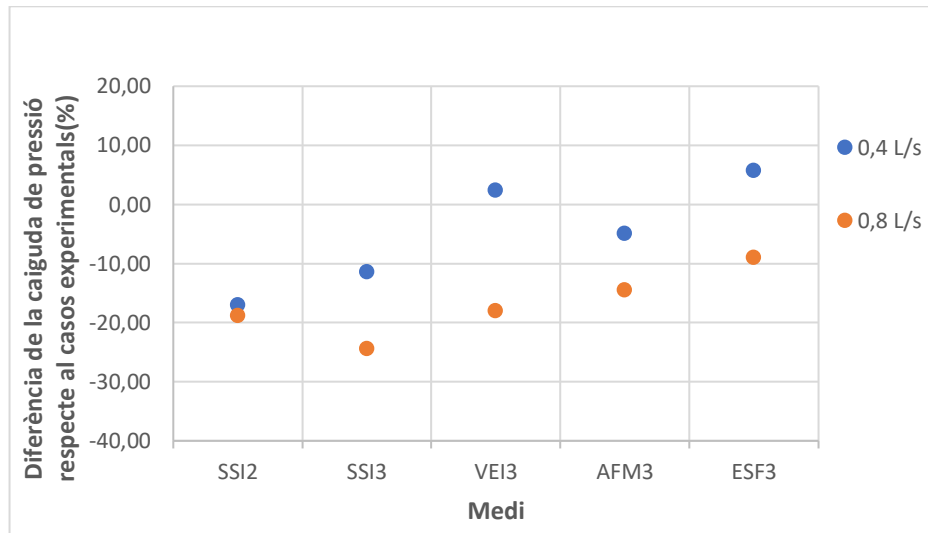


Figura 35: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de Koceny-Carman

La gràfica que es mostra a continuació (Figura 36) compara la diferència de la caiguda de pressió per a cada medi respecte els casos experimentals quan es simulen amb el mètode de la llei potencial. Si observem els resultats podem comprovar que el mètode de la llei potencial subestima els valors reals independentment del medi que s'estudiï, essent clarament el pitjor de les quatre metodologies estudiades.

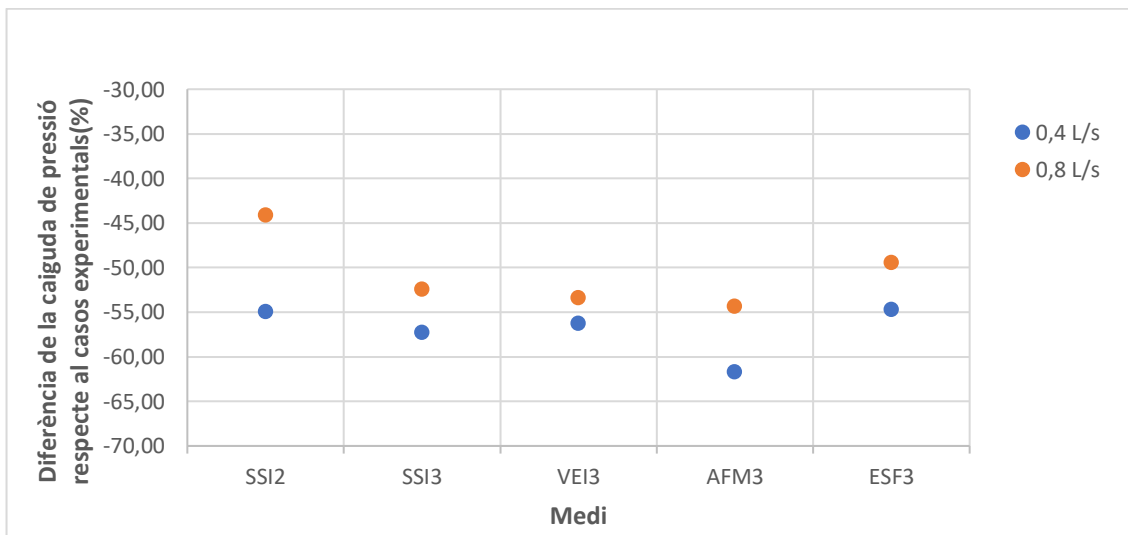


Figura 36: Diferència de la caiguda de pressió de cada medi respecte el seu cas experimental segons el mètode de la llei potencial



## **5 RESUM DEL PRESSUPOST**

El resum del pressupost del present projecte tenint en compte les despeses associades a la recerca i el desenvolupament, els costos d'amortització i els costos de redactat incloent l'impost de valor afegit I.V.A. és de vuit mil cent quaranta-sis euros amb quaranta-cinc cèntims d'euro.....8.146,45€



## **6 CONCLUSIONS**

Després d'haver estudiat diferents modificacions del model de simulació, podem concloure amb algunes observacions que cal destacar.

La modificació de la geometria del filtre allargant els conductes d'entrada i sortida ha resultat tenir molt poca influència en els resultats. Després d'haver triplicat aquesta mida, els resultats de la diferència de la caiguda de pressió només han augmentat un 0,7%. Per tant, no cal allargar la geometria per fer aquests estudis.

Pel que fa les diferents configuracions de la malla, s'ha comprovat que augmentar el nombre de capes prismàtiques fins a 10, millorava els resultats i obteníem una caiguda de pressió en el filtre més propera al cas experimental. Però si seguim augmentant el nombre de capes arriba un punt en el que els resultats no milloren i per tant és innecessari fer el canvi. També s'ha vist que el model que tenia una malla reduïda a menys de la meitat d'elements que la resta, no donava uns resultats tan distanciat i demostra que reajustar la mida de la malla podria ser un bon recurs per estalviar temps de càlcul. Altres modificacions com per exemple canviar els elements amb forma de tetraedre de la malla per poliedres no han resultat efectives.

Dels models de turbulència estudiats, tot i que el Fluent recomana utilitzar el model SST k- $\omega$  destaquem el model de turbulència tipus RSS perquè és el cas que ha presentat una caiguda de pressió en el filtre més propera a la de les dades experimentals. Malauradament, aquest model necessita molt temps de càlcul.

S'han estudiat també un seguit de condicions inicials i de contorn, les quals no han provocat una gran variació en els resultats respecte el nostre cas de referència. Modificacions com per exemple augmentar la intensitat de la turbulència o modificar les rugositats de les parets del filtre, han demostrat no tindre pràcticament influència en els resultats obtinguts. Això ens indica la bona definició del nostre model.

Per últim, s'ha estudiat l'efecte de fer la simulació en estat estacionari o en estat transitori. Com bé ja s'ha comentat durant aquest estudi, estudiar un cas transitori podria ser d'interès quan ens trobem un cas on la solució del flux real presenti oscil·lacions. Analitzant els resultats hem comprovat que els valors de la caiguda de pressió en el filtre per al cas transitori són més propers a les dades experimentals, i també que es veu molt reduïda la desviació estàndard de les dades.

Fent un estudi dels resultats des d'un altre punt de vista, hem analitzat els diferents mètodes que s'utilitzen per avaluar les pèrdues de càrrega en cadascun dels 5 medis porosos tractats en aquest estudi.

Amb les dades obtingudes, hem arribat a la conclusió que el model que millors resultats presenta en la majoria de configuracions és el model d'Ergun. Aquest és el que es recomana per estudiar el comportament de filtres de sorra mitjançant ANSYS-Fluent.

Seguidament aniria el model de Darcy, tot i que per a cabals alts, aquest model ha tendit a sobreestimar les dades reals i ha presentat una caiguda de pressió per sobre de l'experimental.

En tercer lloc d'aquesta classificació hi tenim el model de Kozeny-Carman. Aquest model ha ofert resultats encara més distorsionats que els obtinguts amb el mètode de Darcy. A diferència de l'anterior, quan s'augmentava el cabal donava uns resultats amb valors inferiors als esperats.

Per últim i per tant com a model més desfavorable tenim el model de la llei potencial. Aquest mètode subestima els valors reals ja que tots els resultats obtinguts han estat clarament per sota dels resultats experimentals. La diferència de la caiguda de pressió en alguns medis ha estat fins i tot superior al -60%, és a dir que el model ha simulat uns resultats molt inferiors als que realment s'havien obtingut en el cas experimental.

## **7 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El present Projecte consta dels següents Documents:

Document 1. Memòria i annexos.

Annex A. Geometria del model

Annex B. Discretització del domini

Annex C. Configuració del model

Annex D. Cost d'elaboració del projecte





## **8 BIBLIOGRAFIA**

ANSYS Inc. 2020. *ANSYS Fluent User's Guide*. Canonsburg, PA. January 2020

BOVÉ, J., ARBAT, G., DURAN-ROS, M., PUJOL, T., VELAYOS, J., RAMÍREZ DE CARTAGENA, F., and PUIG-BARGUÉS, J. Pressure Drop across Sand and Recycled Glass Media Used in Micro Irrigation Filters. *Biosystems Engineering* 137: p.55–63. 2015 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.009>.

MOLLERA, À. Caracterización física e hidráulica de materiales utilizados en filtros de matriz granular. Proyecto/ Trabajo fin de carrera. Grado en Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias. Universidad Católica de Ávila. Junio 2015.



## ANNEX A: GEOMETRIA DEL MODEL

La geometria del filtre modelat s'ha dissenyat amb el SolidWorks, un programari CAD per modelatge 2D i 3D.

A continuació es mostren explicacions i exemples de com s'ha arribat al disseny final del filtre que es simula en aquest estudi. Algunes figures mostren vistes en secció dels elements per a facilitar-ne la comprensió. El procediment per dibuixar-lo és el següent:

Dividir el filtre en dos elements: el cos (o carcassa del filtre) i la crepina. Dibuixar totes les peces que conformen cada element per separat i després crear els assemblatges.

### Generació de sòlids en 3D – extrusió, forats

En primer lloc es dibuixa un croquis amb les mesures que dimensionaran la peça. A l'exemple mostrat a la Figura 37 podem observar com el cos del filtre es basa en una circumferència de 206 mm de diàmetre.

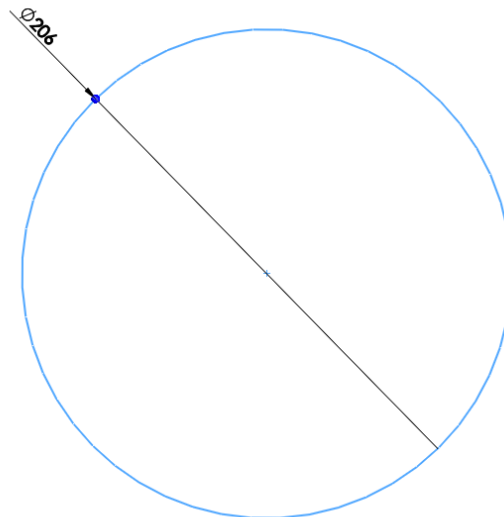


Figura 37: Croquis del perímetre del filtre

Tot seguit es generen els cossos en 3D fent ús de les operacions *extruir* (Figura 38) i *corte* (Figura 39), aquestes operacions permeten donar valors de llargada, profunditat, gruix de paret, etc. En els exemples podem veure com s'obté el cos del filtre (Figura 40).

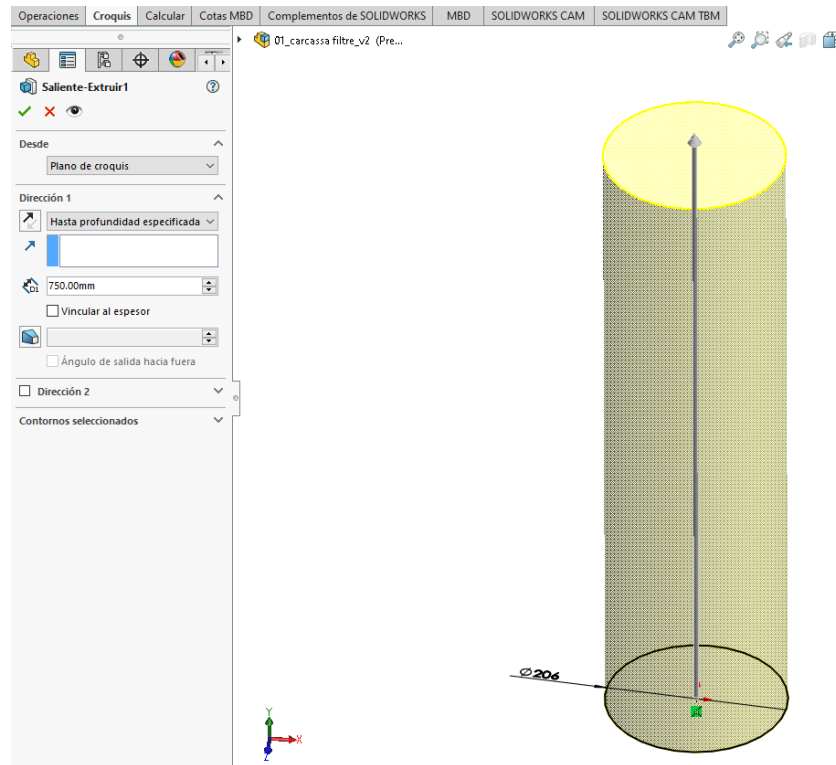


Figura 38: Exemple d'operació *extruir* per genera el cilindre massís del filtre

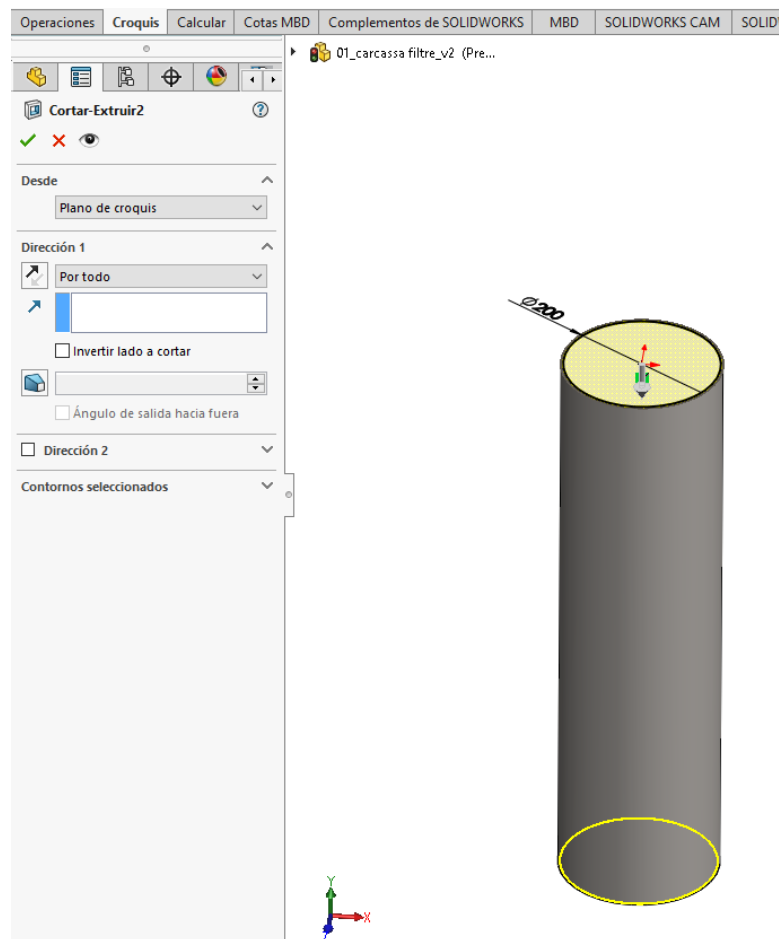


Figura 39: Exemple de l'operació *cortar* per buidar el cilindre i obtenir un tub



Figura 40: Cos del filtre

### Assemblatge i relacions de posició

Un cop obtingudes la resta de peces amb un procediment semblant al que hem descrit anteriorment, es conforma un assemblatge de la carcassa. Aquest conjunt es genera gràcies a les relacions de posició que atribuïm a les diferents peces, Figura 41. Les relacions més utilitzades en el SolidWorks són les de concentricitat, paral·lelisme, coincidència i distància entre d'altres.

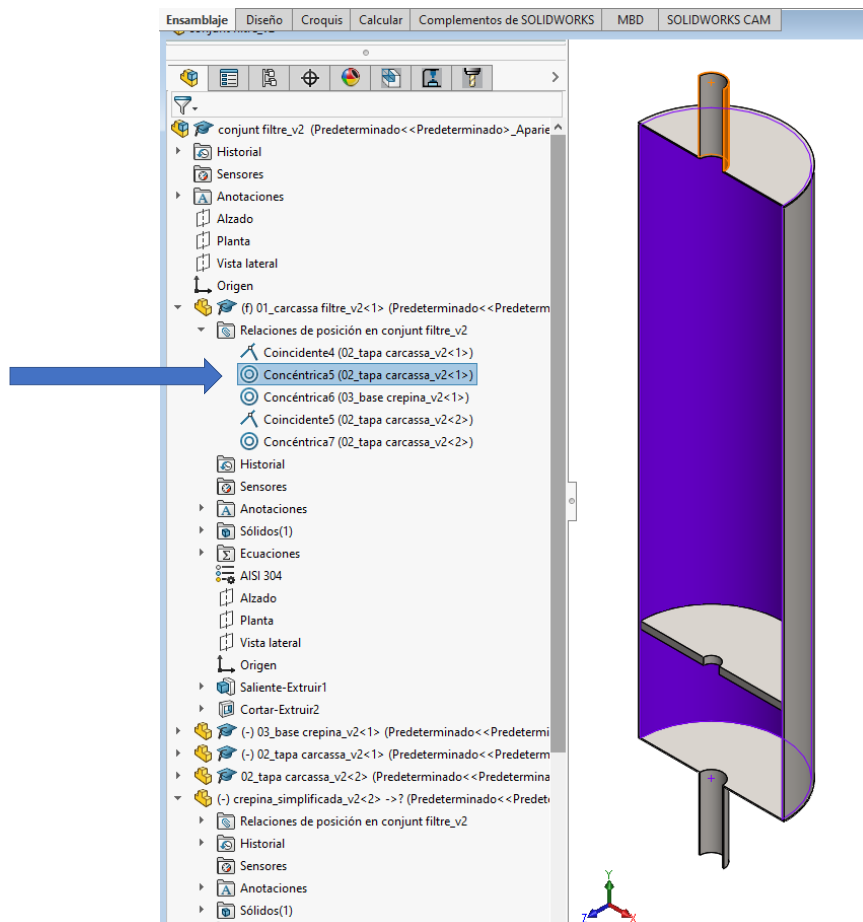


Figura 41: Imatge de SolidWorks on es mostra la relació de posició entre la carcassa del filtre (de color blau) i la tapa superior (de color taronja).

Un cop relacionades totes les peces del cos del filtre obtenim el següent conjunt:



Figura 42: Geometria de la carcassa del filtre

Per dibuixar la crepina repetim el procediment descrit anteriorment: creem els croquis de les peces, generem els sòlids 3D amb les operacions d'extrusió i tall i assemblem els cossos per formar una única peça.

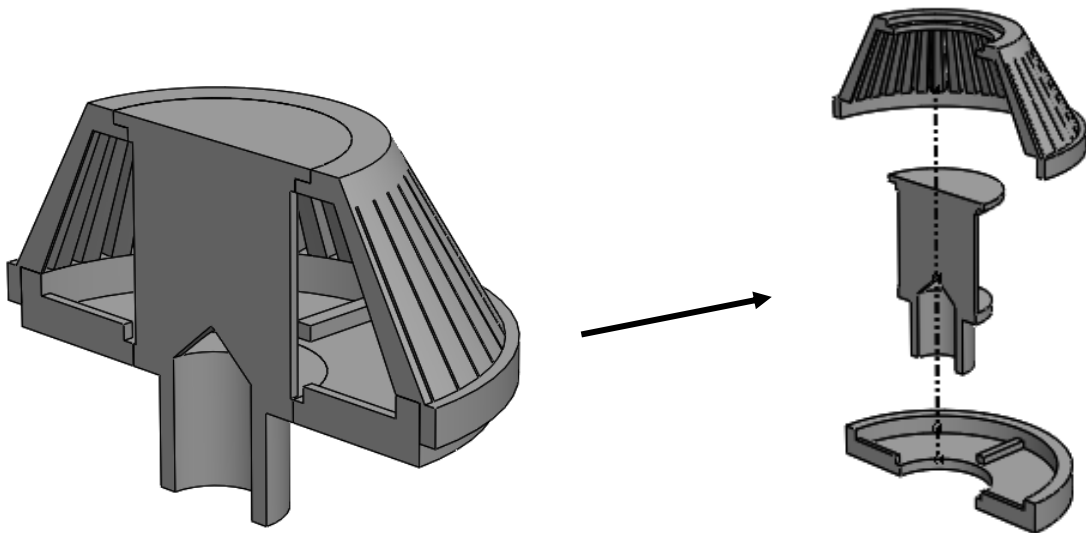


Figura 43: Secció de la crepina explosionada.

A la següent figura es mostren les mides més interessants de la crepina:

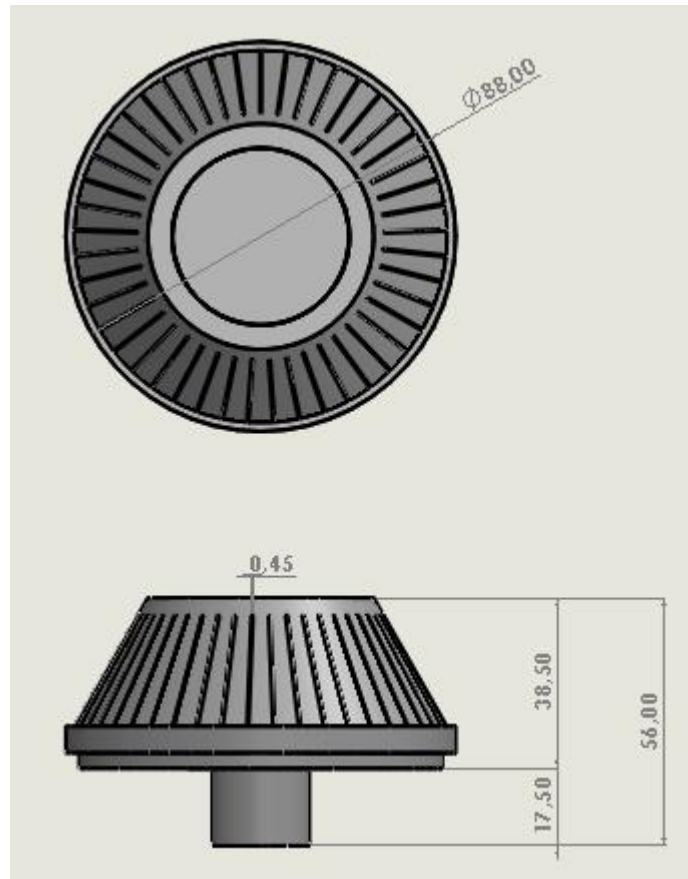


Figura 44: Cotes de la crepina (mm).





## ANNEX B: DISCRETITZACIÓ DEL DOMINI

Un cop importada la geometria a l'ANSYS, utilitzem l'eina del Mesh (Figura 45) per a definir les superfícies i regions del filtre. També en aquest punt es defineixen els *Body of influence* que són els cossos als que apliquem un mallat més dens a diferència del mallat automàtic que generarà el Mesh (Figura 46). Això és degut a que no totes les parts del filtre requeriran una malla de la mateixa qualitat.

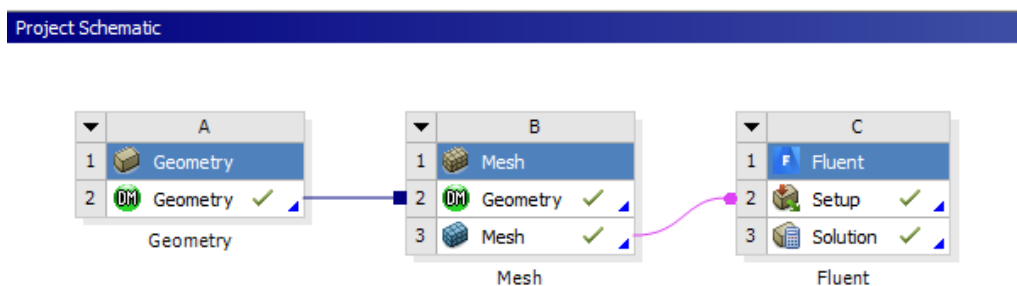


Figura 45: Disposició del Project Schematic on veiem els diferents mòduls de treball de l'ANSYS.

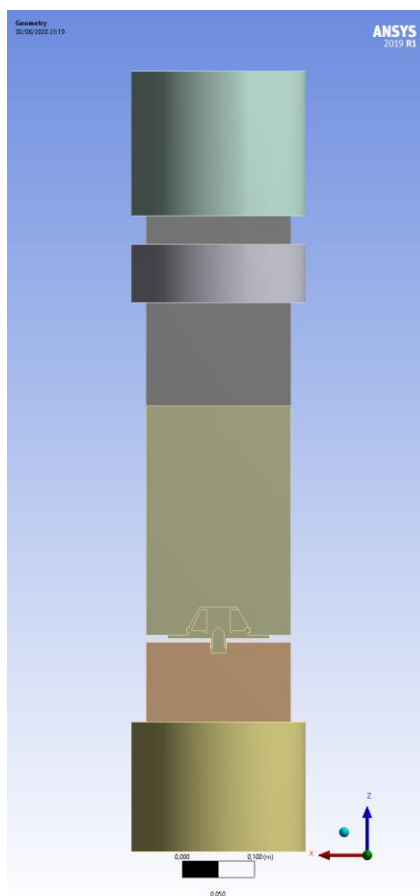


Figura 46: Definició de les regions del filtre a l'entorn Mesh.

Tot seguit es configura el mallat automàtic que afecta a la totalitat de la geometria i també es defineixen els *Face/Body Sizing* que són les superfícies i regions on apliquem un mallat amb

mides personalitzades per aconseguir una qualitat de malla superior. També en aquest punt es defineixen els inflats de les parets del filtre. El mètode d'inflació consisteix en aplicar capes successives d'elements prismàtics triangulars que parteixen dels triangles utilitzats en el mallat de les parets i així poder tractar millor l'efecte de la capa límit (Figura 47).

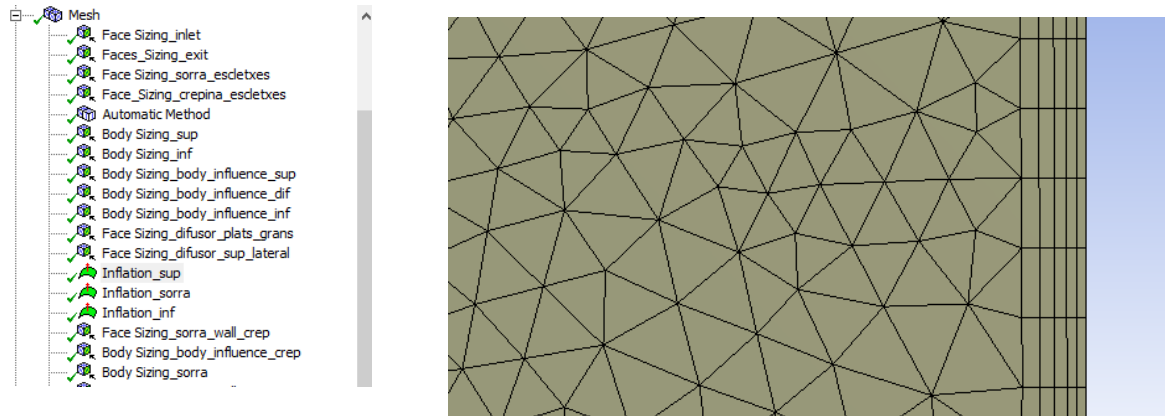


Figura 47: Llista de superfícies de la malla i exemple d'una inflació a la paret del filtre

A continuació es presenten la informació de les 3 malles que s'han configurat en aquest estudi (E2T5-2, E2T5, E2T5-2r).

A la Taula 24 es mostren les mides màximes dels elements (triangles) a les superfícies escollides per a cada malla:

Taula 24: Mides màximes dels elements a les superfícies (*Face size function*)

Superfície	Mides E2T5-2 (mm)	Mides E2T5 (mm)	Mides E2T5-2r (mm)
Crepina enttub	0,20	0,00	0,30
Crepina sobrebase	0,40	0,40	0,60
Crepina tapa	0,40	0,40	0,60
Crepina triangular	0,20	0,20	0,30
Crepina tub	0,20	0,00	0,30
Crepina wall entrada	0,30	0,30	0,45
Crepina escltxes	0,10	0,10	0,15
Difusor plats grans	2,00	2,00	3,00
Difusor sup lateral	2,00	2,00	3,00
Inlet	2,00	2,00	3,00
Sorra escltxes	0,10	0,10	0,15
Sorra wall crep	0,20	0,20	0,30
Sorra wall crep 2	0,50	0,50	0,75
Sorra wall crep 3	0,50	0,50	0,75
Exit	2,00	2,00	3,00

A la Taula 25 es mostren les mides màximes dels elements (tetraedres), per a cada malla, a les superfícies dels tres volums en els que s'ha dividit la geometria del filtre:

Taula 25: Mides màximes dels elements a les superfícies dels volums (*Body size function*)

Volum	Mides E2T5-2 (mm)	Mides E2T5 (mm)	Mides E2T5-2r (mm)
Inferior	5,00	5,00	7,50
Sorra	5,00	5,00	7,50
Superior	5,00	5,00	7,50

Pel que fa a les mides dels elements per als cossos d'influència de cada malla, es mostren a la Taula 26:

Taula 26: Mides màximes dels elements a les superfícies dels cossos (*Body of influence*)

Cos	Mides E2T5-2 (mm)	Mides E2T5 (mm)	Mides E2T5-2r (mm)
crep	0,60	0,60	0,80
dif	2,00	2,00	3,00
Inferior	2,00	2,00	3,00
Superior	2,00	2,00	3,00

Per definir la qualitat de la malla és important també controlar un seguit de paràmetres com són la obliquïtat (skewness, Figura 48), la ràtio d'aspecte (aspect ratio, Figura 49) i la qualitat ortogonal (orthogonal quality, Figura 50) dels elements. Els valors de la ràtio d'aspecte va de des de 0 fins a 1, essent el 0 el millor dels casos i 1 el pitjor. En canvi, per a la ràtio de la qualitat ortogonal, serà el 0 un valor inacceptable i 1 un valor excel·lent. Per a obtenir una bona malla cal evitar elements altament inclinats i relacions d'aspecte massa altes (mantenir per sota de 50).

### Skewness

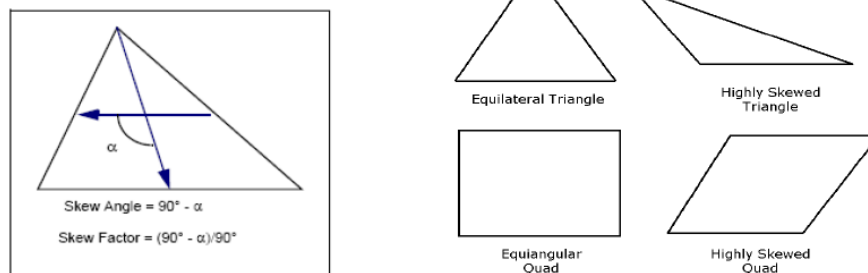


Figura 48: Definició de la inclinació dels elements

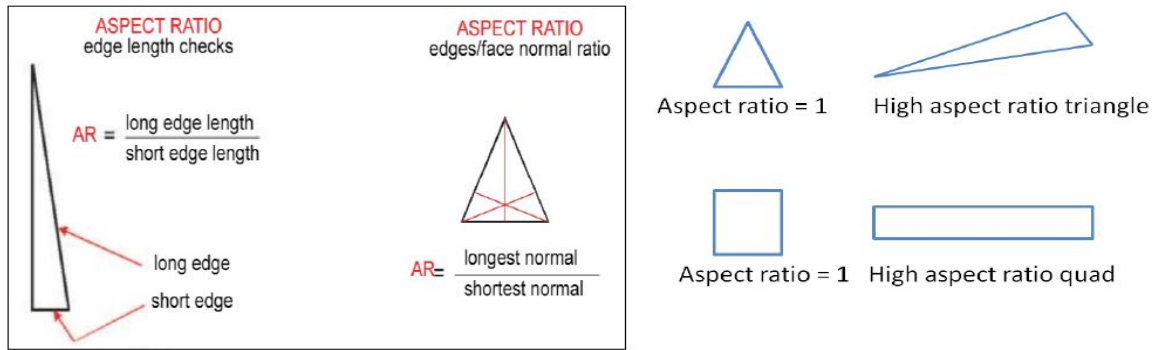


Figura 49: Definició de la ràtio d'aspecte

### Orthogonal quality

$$OQ = \frac{\sum \vec{A}_i \cdot \vec{e}_i}{\sum |\vec{A}_i| |\vec{e}_i|}$$

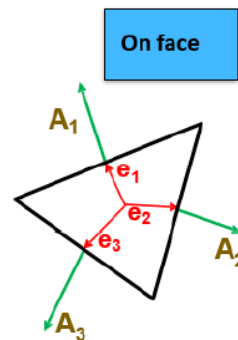


Figura 50: Definició de la qualitat ortogonal dels elements de la malla

A la Taula 27 es resumeixen els paràmetres descrits anteriorment per a les 3 malles generades en aquest estudi.

Taula 27: Mètriques de les malles

Paràmetre	Malla E2T5-2	Malla E2T5	Malla E2T5-2r
Max Skewness	0,899	0,899	0,920
Mean Skewness	0,212	0,213	0,221
Max Aspect ratio	39,013	43,587	43,828
Mean Aspect ratio	2,718	2,701	2,901
Min Orthogonal quality	0,101	0,101	0,080
Mean Orthogonal quality	0,786	0,786	0,777

A la Taula 28 , es mostren els estadístics que indiquen el nombre d'elements per zona, el nombre total d'elements i el nombre total de nodes per a cada malla:

Taula 28: Estadístics de les malles

Zona	Malla E2T5-2	Malla E2T5	Malla E2T5-2r
Superior	2.551.097	2.551.097	830.047
Sorra	7.049.428	7.049.428	3.388.079
Inferior	6.912.358	6.468.159	3.329.465
Elements totals	16.512.883	16.068.684	7.547.591
Nodes	26.984.536	26.165.729	12.594.156

Un cop configurat el Mesh la malla generada presenta diferents distribucions segons la regió del filtre. A la Figura 51 podem veure zones amb diferent densitat d'elements i també zones amb elements en forma de prismes.

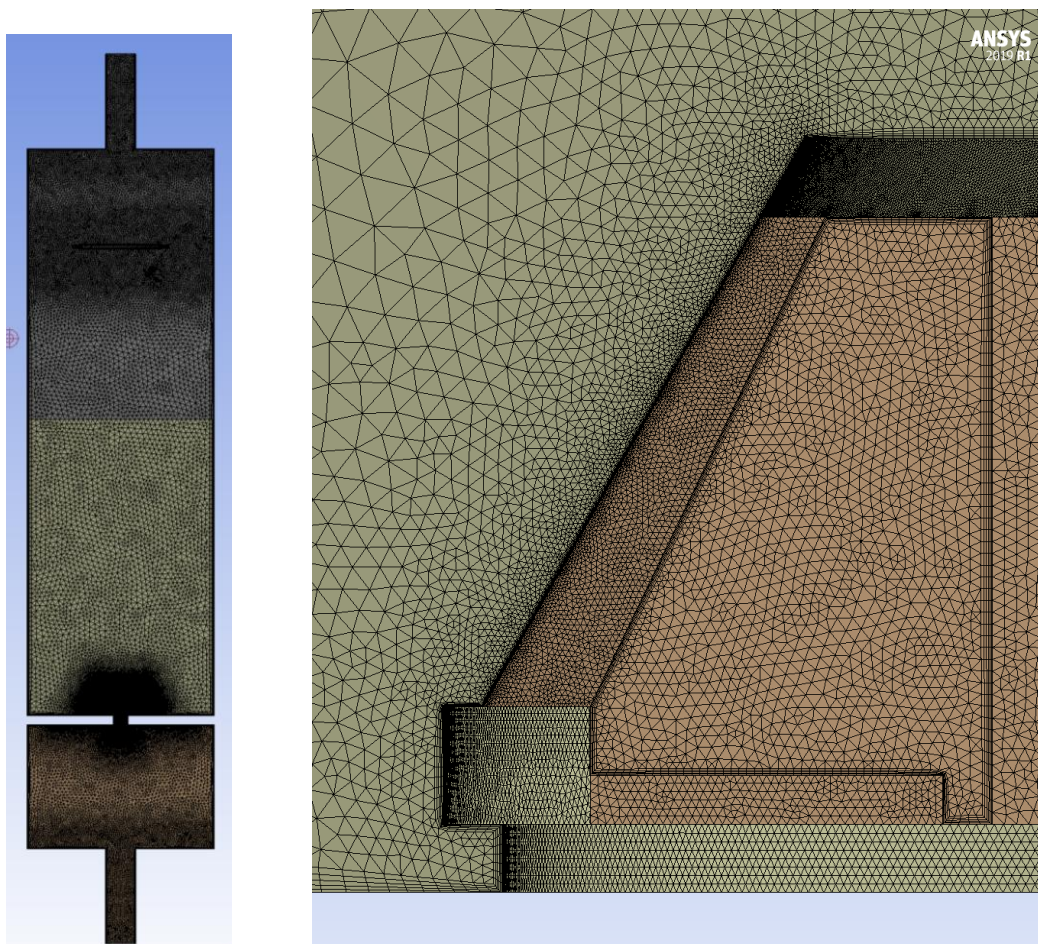


Figura 51: Malla del filtre i detall de la malla a la zona de la crepina.



## ANNEX C: CONFIGURACIÓ DEL MODEL

La majoria de les modificacions descrites a l'apartat 3 s'han dut a terme gràcies a l'ANSYS Fluent. Aquest ens permet configurar el model amb el bloc *Setup* que trobem en el Project Schematic de l'ANSYS-Workbench (Figura 45).

Dins del *Setup* podem definir els paràmetres de la nostra simulació. A la Figura 52 podem veure el ventall d'opcions que ens ofereix el programari per escollir el model de turbulència.

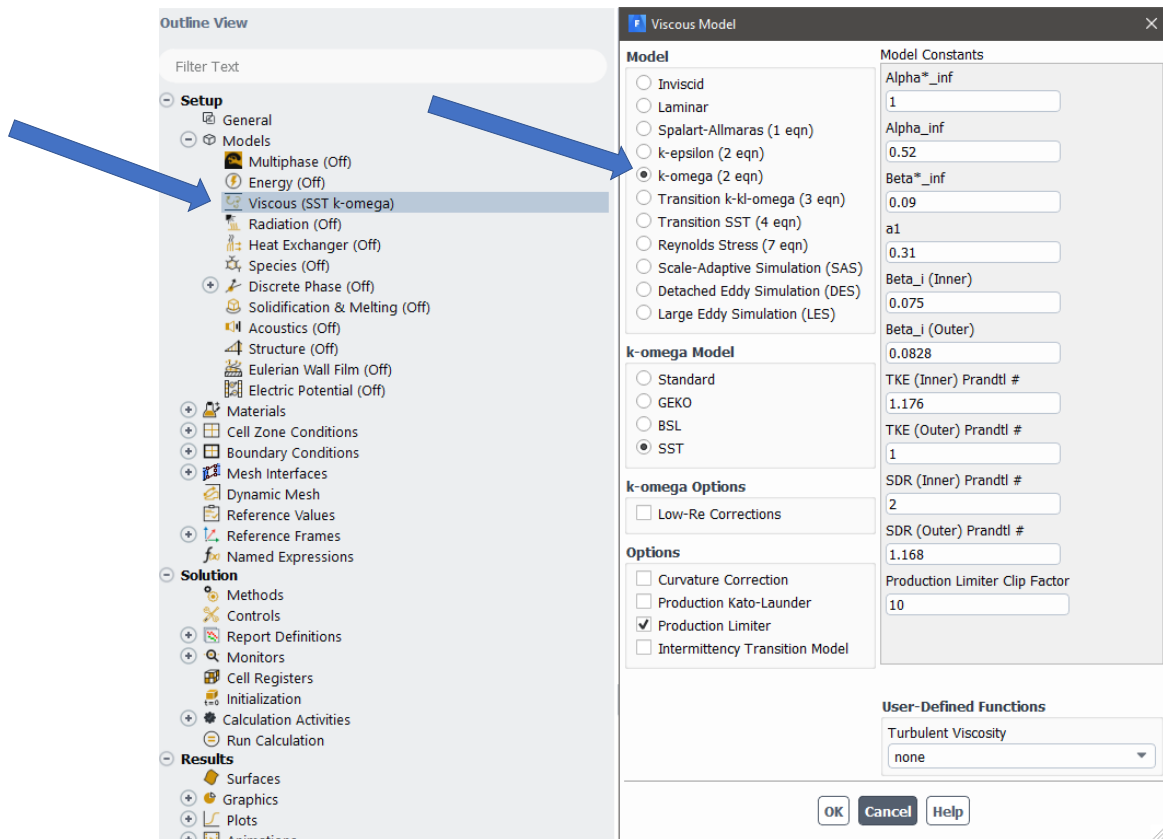


Figura 52: Models de turbulència amb els que permet treballar el Fluent

Amb l'opció de Cell Zone Conditions podem introduir els paràmetres prèviament calculats del medi porós (Figura 53),  $1/\alpha$  (Viscous resistance) i  $C_2$  (Inertial resistance) pel models basats en Darcy o el  $C_0$  i  $C_1$  pels casos en els que utilitzem la llei potencial.

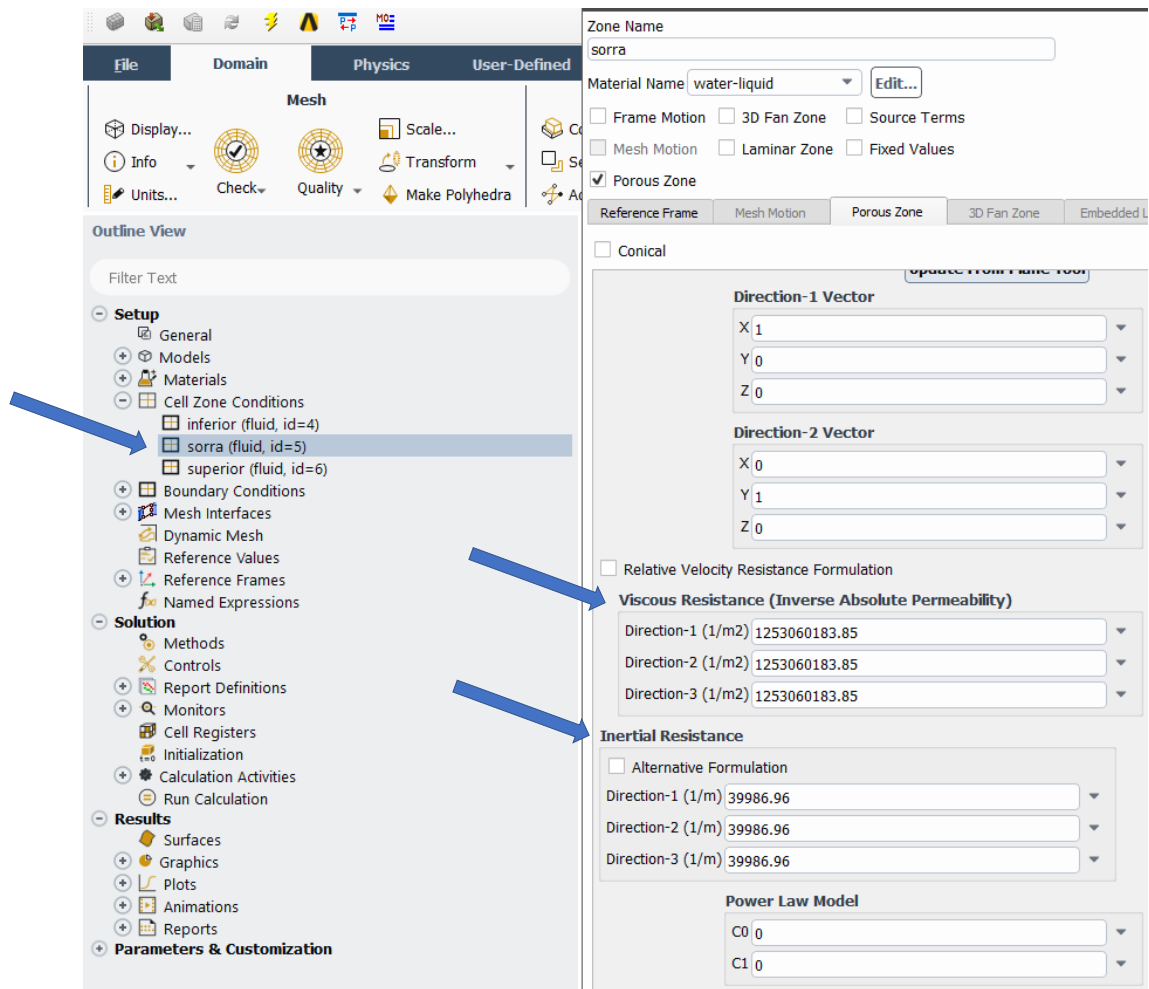


Figura 53: Configuració dels paràmetres que modelen el medi filtrant.

Les condicions de contorn les podem definir a l'apartat de *boundary conditions*, com es pot veure en l'exemple de la Figura 54, permet assignar la rugositat de les parets del filtre.

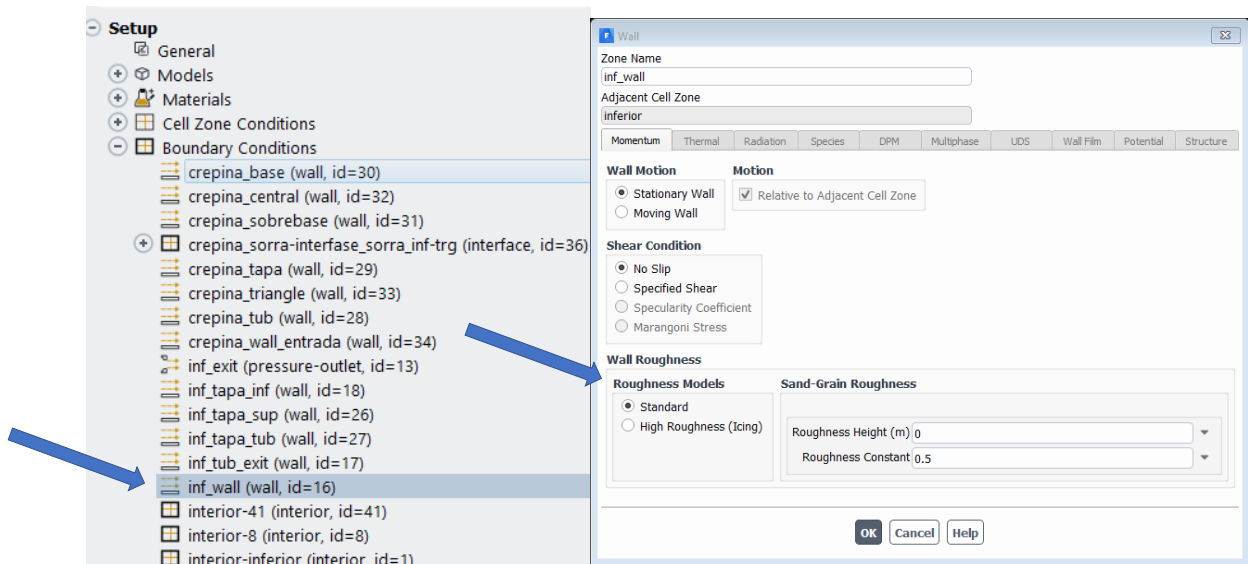


Figura 54: Definició de la rugositat dins del *boundary conditions*.



A l'apartat *Solution* que ens ofereix el Fluent, hi podem definir els mètodes numèrics amb els que es treballa: el tipus d'esquema pressió-velocitat i la discretització espacial (Figura 55). En aquest estudi s'han posat a prova diferents configuracions.

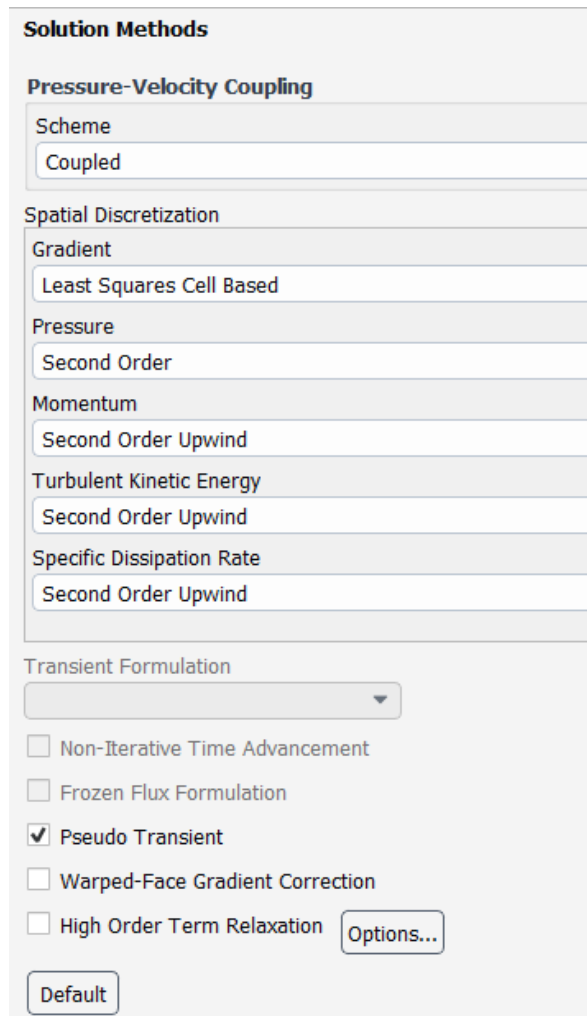


Figura 55: Exemple de la configuració dels mètodes dins del Fluent.



## ANNEX D: COST D'ELABORACIÓ DEL PROJECTE

En aquest apartat del document es fa la valoració econòmica del projecte, tenint en compte els següents costos:

DESCRIPCIÓ	PREU
<b>Costos de desenvolupament i recerca</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>Anàlisi i recerca de la informació necessària per tal de desenvolupar el projecte.</li></ul>	25 €/h
<ul style="list-style-type: none"><li>Elaboració dels càlculs i tractament de dades.</li></ul>	35 €/h

<b>Costos d'amortització</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>Amortització dels programes utilitzats pel desenvolupament del projecte: Paquet Microsoft Office, SolidWorks i Ansys.</li></ul>	2€/h
<ul style="list-style-type: none"><li>Amortització dels equips utilitzats: ordinador portàtil i estació de treball</li></ul>	0,70 €/h

<b>Costos de redactat i material</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>Redacció del projecte i elaboració dels diferents documents.</li></ul>	30 €/h

Memòria i annexos, **Annex D**: Cost d'elaboració del projecte

DESCRIPCIÓ	PREU UNITARI	UNITATS	PREU
<b>Desenvolupament i recerca</b>			
Anàlisis i recerca	25,00 €/h	30 h	750,00 €
Programació per l'execució	35,00 €/h	80 h	2.800,00 €
<b>Amortització</b>			
Programes informàtics	2,00 €/h	350 h	700,00 €
Equipament informàtics	0,70 €/h	350 h	245,00 €
<b>Redactat</b>			
Redacció	30,00 €/h	75 h	2.250,00 €
			Subtotal
			6.745,00 €
			21% IVA
			1.416,45 €
			<b>TOTAL</b>
			<b>8.146,45 €</b>