

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Validació d'un model de dinàmica de fluids computacional per simular el comportament hidràulic de filtres d'anella

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Pol Puigvert Bagué

Tutor: Antoni Pujol Sagaró

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Juny 2022

ÍNDEX DE CONTINGUTS

1 INTRODUCCIÓ	6
1.1 Antecedents.....	6
1.2. Objecte	7
1.3. Abast i especificacions.....	7
2. FILTRE.....	9
2.1. Filtre comercial.....	9
2.2. Principi de funcionament	9
3. METODOLOGIA.....	12
3.1. Simulació.....	12
3.1.1. Introducció	12
3.1.2. Geometria	12
3.1.3. Configuració de la simulació	16
3.1.4. Model de pèrdua de càrrega per a les anelles	18
3.2. Assaig experimental	24
4. RESULTATS.....	27
4.1. Resultats experimentals	27
4.1.1. Assajos realitzats.....	27
4.1.2. Ajust i discussió dels resultats.....	29
4.2.1. Introducció	31
4.2.2. Anàlisi de pèrdues de càrrega.....	31
4.2.3. Distribució de la pressió	34
4.2.4. Línies de corrent i velocitat del fluid	35
5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS	38
6. CONCLUSIONS	43
8. BIBLIOGRAFIA.....	48
A GEOMETRIA	50
A.1 Dibuix CAD.....	50
A.2 Geometria del fluid	55
B DISCRETITZACIÓ DEL MODEL.....	61
B.1 Operacions de discretització.....	62
B.2 Qualitat de la discretització	63
B.2.1 Aspect ratio	64
B.2.2 Skewness	65

B.2.3 Orthogonal quality	66
C. CONFIGURACIÓ DEL MODEL	67
C.1. Configuració general.....	67
C.2. Configuració de les anelles	70
D. RESULTATS	75
D.1. Distribució de la pressió	75
D.2. Línies de corrent.....	76
D.3. Velocitat del fluid	77

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Carcassa del filtre (A) i anelles filtrants (B).....	6
Figura 2. Filtre d'anelles ARKAL curt 1" (Arkal, 2017).....	9
Figura 3. Superfície anella	10
Figura 4. Circulació del fluid a l'interior del filtre	10
Figura 5. Vista explosionada.....	12
Figura 6. Secció del negatiu del filtre d'anelles en el programa Design Modeler	13
Figura 7. Definició de les superfícies	14
Figura 8. Mallat de la Discretització 1	16
Figura 9. Condicions de contorn aplicades al model	17
Figura 10. Zones de pèrdues de càrrega primàries de l'anella.....	19
Figura 11. Pèrdues de càrrega en les anelles.....	20
Figura 12. Secció canal de l'anella.....	22
Figura 13. Muntatge assaig experimental.	25
Figura 14. Gràfic resultats assaig experimental.	26
Figura 15. Resultats assaig experimental	29
Figura 16. Ajust parabòlic de la diferència de pressió	29
Figura 17. Gràfic resultats comparació de discretitzacions	33
Figura 18. Distribució de pressió a l'interior del filtre en el pla de simetria.....	34
Figura 19. Línies de corrent del fluid	36
Figura 20. Velocitat del fluid.....	36
Figura 21. Discussió de resultats	38
Figura 22. Caiguda de pressió per diferents valors de C0 i C1	40
Figura 23. Croquis 1.	50
Figura 24. Revolució de la base.....	51
Figura 25. Extrusió perfil de rombe.	52
Figura 26. Sortint per extrusió i Figura 27. Tall per extrusió	52
Figura 28. Suport interior de les anelles.....	53
Figura 29. Sortint per extrusió i Figura 30. Tall per extrusió	54
Figura 31. Assemblatge de la geometria.....	55
Figura 32. Filtre contingut a l'interior del cilindre i Figura 33. Detalls operació booleana	56
Figura 34. Geometria resultant interior del filtre.	56
Figura 35. Secció alçat geometria interior del filtre.....	57
Figura 36. Pla de les anelles.....	57
Figura 37. Operació booleana de les anelles	58

Figura 38. Cossos resultants.	58
Figura 39. Unió cares conducte entrada i sortida.	59
Figura 40. Unió cares flux sortida i Figura 41. Unió cares flux entrada.....	59
Figura 42. Configuració mallat. A; insertar mètode, B; Definir mètode	61
Figura 43. Mallat 3D. A; Generació Inflació, B; Geometria entrada, C; Geometria sortida.....	62
Figura 44. Selecció de superfícies de contacte.	63
Figura 45. Detalls del mallat.....	64
Figura 46. Resultats Aspect ratio	64
Figura 47. Gràfic Aspect ratio	65
Figura 48. Element més desfavorable.....	65
Figura 49. Skewness	66
Figura 50. Resultats Skewness.....	66
Figura 51. Resultats Orthogonal quality	66
Figura 52. Menú configuració.....	67
Figura 53. Configuració general	68
Figura 54. Configuració model.	68
Figura 55. Definició del volum de les anelles com a zona porosa.	69
Figura 56. Definició de paràmetres. A; Entrada, B; Sortida	70
Figura 57. Interfases	70
Figura 58. Resultats distribució de pressió.....	75
Figura 59. Resultats línies de corrent.....	76
Figura 60. Resultats velocitat del fluid.....	77

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Nombre de nodes, elements i mida característica dels elements.	15
Taula 2. Lectures assaig experimental.....	28
Taula 3. Resultats assaig experimental.....	28
Taula 4. Variació del cabal màssic en percentatge per la discretització 1	32
Taula 5. Resultats discretització 1.....	32
Taula 6. Resultats discretització 2.....	32
Taula 7. Resultats discretització 3.....	33
Taula 8. Diferència de pressió (Pa) segons configuracions possibles de C_0 i C_1	40
Taula 9. Mesures de les anelles	71
Taula 10. Perímetre mullat, radi hidràulic i diàmetre hidràulic.	71
Taula 11. Velocitat i cabal corresponent a cada canal	72
Taula 12. Paràmetres d'entrada al canal.....	72
Taula 13. Paràmetres de sortida del canal.....	73
Taula 14. Paràmetres de sortida de l'anella.	73
Taula 15. Pèrdues de càrrega.....	73

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

El reg per degoters és el sistema més eficient de subministrament d'aigua en els cultius, conduint aquesta aigua mitjançant una xarxa de conductes tancats i distribuint-la pel cultiu mitjançant petits orificis anomenats degoters, entregant així petits volums d'aigua de forma periòdica, que s'aplica en forma de gota.

També són coneguts com a sistemes de reg localitzats, ja que humitegen un sector de superfície de terra concret, oferint així un creixement controlat i òptim del cultiu.

El fet de poder oferir un reg uniforme al llarg de diferents superfícies permet tenir un major control d'aquest, de la mateixa manera que la freqüència en la que es produeix.

Un dels principals problemes que sorgeixen en aquests sistemes és la obstrucció del degoter, que pot ser produïda per partícules minerals en suspensió, matèria orgànica o precipitats. Per evitar-ho, és important la presència d'un equip de filtrat adequat per evitar aquests tipus de problemes. Un dels filtres més utilitzats, és el filtre d'anelles, en el qual es centra aquest treball.

Els filtres d'anelles estan formats per una carcassa on entra l'aigua del reg, i un element filtrant a l'interior format per un conjunt d'anelles disposades una sobre l'altre, de manera que formen tot un conjunt en forma de cilindre.



A



B

Figura 1. Carcassa del filtre (A) i anelles filtrants (B)

Cada anella consta de diferents canals superficials, que es sobreposen amb els canals de l'anella superior, conduint així l'aigua des de l'exterior del cilindre fins al forat interior d'aquest, oferint una dificultat de pas que permet retenir les partícules.

Les dimensions de les partícules que es filtren dependrà de les mesures dels canals de les anelles que venen donades per cada fabricant, amb la denominació "mesh".

Un cop l'aigua passa a través de l'element filtrant, surt del filtre lliure de partícules que puguin obturar els forats dels degoters.

Aquests filtres tenen l'avantatge que poden retenir grans quantitats de sediments abans d'obstruir-se per complet. En el seu funcionament òptim, tenen una pèrdua de càrrega de 1 a 3 mca i es considera que s'han de netejar quan arriben a un valor de 5 mca. Aquesta neteja es pot donar de forma automàtica, o de forma manual, extraient les anelles de l'interior del filtre i aplicant aigua a pressió que arrastrarà totes les partícules retingudes.

La principal problemàtica a l'hora de millorar el disseny i el rendiment d'aquests filtres és la falta d'eines de simulació, ja que els assajos són molt laboriosos i es fan en laboratoris, sense aplicar cap tècnica de simulació.

1.2. Objecte

L'objecte d'aquest projecte és definir una metodologia per simular el comportament hidràulic d'un filtre d'anelles comercial mitjançant dinàmica de fluids computacional i validar-la amb dades de cabal i caigudes de pressió obtingudes en un assaig de laboratori.

1.3. Abast i especificacions

Aquest estudi es basa en la realització del model CAD d'un filtre d'anelles comercial, definir la metodologia en ANSYS-Fluent per a la simulació hidràulica, validar la metodologia proposada simulant diferents condicions d'operació, utilitzant diferents cabals. El fluid amb el que es treballa en la simulació és aigua neta.

Es compararan els resultats obtinguts de la simulació amb un assaig de laboratori utilitzant el mateix filtre d'anelles comercial i les mateixes condicions d'operació

El projecte no es centra en validar el funcionament del filtre respecte la retenció de partícules. Tan en la simulació com en l'assaig, no es té en compte el pas de partícules

que puguin obstruir l'element filtrant. S'utilitza un flux d'aigua net, lliure de qualsevol element en suspensió, matèria orgànica o precipitat.

S'utilitzen les dades de caiguda de pressió entre el pas d'entrada i de sortida del filtre, per comparar els resultats de la simulació amb l'assaig experimental al laboratori.

2. FILTRE

2.1. Filtre comercial

Existeix una àmplia varietat de filtres d'anelles comercials, en diferent geometria, dimensions del filtre, diàmetre de les connexions d'entrada i sortida, grau de filtració, etc.

En aquest estudi, s'utilitza el Filtre d'anelles ARKAL CURT RM. 1" 120 MESH (veure Figura 2), constituït per una carcassa de poliamida reforçada amb fibra de vidre, anelles planes de polipropilè amb ranures, apilades una sobre l'altre en un braç de filtració anomenat Spin Klin. El conjunt té un sistema de tancat i compressió mitjançant una junta tòrica i un ressort intern inserit al fons cec de la carcassa cilíndrica.

Aquest model es caracteritza per ser la versió de dimensions més reduïdes, donant una menor superfície i capacitat de filtració que el model llarg. Els diàmetres de les connexions d'entrada i sortida són de 25,4mm, equivalents a 1".

La denominació "120 MESH" fa referència al grau de filtració que ofereix, que es caracteritza amb el color de les anelles, en aquest cas vermell, i permet filtrar partícules de fins a 0,13 mm.



Figura 2. Filtre d'anelles ARKAL curt 1" (Arkal, 2017)

2.2. Principi de funcionament

La filtració es produeix en el pas de l'aigua a través de les anelles sobreposades una sobre l'altre. Cada anella consta de 263 canals formats per unes ranures que es troben en la seva superfície, disposades seguint una direcció diagonal a la superfície de l'anella, contrària a la de les ranures de la cara de l'anella superior, amb la qual fa

contacte. D'aquesta manera, quan el flux d'aigua entra per un canal des de la part exterior de les anelles, es troba amb 12 interseccions amb els canals de l'anella superior, generant una pèrdua de càrrega del flux d'aigua i distribuint al llarg de diferents canals les partícules filtrades. Finalment el flux d'aigua surt per la part interior del cilindre que formen les anelles, i segueix el recorregut fins a la connexió de sortida. L'àrea del canal és inferior en la sortida que en l'entrada, de manera que el canal es va estrenyent.



Figura 3. Superfície anella

En la Figura 3 es pot apreciar la superfície de l'anella, amb els canals corresponents a la cara superior.

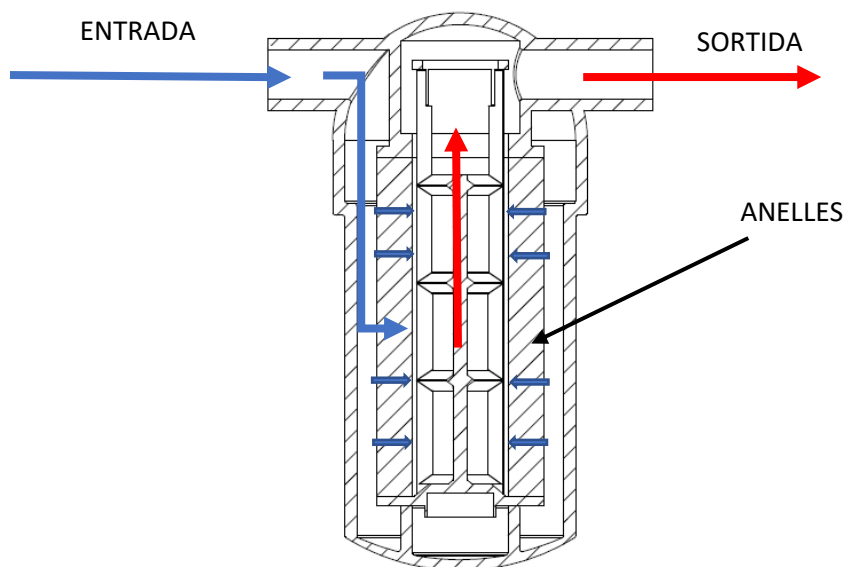


Figura 4. Circulació del fluid a l'interior del filtre

La Figura 4 és un tall pel mig del filtre, on s'observa com el fluid entra per la connexió d'entrada, traspasa el cilindre d'anelles a través dels seus canals fins arribar al forat interior del cilindre, d'on es condueix fins la connexió de sortida.

3. METODOLOGIA

3.1. Simulació

3.1.1. Introducció

L'objectiu d'aquest estudi és simular el comportament hidràulic d'un filtre d'anelles en unes condicions determinades, per a poder comparar els resultats amb els experimentals obtinguts en un assaig de laboratori. Els paràmetres que s'utilitzen per a la comparació són els de diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del fluid en el filtre. Per treballar en les mateixes condicions, s'utilitzaran els mateixos valors de velocitat a l'entrada i velocitat de sortida del filtre que en l'assaig experimental.

3.1.2. Geometria

La geometria utilitzada s'ha generat amb el programa SOLIDWORKS, utilitzant les mesures obtingudes de les dimensions del filtre comercial. Consta de tres objectes diferents que són: la carcassa, el conjunt d'anelles i el suport interior de les anelles. Es pot observar en la Figura 5.

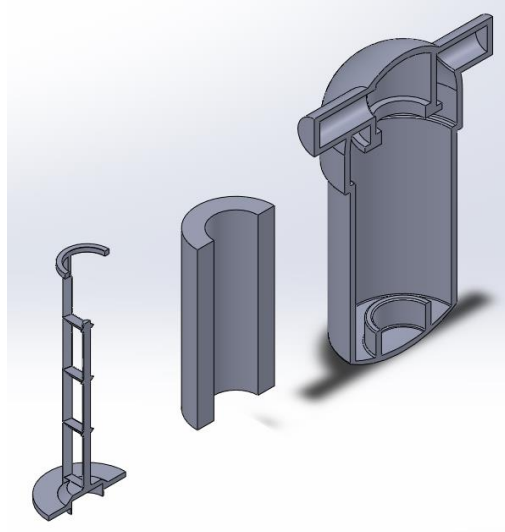


Figura 5. Vista explosionada

Per simplificar l'estructura de les anelles, ja que simular la geometria dels canals dificultaria molt el procés de simulació, es genera un cilindre equivalent al conjunt d'anelles col·locades una sobre l'altre, formant tot un conjunt al qual li determinarem unes propietats determinades per simular la filtració del flux.

Les mesures més destacables de la carcassa són l'amplada de 130 mm, altura de 225 mm i diàmetre del tub de connexió d'entrada i sortida de 25,4 mm. En quant a l'element filtrant, aquest té una altura de 142 mm, un diàmetre exterior de 70 mm i diàmetre interior de 45 mm.

Després de fer unes proves amb la geometria, es decideix prescindir de l'estructura interior que suporta les anelles, ja que la seva complexitat dificulta molt la simulació, degut a que es necessitaven molts elements per fer la discretització del volum intern, fet que no permet l'ús de la llicència d'estudiant, i s'assumeix que les pèrdues de càrrega que produeix són mínimes respecte els altres elements.

Amb la geometria ja definida, s'importa al programari ANSYS Design Modeler per obtenir el volum del fluid dins el filtre. Es decideix suprimir els arrodoniments de la geometria per evitar futurs problemes en el mallat i en la simulació, així com tancar les obertures de les connexions d'entrada i sortida per poder obtenir el negatiu de l'espai buit tancat del filtre, corresponent al volum del fluid. Es pot veure el negatiu del filtre en la Figura 6.

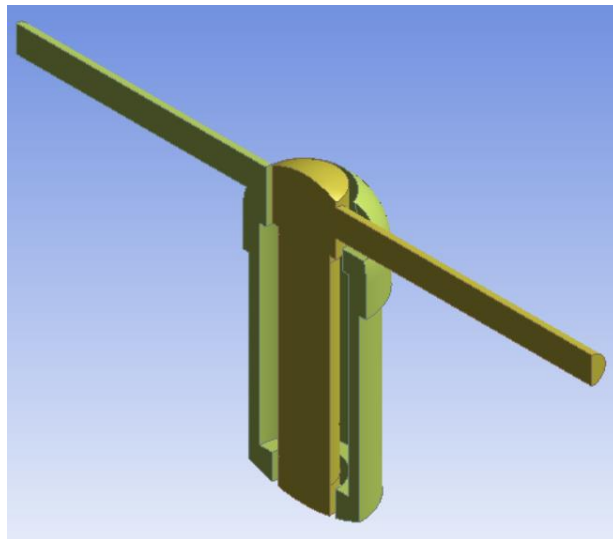


Figura 6. Secció del negatiu del filtre d'anelles en el programa Design Modeler

Per facilitar la simulació, treballarem només amb la meitat del filtre i del fluid, tallant verticalment en l'alçat de la geometria, com es veu en la figura, obtenint així una forma simètrica respecte l'alçat.

Primerament definim quina part del fluid correspon a l'entrada i quina part correspon a la sortida, considerant la part d'entrada del flux a aquell previ a travessar l'element filtrant, i la part de sortida a aquell flux que ja ha travessat les anelles i que surt pel canal de connexió de sortida.

Una vegada estan definides les parts d'entrada i sortida, és important diferenciar les diferents superfícies dels cossos i el contacte que es produeix entre elles, ja que serà necessari per, posteriorment, classificar-les en les condicions de contorn.

Nombrem entrada "inlet" i sortida "outlet" a les superfícies corresponents a l'entrada inicial del fluid en la simulació i a la sortida final, que són els punts d'on extraurem la diferència de pressió en la simulació. Un cop el fluid entra en el filtre, es diferencia una superfície de contacte entre el flux d'entrada i les anelles juntament amb una d'oposada entre les anelles i l'entrada i una altre entre el flux d'entrada i la superfície de la carcassa.

Les anelles, a part d'estar en contacte amb el fluid, també ho estan amb la carcassa en la part superior.

En quant al flux de sortida, aquest genera al igual que l'entrada, una superfície de contacte entre la sortida i les anelles, una oposada entre les anelles i la sortida i una altre amb la superfície de la carcassa.

Finalment cal nombrar també les superfícies de contacte del cos, anelles i flux d'entrada i sortida en relació al pla de simetria, que utilitzarem per definir com a punt de simetria per generar una simulació de la geometria completa.

En la Figura 7 s'observa destacat en vermell a quines són les diferents superfícies que hem definit, ocultant les del pla de simetria per una millor visualització.

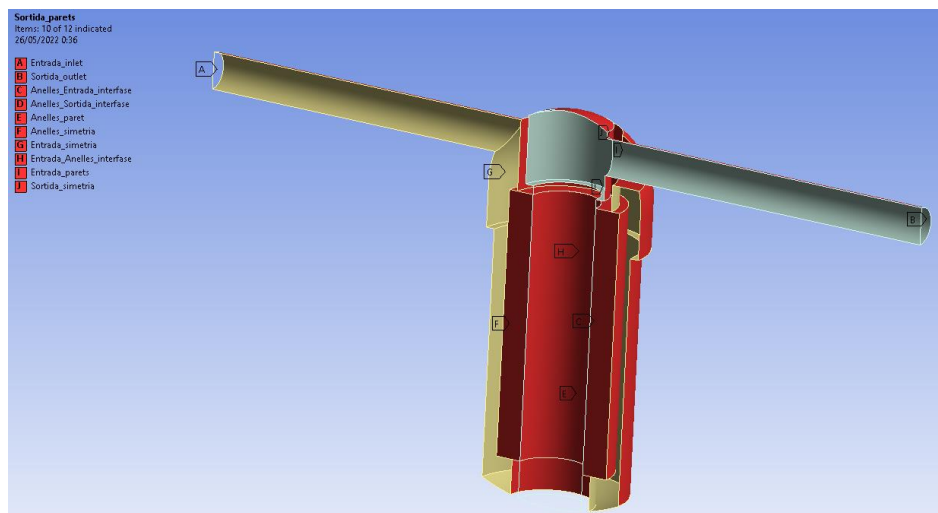


Figura 7. Definició de les superfícies

Quan es treballa amb volums finits, és molt important definir bé en quants elements dividirem les superfícies del cos, buscant obtenir la màxima precisió per la simulació tenint en compte els recursos de processament que ens permet l'ordinador.

En aquest estudi es fan tres discretitzacions de mallat diferent, per analitzar com aquest afecta en els resultats de la simulació. Totes utilitzen triangles per a les superfícies, tetraedres per als volums i 5 capes de prismes per a les regions més properes a les parets físiques.

Es fa una primera discretització buscant obtenir el màxim d'elements que permet, en aquest cas, la versió d'estudiants del programa ANSYS Fluid Flow Fluent, el qual permet resoldre les equacions que determinen la dinàmica dels fluids treballant amb volums finits (tècnica CFD de Computational Fluid Dynamics).

En la segona discretització s'utilitza el mateix programari però en una versió de recerca, que ens permet generar un nombre d'elements més elevat.

Per últim es fa un mallat molt més bast que els altres dos, amb molts menys nombres d'elements.

Un cop definit el tipus de mallat, es modifiquen els elements que es generen en les interseccions de les superfícies, ja que al trobar canvis de direcció i curvatures es generen elements més petits que intenten adaptar-se al contorn de la superfície i generen problemes en la simulació.

S'expliquen en més detall a l'Annex B d'aquest document tots els aspectes que tenen relació amb la discretització del model.

La Taula 1 mostra el nombre total d'elements i de nodes generats en cada discretització.

Taula 1. Nombre de nodes, elements i mida característica dels elements.

	Discretització 1	Discretització 2	Discretització 3
Nodes	136659	1313595	38812
Elements	503523	6117559	116864
Mida dels elements (m)	0,00235	0,001	0,004

El paràmetre que modifiquem per establir el nombre d'elements és el de la mida màxima dels elements en el volum. Es pot observar que com més petita és la mida dels elements, més se'n generen de la mateixa manera que els nodes.

Un cop definits els mallats de les tres discretitzacions diferents, s'ha de comprovar la qualitat d'aquests, per decidir si són acceptables o no. El procés de comprovació dels diferents mallats ve definit en l'Annex B

En la Figura 8 s'observa el resultat de la generació del mallat per a la discretització 1.

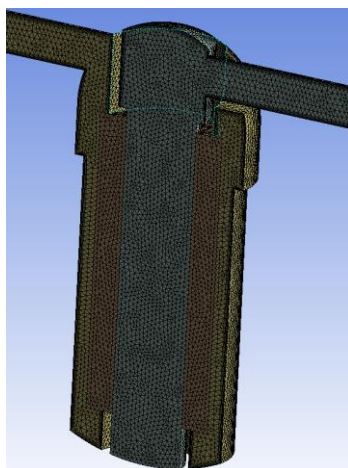


Figura 8. Mallat de la Discretització 1

3.1.3. Configuració de la simulació

Un cop definida la geometria de treball i comprovat que les discretitzacions utilitzades són correctes per a una bona simulació, s'han de configurar una sèrie de paràmetres per poder iniciar-la.

El primer pas es definir les característiques del model amb el que treballem. Es tracta d'un estudi utilitzant un model estacionari d'una sola fase. Al ser aigua líquida, definim un material fluid, "water-liquid", que ve determinat per un valor de densitat de $998,2 \text{ kg/m}^3$ i viscositat dinàmica (o absoluta) $0,001003 \text{ kg/ms}$.

El fluid utilitzat és incompressible i es treballa a una temperatura constant al llarg de la simulació, d'aquesta manera s'estableix que no es produeix intercanvi de calor.

El règim en el que treballem és turbulent, en concret s'aplica el model de *SST K-omega*, el qual combina els models *Wilcox k-omega* i *k-epsilon*. Aquesta denominació fa referència a que el model treballa a partir de dues equacions diferencials on les variables són k (energia cinètica turbulenta) i ω (taxa específica de la dissipació turbulenta).

Seguidament es diferencien les diferents condicions de contorn en l'apartat "Boundary Conditions". En aquest apartat es classifiquen les superfícies que s'han definit en l'apartat 3.2.1. *Geometria*, segons si corresponen a l'entrada, sortida, part interior, interfase, parets de geometria o simetries. En la Figura 9 es mostra com venen determinades:

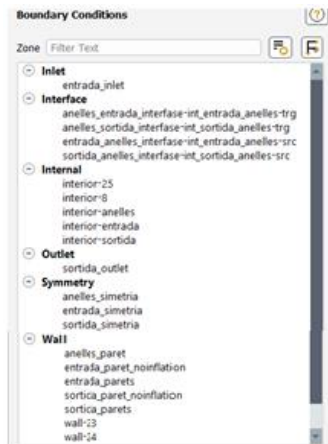


Figura 9. Condicions de contorn aplicades al model

En la condició de contorn corresponent a l'entrada "inlet", és el punt on definim la velocitat d'entrada del fluid de cada assaig, essent aquesta la mateixa utilitzada en l'assaig de laboratori, i calculada a partir del cabal d'entrada mesurat.

En la condició de contorn de sortida podem definir el segon paràmetre de la simulació que és la pressió de sortida del fluid en el filtre, que correspon a l'obtinguda en la mesura del manòmetre en l'assaig de laboratori.

Amb aquests dos paràmetres podem obtenir la diferència de pressió que es produeix entre els contorns que hem anomenat entrada i sortida.

Definim com a interfases les superfícies de contacte que es generen amb el pas del flux i l'element filtrant, diferenciant entre les que corresponen al contacte entre el flux d'entrada i les anelles, i les del contacte entre el flux de sortida i les anelles.

En l'apartat simetria, hem de nombrar quines són les interfícies que definim com a pla de simetria per poder realitzar una simulació semblant a la del cos complet. En aquest cas, el pla de simetria entra en contacte amb les anelles, l'entrada i la sortida.

L'últim pas per definir el model de simulació és determinar el comportament filtrant que té el cilindre format pel conjunt d'anelles. En l'apartat *Cell Zone Conditions* es defineixen, per l'element denominat com a *anelles*, una zona laminar i zona porosa, amb uns coeficients corresponents C0 i C1. Aquests valors venen determinats per el model de pèrdua de càrrega per anelles, que ve explicat en l'estudi en l'apartat següent 3.1.4. *Model de pèrdua de càrrega per les anelles.*

Una vegada tenim definit tot el model de simulació, es seleccionen quins informes i resultats es volen que ens generi. En aquest estudi es treballa amb les dades de

diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del filtre, que s'utilitzaran per comparar gràficament els resultats, per tant es defineix que la simulació extregui informes sobre pressió en l'entrada, pressió en la sortida, diferència de pressions en unitats i en percentatges i els cabals màssics en l'entrada i la sortida per saber si la condició de flux estacionari s'assoleix.

Els resultats de la simulació s'obtenen de forma iterativa, on el càlcul parteix d'una condició inicial la qual podem definir. A mesura que la simulació va iterant els valors de les variables, es tendeix al resultat final. La simulació disposa de la generació dels residuals, els quals representen la diferència ponderada d'una mateixa variable entre dues iteracions consecutives. En el cas d'aquest estudi s'estableixen un total de 1000 iteracions, i es pren com a valor final la mitjana dels 50 últims valors. El valor dels residuals per aquests valors era inferior a 10^{-3} per a totes les variables.

3.1.4. Model de pèrdua de càrrega per a les anelles

En aquest apartat s'explica com s'ha parametrizat el conjunt geomètric corresponent a les anelles per simular el comportament filtrant, ja que per facilitar el procés de simulació s'ha assimilat el conjunt d'anelles a un cilindre llis.

Diferenciem dos tipus diferents de pèrdues de càrrega: les pèrdues de càrrega primàries, que són les que es produeixen degut a la resistència que ofereix la superfície per la qual circula el flux, i les secundàries, les quals consisteixen en aquelles pèrdues que es produeixen degut a elements singulars de la pròpia geometria per on circula el fluid, ja siguin colzes, estrenyiments, expansions, etc.

Per obtenir les dades corresponents a les mides de les ranures de les anelles, s'ha consultat l'article *Sang-ink Lee, Jin-Yong Choi and Won Choi. Effect of Groove Shape on Head Loss and Filtration Performance of Disc Filters. 2021.*

Es defineixen dos tipus de pèrdues de càrrega primàries, corresponents a les dues superfícies diferents que es troba el flux. La primera és el recorregut que fa al llarg del canal de l'anella i la segona és el recorregut que fa un cop surt del canal, on es troba una petita zona oberta abans de sortir completament de l'anella (veure la Figura 10).

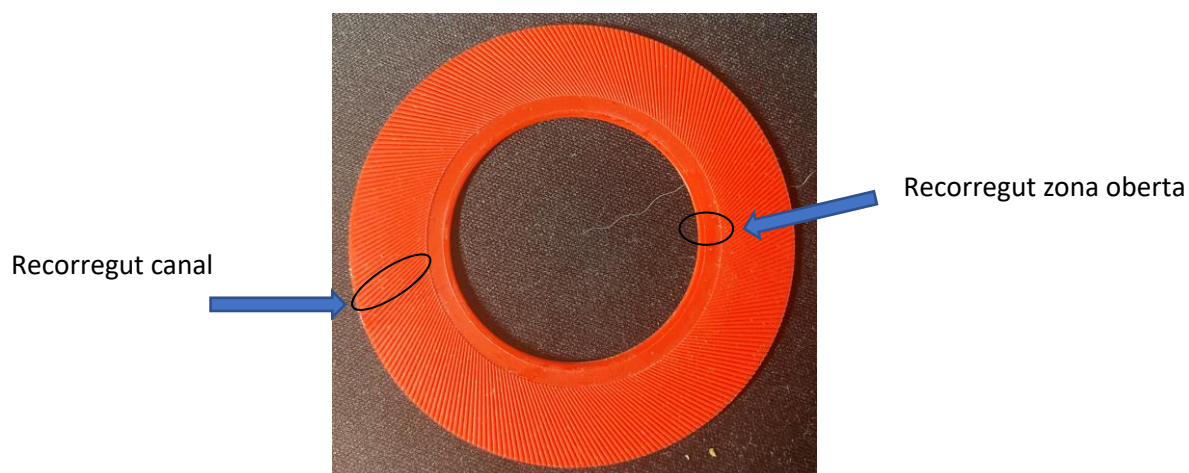


Figura 10. Zones de pèrdues de càrrega primàries de l'anella.

En referència a les pèrdues de càrrega secundàries, diferenciem les que són degudes al fenomen d'expansió del fluid, i les degudes a la contracció.

Primerament es produeix una contracció del fluid al entrar des de l'exterior de les anelles al canal. Una vegada dins, es produeixen una seqüència de pèrdues de càrrega d'expansió i contracció consecutives degudes al creuament dels canals de la cara de l'anella superior amb la qual fa contacte. Finalment, hi ha una pèrdua de càrrega associada a l'expansió quan el flux surt del canal i entra en la zona de superfície oberta de l'anella, i una de similar al sortir de la zona oberta fins arribar al forat interior de les anelles, on el flux ja es dirigeix cap a la sortida del filtre.

En aquest projecte, per calcular les pèrdues de càrrega primàries s'utilitza l'equació de Darcy-Weisbach, una equació semi-empírica que relaciona les pèrdues de càrrega hidràulica o de pressió degut a la fricció, donada a una velocitat mitjana de flux de fluid.

Per al càlcul de pèrdues de càrrega secundàries, s'utilitza la fórmula de pèrdues de càrrega segons factor K, coeficient de pèrdues secundàries.

Un cop calculades les pèrdues de càrrega de les anelles, amb la formulació esmentada a l'apartat 3.1.4.1 i 3.1.4.2, aquestes es representen gràficament en funció del cabal d'entrada prenent logaritmes de la pèrdua de càrrega en funció del logaritme del cabal (Figura 11), i obtenint una recta amb la seva respectiva equació de la forma (1), que es pot igualar a l'equació potencial que utilitza el programari Fluent per caracteritzar un element amb una zona porosa (2).

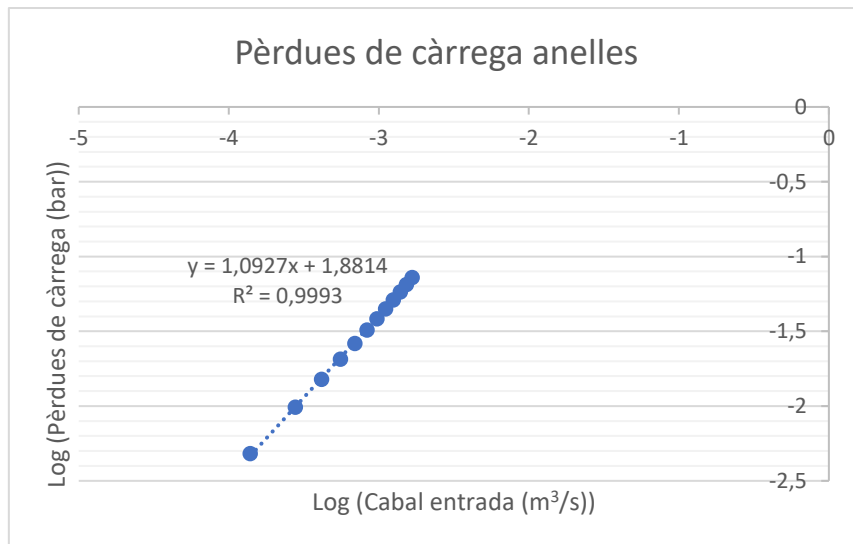


Figura 11. Pèrdues de càrrega en les anelles.

El valor del cabal i de les pèrdues de càrrega ve detallat en l'annex A Càlculs.

$$y = n + m \cdot x \quad (1)$$

$$\Delta p = C_0 \cdot v^{C_1} \quad (1)$$

On y correspon al logaritme de les pèrdues de càrrega de les anelles, n correspon al terme independent, m al pendent, x al logaritme del cabal d'entrada de les anelles.

El programari ANSYS Fluid Flow Fluent utilitza una equació pel medi porós com :

$$\Delta p = C_0 \cdot v^{C_1} \quad (2)$$

On Δp correspon a la diferència de pressions i v a la velocitat del fluid.

En aquest cas però, com que estem treballant amb cabals, substituïm la velocitat per el cabal, i el terme C_0 el denominem a i el terme C_1 el denominem b .

Reescrivim l'equació (1) de la forma:

$$\log_{10}(\Delta p) = \log_{10}(a) + b \cdot \log_{10}(Q) \quad (3)$$

Igualem l'equació (3) amb l'equació característica d'una recta (1), i obtenim que el valor y (pèrdues de càrrega) correspon a $\log_{10}(\Delta p)$, n (terme independent) correspon a $\log_{10}(a)$, m (pendent) correspon a b i x (cabal d'entrada) correspon a $\log_{10}(Q)$.

Aïllant $\log_{10}(a)=n$ obtenim el valor de a , i ja tenim que el valor de b correspon al de m .

Per poder assimilar a la fórmula (2) que utilitza el Fluent per caracteritzar una zona porosa, substituïm el cabal per velocitat, sabent que :

$$Q = v \cdot A \tag{4}$$

On v és la velocitat del fluid i A és l'àrea del cilindre que formen el conjunt d'anelles.

Obtenim així una equació de la forma:

$$\Delta p = a \cdot A^b \cdot v^b$$

Coneixent tots els valors obtenim el valor de Δp , canviant les unitats en pascals que són les que utilitza el programa, i s'obté l'equació:

$$\Delta p = 11551742 \cdot v^{1,09127} \tag{5}$$

Obtinguda a partir del càlcul analític de pèrdues de càrrega calculades per a una anella.

Assimilant l'equació obtinguda (5) amb l'equació que utilitza el programari per caracteritzar un element amb zona porosa (2) i obtenim els valors numèrics de $c_0=11551742\text{Pa}$ i $c_1=1,09217$, els quals ja podem entrar en el programari en l'apartat *Cell Zone Conditions*.

3.1.4.1. Pèrdues de càrrega primàries

La fórmula que presenta Darcy-Weisbach es pot expressar com:

$$H_{rp} = \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{u^2}{2g} \tag{6}$$

On H_{rp} són les pèrdues de càrrega primàries, λ és el coeficient de pèrdua de càrrega degut a la fricció, L és la longitud del tram, D_h el diàmetre hidràulic de la canonada per on circula el fluid, u és la velocitat del fluid i g la gravetat.

Per determinar el valor de λ , en règim laminar, que és el que s'espera tenir a l'interior de les anelles, s'utilitza l'equació:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

Es considera règim laminar aquell en que el valor del nombre de Reynolds (Re) sigui inferior a 2300. Per aquest motiu és necessari un càlcul previ, seguint l'equació de Reynolds per una secció no circular:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_s \cdot Dh}{\mu} \quad (8)$$

On ρ es la densitat del fluid, v_s la velocitat característica del fluid, D_h el diàmetre hidràulic de la secció i μ la viscositat dinàmica del fluid.

En aquest estudi, al no treballar amb canonades circulars, es substitueix el terme D per $D = 4R_{hc}$, on R_{hc} és el radi hidràulic del canal que s'obté dividint la superfície del flux, que correspon a la superfície que ocupa el fluid dins el canal, entre el perímetre mullat, el qual és el perímetre de la secció per on passa el fluid (que suposem que no està obert a la part superior degut al contacte amb l'anella superior). En la Figura 12. es poden observar amb millor claredat els dos termes.



Figura 12. Secció canal de l'anella

Els càlculs es realitzen per trobar les pèrdues de càrrega en un sol canal, donat que tots els canals són iguals i sabem el nombre de canals de cada anella i el nombre total d'anelles. Així doncs, els cabals i les velocitats utilitzades són els corresponents a un sol canal, suposant que el flux es reparteix per igual, dividint el cabal d'entrada al filtre pel nombre total de canals.

En l'anella, es defineix la primera pèrdua de càrrega primària, deguda a la fricció amb la superfície quan el flux circula per dins el canal. En aquest cas, el valor de L correspon a la longitud total d'un canal i u és la velocitat del fluid en el canal.

En la segona pèrdua de càrrega primària, el valor L correspon a la longitud de la superfície oberta un cop el flux ha sortit del canal, i en aquest cas el valor de velocitat u correspon a la velocitat de sortida del canal, que s'obté dividint el cabal d'entrada d'un canal entre l'àrea de sortida del canal, que és inferior a l'àrea d'entrada.

3.1.4.2. Pèrdues de càrrega secundàries

La fórmula per al càlcul de pèrdues de càrrega secundàries segons el factor K s'expressa de la forma:

$$Hrs = \Sigma k \cdot \frac{vc^2}{2g} \quad (9)$$

On Hrs correspon a les pèrdues de càrrega secundàries, K és un coeficient adimensional de les pèrdues de càrrega secundàries que correspon a l'expansió o a la contracció segons el cas, vc és la velocitat del fluid en el canal i g és la gravetat.

La primera pèrdua de càrrega secundària que es defineix és la deguda a la seqüència d'expansions i contraccions que es produeixen per la intersecció amb els canals de la cara de l'anella superior. En aquest cas, la velocitat del canal es considera a partir del cabal d'entrada al filtre, dividit pel nombre total d'anelles i canals per anella i dividit per la superfície de flux del canal. Es multiplica el coeficient adimensional K que en aquest cas correspon a la suma dels coeficients generals d'expansió, que és de 0,5 amb el de contracció, de 1. Aquest es multiplica per el nombre total d'interseccions que es produeixen per cada canal d'entrada de fluid.

La segona pèrdua de càrrega secundària calculada és la corresponent a la contracció que es produeix en el fluid en el pas d'entrada a les anelles. En aquesta, el coeficient utilitzat és el corresponent a la contracció en funció dels diàmetres hidràulics de les seccions:

$$K = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad (10)$$

On d fa referència al diàmetre hidràulic de la secció més petita i D al diàmetre hidràulic de la secció més gran.

Les següents pèrdues de càrrega secundàries corresponen a l'expansió de la sortida del fluid del canal a la superfície plana oberta, on el valor del coeficient correspon al d'expansió en funció dels diàmetres hidràulics de les seccions:

$$K = 0,42 * \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \quad (11)$$

Per veure més informació sobre els valors de les pèrdues de càrrega i de com s'han obtingut, veure l'annex C *Configuració del model*, en l'apartat C.2. *Configuració de les anelles*

3.2. Assaig experimental

El filtre utilitzat per l'estudi s'ha assajat de forma experimental en el laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona. El material utilitzat per a la realització de l'assaig consta d'una bomba ESPA Multi 30 5, un comptador de volum, un dipòsit d'aigua, una mànega per a l'entrada d'aigua a la bomba, una per a la sortida d'aigua, un conjunt de canonades de PVC, un manòmetre, una clau de pas i el filtre d'anelles ARKAL CURT RM. 1" 120 MESH .

L'experiment consisteix en connectar l'entrada de la bomba al dipòsit d'aigua i la sortida al comptador de volum, el qual uneix amb una clau de pas i la canonada de PVC (Figura 13). En aquest punt es fa la lectura del volum d'aigua que surt de la bomba. La canonada condueix fins al filtre, per on circula l'aigua fins sortir i retornar al dipòsit. Situat entre l'entrada i sortida del dipòsit es troba un manòmetre que mesura la pressió d'entrada i de sortida del filtre. La distància entre ambdós punts és la mateixa recreada entre els punts d'entrada i sortida en el model de la simulació.



Figura 13. Muntatge assaig experimental.

Es realitzen un conjunt de 5 assajos, modificant la velocitat de sortida de la bomba mitjançant l'acció de tancar gradualment la clau de pas de la sortida de la bomba. En cadascun dels assajos es fan 3 mesures de temps, en les que es calcula el temps que passa fins que la lectura de volum arribava a 80 litres, i es fa una mitjana del temps total obtingut en les tres mesures. Al mateix assaig, es fan 20 lectures diferents de les pressions d'entrada i sortida del filtre, obtenint així una mitjana de pressions i una diferència de pressió final.

Amb el valor de volum V i el temps T , es pot obtenir el cabal total d'entrada, sabent que la fórmula del cabal és:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (12)$$

D'aquesta manera obtenim els dos valors que es volen utilitzar per fer la comparació amb la simulació, que són la diferència de pressió i el cabal. En concret, es fa una representació gràfica de l'evolució de les pèrdues de càrrega en funció del cabal d'entrada.

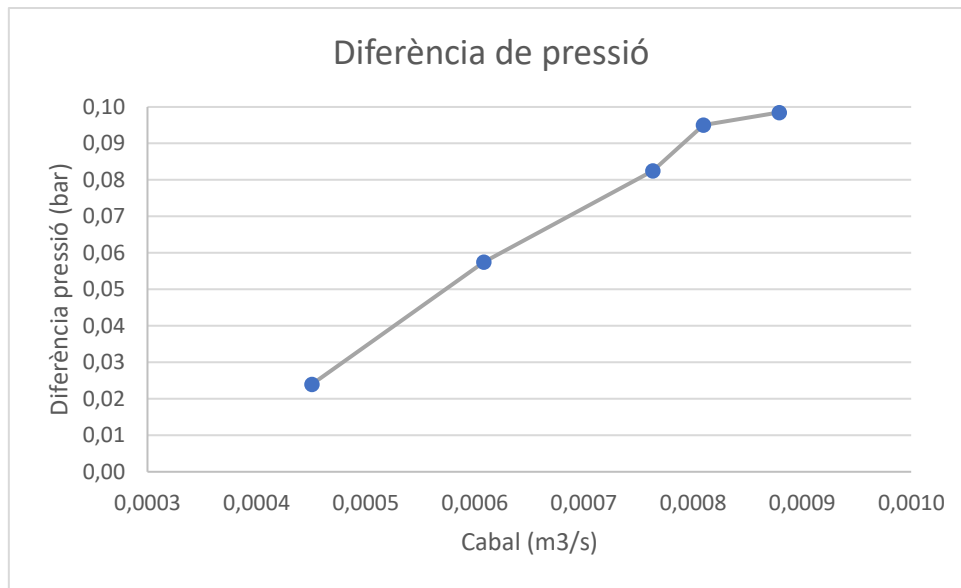


Figura 14. Gràfic resultats assaig experimental.

4. RESULTATS

4.1. Resultats experimentals

L'assaig experimental en aquest estudi té la finalitat d'obtenir unes dades reals de diferència de pèrdues de càrrega per poder fer una comparació amb els resultats de la simulació, per així poder discutir-ne la seva viabilitat i possibles millores.

Com ja s'ha mencionat en l'apartat 3.2. Assaig experimental, es realitza un experiment real en laboratori del funcionament del filtre a través d'un muntatge.

De forma alterna, es fan un conjunt de lectures del manòmetre situat entre l'entrada i la sortida del filtre, obtenint així les dades de pressió d'entrada i sortida del filtre.

Aquesta dada de pressió de sortida s'utilitza també per parametritzar la simulació.

Gràcies a les lectures del manòmetre, obtenim les pèrdues de pressió del filtre en funció del cabal d'entrada ja mencionat.

4.1.1. Assajos realitzats

L'assaig experimental parteix de la mesura del cabal amb la maneta de la clau de pas completament oberta, deixant entrar al filtre el màxim cabal que ens proporciona la bomba d'aigua. A partir d'aquí la resta de d'assajos es fan tancant la clau de pas, obtenint així un cabal d'entrada cada cop menor. En la Taula es mostren els valors de les mesures realitzades:

Taula 2. Lectures assaig experimental.

Assaig	Mesura	Volum (l)	Temps (s)	Pressió entrada (bar)	Pressió sortida (bar)
1	1.1	80	92,11	1,51	1,41
	1.2	80	90,41		
	1.3	80	90,52		
2	2.1	80	98,81	2,03	1,93
	2.2	80	98,91		
	2.3	80	98,67		
3	3.1	80	104,96	2,33	2,25
	3.2	80	105,00		
	3.3	80	104,86		
4	4.1	80	131,34	3,28	3,22
	4.2	80	131,46		
	4.3	80	131,69		
5	5.1	80	177,63	4,05	4,02
	5.2	80	177,96		
	5.3	80	176,83		

Un cop es tenen les mesures preses, es fa una mitjana del tres temps de cada assaig realitzat i podem aplicar la formula (12) per obtenir el cabal, que en aquest cas, el passem a m³/s. Es fa també una resta entre la pressió d'entrada i de sortida, per obtenir així la diferència de pressió de cada assaig. En la Taula 3 es mostren les dades finals de l'assaig, i el la Figura 15 es mostren aquestes gràficament.

Taula 3. Resultats assaig experimental

Assaig	Q(m ³ /h)	Diferència pressió (bar)
1	0,00088	0,099
2	0,00081	0,095
3	0,00076	0,083
4	0,00061	0,058
5	0,00045	0,024

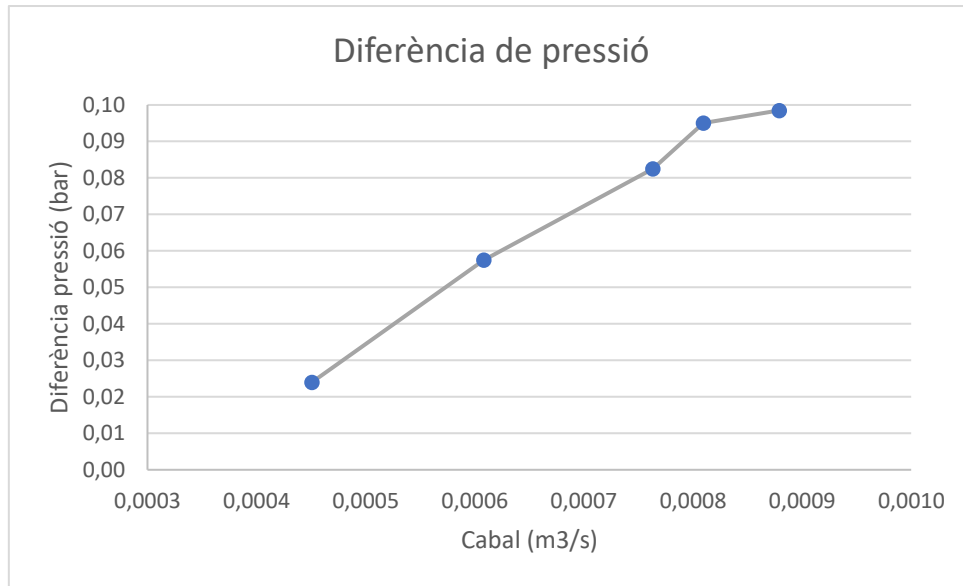


Figura 15. Resultats assaig experimental

4.1.2. Ajust i discussió dels resultats

Es procedeix a realitzar un ajust parabòlic dels resultats obtinguts representats gràficament, plantejant l'equació polinòmica de segon ordre resultant, determinant també el coeficient de correlació d'aquesta. També s'incorpora l'error produït en la mesura del paràmetre de pressió. Es pot observar l'ajust parabòlic en la Figura 16.

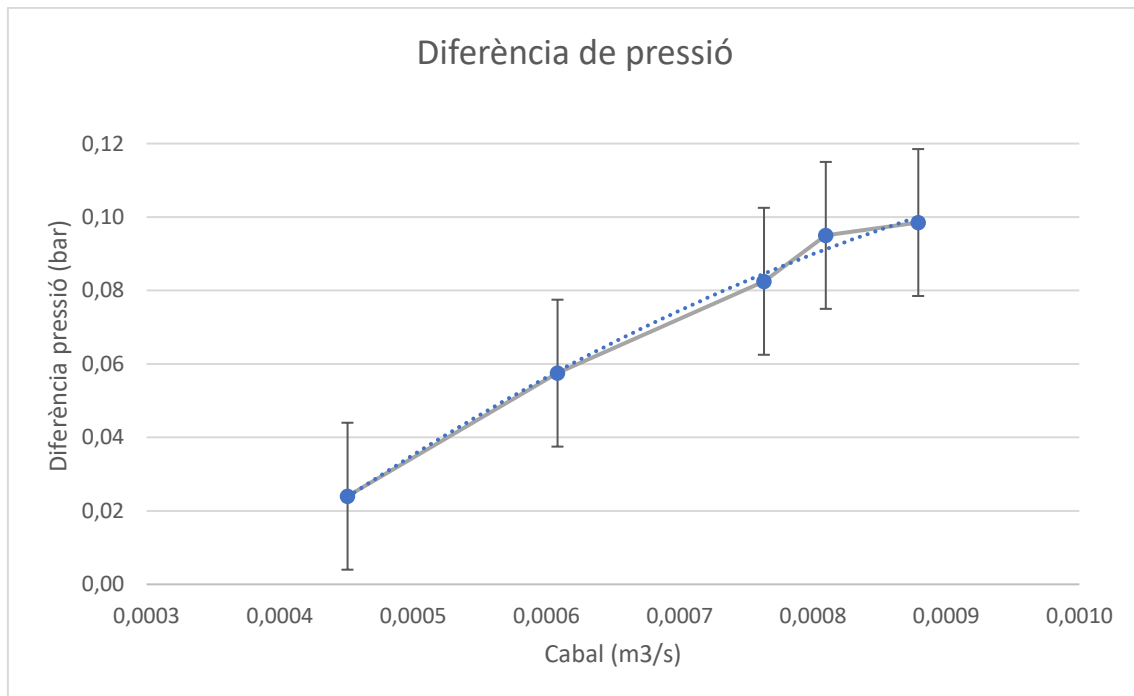


Figura 16. Ajust parabòlic de la diferència de pressió

Per a la determinació de l'error en l'eix vertical, aquest esdevindrà de la suma dels errors de la mesura de la pressió d'entrada i el de la sortida, ja que el valor final és la diferència entre els dos. Al mesurar-se amb el mateix aparell, les dues tindran el mateix error, que és de 0,01 bar. Així doncs, l'error resultant és la suma dels dos, de 0,02 bar.

Per mesurar l'error en l'eix horitzontal, com que el cabal es calcula a partir de la relació entre el volum d'entrada i el temps, s'estableix que l'error relatiu d'un quocient és la suma dels errors relatius. En quan al cabal, el seu error és la relació entre la sensibilitat de l'aparell de lectura i el valor total que mesurem, en aquest cas, de 0,1/80. Per el temps, aquest serà la relació entre la sensibilitat i el valor total mesurat. En aquest cas prenem el temps del primer assaig, que és el de menor valor i per tant el que causa més error. En total és de 0,01/91,01. Així doncs, l'error total en la mesura del cabal és la suma entre els dos errors relatius, que representa un 0,0014 o 0,14%. És per aquest motiu que es desestima la representació de l'error en el gràfic.

En quant a l'ajust dels resultats, l'equació (13) correspon al polinomi de segon grau que ajusta els resultats obtinguts de l'assaig experimental.

$$\Delta p = -143539Q^2 + 368,84Q - 0,1133 \quad (13)$$

Amb l'equació (13) es troba també el coeficient de correlació $R^2 = 0,9945$. Aquest pot oscil·lar entre el valor de 0 i de 1, indicant el grau de correlació entre les dades i l'ajust polinòmic, essent més forta com més pròxim a 1 estigui aquest valor.

Com podem observar, el valor del coeficient de correlació obtingut és molt pròxim a 1, fet que ens indica que l'ajust parabòlic s'ajusta bé a les dades presentades en el gràfic.

S'observa com les mesures de diferència de pressió augmenten clarament a mesura que augmenta el cabal d'entrada del filtre.

Els primers tres punts, corresponents als cabals més baixos, segueixen una mateixa tendència, mentre que es pot observar com els punts dels cabals més alts difereixen una mica d'aquesta. El quart punt, corresponent al cabal de 0,8 l/s, dona una diferència de pressió més alta del que caldria esperar sobresortint més que els altres punts de la tendència, mentre que el punt amb cabal més alt, torna a seguir la tendència dels punts amb cabals més baixos, essent més baix que la tendència que marca el punt anterior. Caldria repetir l'experiment amb un aparell de mesura de la pressió diferencial que fos més precís per reduir la incertesa en aquest comportament.

4.2. Resultats de la simulació

4.2.1. Introducció

L'objectiu de l'estudi és realitzar una simulació el més ajustada possible a un assaig real d'un filtre d'anelles, la qual s'ha configurat per poder extreure les dades de pressió a l'entrada i la sortida del filtre, obtenint així una diferència de caiguda de pressió resultant que es compara amb l'assaig experimental.

Amb la finalitat d'obtenir més dades per poder fer la comparació, es realitzen 5 simulacions, equivalents als 5 assajos experimentals, establint la mateixa velocitat d'entrada en el filtre i la pressió de sortida. Aquestes 5 simulacions es realitzen amb cadascuna de les 3 discretitzacions plantejades inicialment, per veure com aquestes afecten als resultats finals de l'estudi.

4.2.2. Anàlisi de pèrdues de càrrega

Com s'ha definit en l'apartat 3.1.2. es configuren 3 discretitzacions diferents, segons la mida i nombre d'elements que s'utilitzen per fer estudiar el pas del flux en el filtre.

Es realitzen les 5 simulacions diferents en cada discretització, introduint en cadascuna els diferents valors de cabal d'entrada (en forma de velocitat) i pressió de sortida. Aquests valors són mesurats en les connexions d'entrada i sortida, en una distància equivalent a la mesurada en el filtre en l'assaig experimental.

Per extreure aquestes dades de diferència de pressió, el programari simula les pèrdues que es generen per la viscositat del fluid, per la geometria del filtre i les pèrdues que genera el cilindre format per les anelles, que s'ha configurat com a medi porós assimilant-lo amb les pèrdues calculades degudes a la geometria de les anelles i el pas del fluid per aquestes.

Primerament s'analitzen les dades extretes de diferència de cabal màssic en percentatge ($\Delta\dot{m}(\%)$) per comprovar que el comportament de la simulació sigui realment estacionari. Es realitza per a la primera discretització, ja que al utilitzar la mateixa geometria i les mateixes pèrdues de càrrega, la diferència de cabal màssic en les altres discretitzacions seran similars. Es mostren els resultats en la Taula 4:

Taula 4. Variació del cabal màssic en percentatge per la discretització 1

Q (m³/s)	Δṁ(%)
0,00088	0,002
0,00081	0,065
0,00076	0,156
0,00061	0,025
0,00045	0,007

Es pot comprovar com la diferència de cabal màssic entre l'entrada i la sortida és mínim per tots els assajos, de manera que es considera que la simulació és apta en quant a situació estacionària.

En les taules 5 a 7 es poden contemplar els resultats de la variació de la diferència de pressió en funció del cabal d'entrada, per a cada una de les discretitzacions treballades. També s'extreu la diferència de cabal màssic entre l'entrada i sortida del filtre, en percentatge, per comprovar que no es produeixen pèrdues del flux en la simulació.

Taula 5. Resultats discretització 1

Q (m³/s)	P_{out} (bar)	Δp (bar)	Δṁ(%)
0,00088	1,413	0,078	0,002
0,00081	1,934	0,063	0,065
0,00076	2,248	0,059	0,156
0,00061	3,223	0,040	0,025
0,00045	4,021	0,027	0,007

Taula 6. Resultats discretització 2

Q (m³/s)	P_{out} (bar)	Δp (bar)
0,00088	1,413	0,073
0,00081	1,934	0,066
0,00076	2,248	0,059
0,00061	3,223	0,041
0,00045	4,021	0,026

Taula 7. Resultats discretització 3

Q (m ³ /s)	P _{out} (bar)	Δp (bar)
0,00088	1,413	0,076
0,00081	1,934	0,067
0,00076	2,248	0,060
0,00061	3,223	0,042
0,00045	4,021	0,027

Les taules resumeixen les dades extretes de les simulacions, corresponents a les diferències de pressió. Aquestes han estat modificades, ja que el programari Fluent treballa amb unitats de pascals [Pa] per les pressions, i velocitats d'entrada, en lloc de cabal. S'ha fet un canvi d'unitats per facilitar la posterior comparació dels resultats amb les dades experimentals.

Es grafiquen els resultats de diferència de pressió de cada discretització en funció del cabal, per poder fer un millor anàlisi (Figura 17).

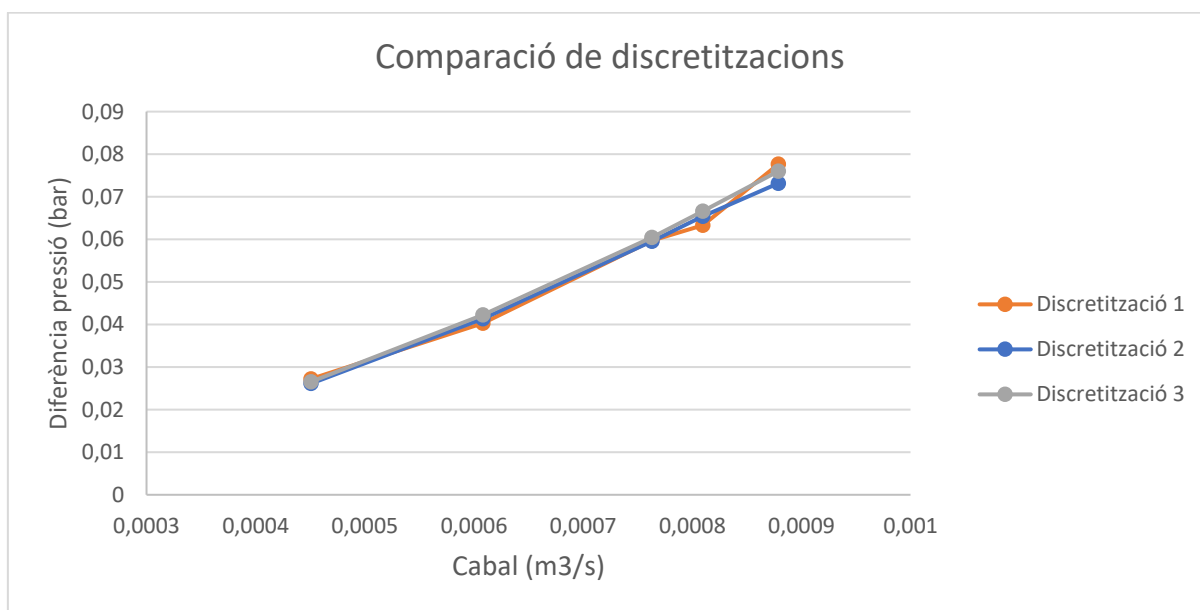


Figura 17. Gràfic resultats comparació de discretitzacions

En el gràfic es poden diferenciar en color taronja, la discretització 1 corresponent al mallat intermig, en color blau la discretització 2, que correspon al mallat més fi, amb més nombre d'elements i en color gris la discretització 3, corresponent al mallat més gran, amb menor nombre d'elements.

Podem observar com les diferències de pressió augmenten a mesura que augmenta el cabal d'entrada en el filtre, de la mateixa manera en les tres discretitzacions diferents. En general, la discretització 3, que seria la menys precisa, obté uns resultats de pèrdua de càrrega més elevats, ja que per tots els cabals s'obtenen més pèrdues, excepte per el cabal més alt, on la discretització 2 obté més pèrdues. S'observa com en els dos últims punts, de cabal més elevat, és on les discretitzacions difereixen més entre elles, fent èmfasis en el punt on el cabal és de $0,00080974 \text{ m}^3/\text{s}$, on s'observa clarament com la discretització numero 1, la de mallat intermig respecte el nombre d'elements i tamany d'aquests, obté una pèrdua de càrrega relativament inferior a la resta i es desvia de la tendència que tenia respecte els punts anteriors.

En general, s'observa com la discretització 2, la qual està formada per un mallat molt més fi, amb elements més petits i major nombre d'aquests, és la que obté un comportament més regular de pèrdua de càrrega, respecte les altres dues discretitzacions. Amb tot, la utilització de la discretització 1 per a la discussió dels resultats es proposa com adient ja que els resultats de pèrdues de càrrega són inferiors en un 6,41%, com a molt, respecte al cas del mallat més fi.

4.2.3. Distribució de la pressió

Una vegada és coneguda la diferència de pressió que es produeix entre l'entrada i la sortida, és útil poder conèixer amb més profunditat com es distribueix aquesta pressió al llarg del pas del fluid a l'interior del filtre. S'utilitza la simulació corresponent al cabal més petit de la discretització 2 ja que és la intermèdia entre les tres, pel que fa a nombre d'elements del mallat, i és el cabal on les 3 discretitzacions obtenen resultats més similars en quan a pèrdues de càrrega (Figura 18)

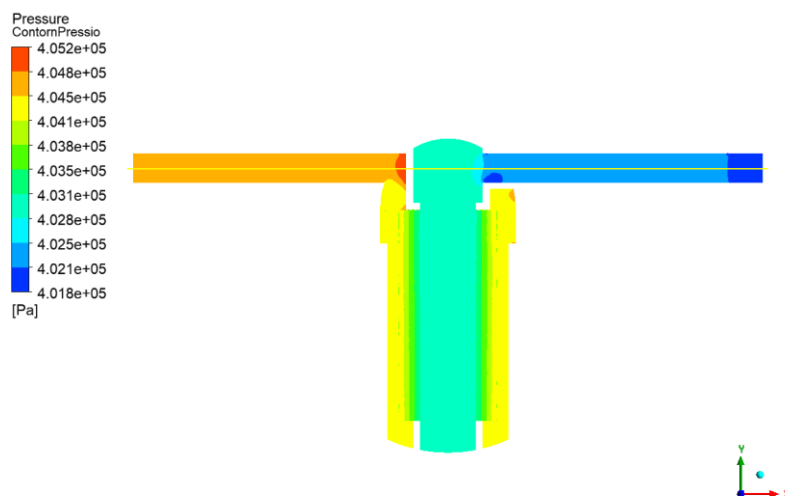


Figura 18. Distribució de pressió a l'interior del filtre en el pla de simetria.

La Figura 18 ens mostra en colors com es distribueix la pressió al llarg del filtre, en pascals. Els colors taronges i vermells corresponen a les pressions més altes, els colors groc i verd representen zones amb pressions mitjanes i els colors blaus les més petites.

Es pot observar clarament com la pressió és molt més alta a l'entrada del filtre, que és de l'ordre de 404800 Pa, mentre que en la sortida és més petita, de l'ordre de entre 402100 i 401800 Pa.

En el punt on s'acaba el conducte d'entrada del fluid i aquest arriba a l'interior del filtre, es produeix un augment de la pressió, degut al xoc del flux del fluid amb la paret que redirigeix el flux incident cap a tot el cos del filtre.

El fluid s'acumula al voltant de les anelles, disminuint la pressió respecte l'entrada. S'observa com la pressió a l'interior de les anelles és de l'ordre de 403800 Pa, que disminueix quan les ha traspassat per l'efecte de la pèrdua de càrrega del seu pas, i quan finalment arriba a l'altura de sortida, ja arriba als valors més baixos de pressió fins sortir completament del sistema.

S'observa com a l'entrada del canal de sortida, es produeix una caiguda de pressió considerable, que correspon al pas del fluid de la secció interior, don segueix una direcció vertical, al conducte de sortida que segueix una direcció horitzontal.

4.2.4. Línies de corrent i velocitat del fluid

En relació al punt anterior, on s'analitza la distribució de la pressió en el filtre, és útil poder fer un seguiment del corrent i de la velocitat del fluid, per poder entendre millor els resultats de pressions a l'interior del filtre, així com els punts més característics.

En la Figura 19 es poden veure les línies de corrent corresponents al recorregut que fa el flux del fluid, mentre que en la Figura 20 es poden observar els vectors de velocitat del fluid, que ens ajuda a entendre millor el recorregut i les pressions del fluid.

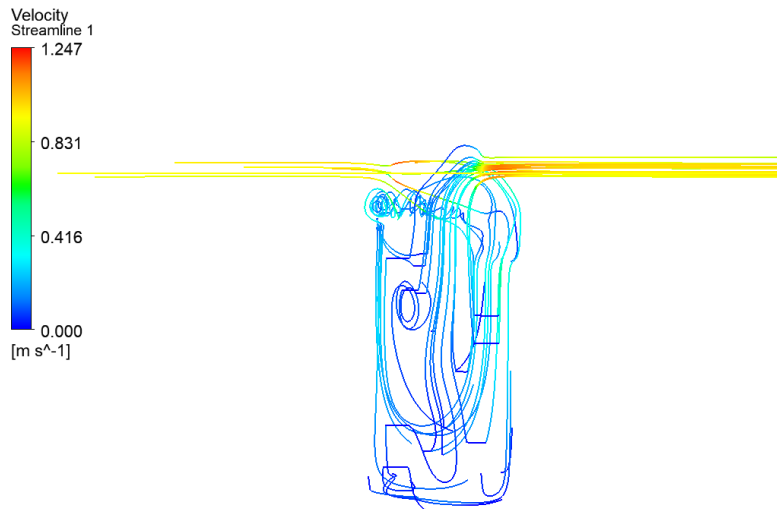


Figura 19. Línies de corrent del fluid

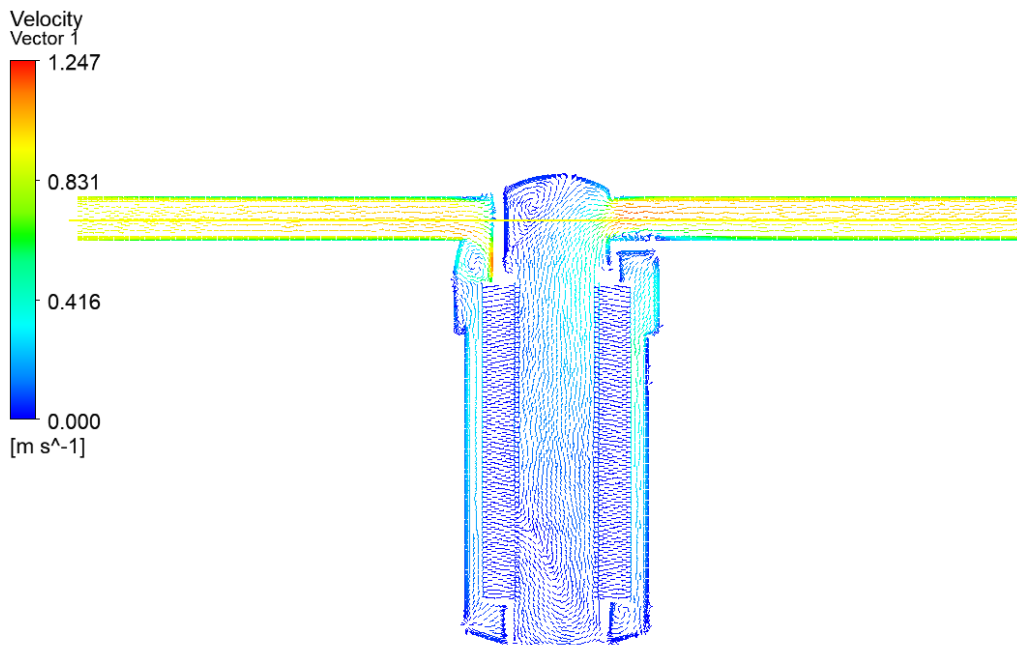


Figura 20. Velocitat del fluid

En la Figura 19 podem observar el recorregut que fa el fluid a l'interior del cilindre. En aquest cas el programa pren 30 punts a l'atzar i descriu la trajectòria que segueixen al llarg de la simulació. El color que pren aquesta trajectòria depèn de la velocitat, en m/s. Els colors vermells corresponen a les velocitats més altes, mentre que els blaus corresponen a les més baixes.

La Figura 20 mostra en vectors la velocitat del fluid, seguint el mateix criteri de colors per la llegenda.

Observem com les velocitats a l'entrada i la sortida del filtre són molt similars, de l'ordre d'entre 0,831 i 1,247 m/s. Un cop el fluid arriba al final del conducte d'entrada i entra a la part interior del cilindre, s'observa com es crea una petita turbulència deguda al xoc d'aquest contra la geometria interior i li costa començar a distribuir-se al voltant de les anelles. Aquest és el mateix punt on en la Figura 18 mostrava un augment de pressió del fluid. En la Figura 19 s'observa com les línies de corrent tendeixen a entrar en les anelles per la part més baixa d'aquestes, però en la Figura 20 es mostra com el fluid traspasa correctament tota la zona de les anelles, amb la mateixa velocitat al llarg de tot el cilindre que forma el conjunt.

Una vegada traspassades les anelles, es genera una petita turbulència en la zona més baixa d'aquestes. S'observa com part del flux circula en direcció cap a baix, que correspon en el punt on tendeix a entrar més flux de fluid, com ens mostra la Figura 20, però s'observa com finalment acaba seguint un recorregut ben definit cap a la part superior, per accedir al canal de sortida. La simulació ens mostra com la velocitat del fluid augmenta a mesura que aquest ascendeix per accedir a la sortida.

En aquest punt de pas entre la zona de les anelles i la sortida és on es genera una altra turbulència i un augment de la velocitat del fluid, degut al pas de una secció més gran, que és l'interior del cilindre de les anelles, cap a una secció més petita que és la del conducte de sortida, on la velocitat del fluid augmenta fins arribar al punt de sortida de la simulació.

5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS

Com a finalitat de l'estudi, en aquest apartat s'analitzen els resultats obtinguts de les simulacions realitzades amb els resultats dels assajos experimentals, amb l'objectiu de discutir sobre la validesa de la metodologia utilitzada en la preparació del model de simulació.

Representem gràficament en la Figura 21 les dades obtingudes de pèrdua de càrrega en funció del cabal, tant de la simulació, amb les respectives discretitzacions, com de l'assaig experimental.

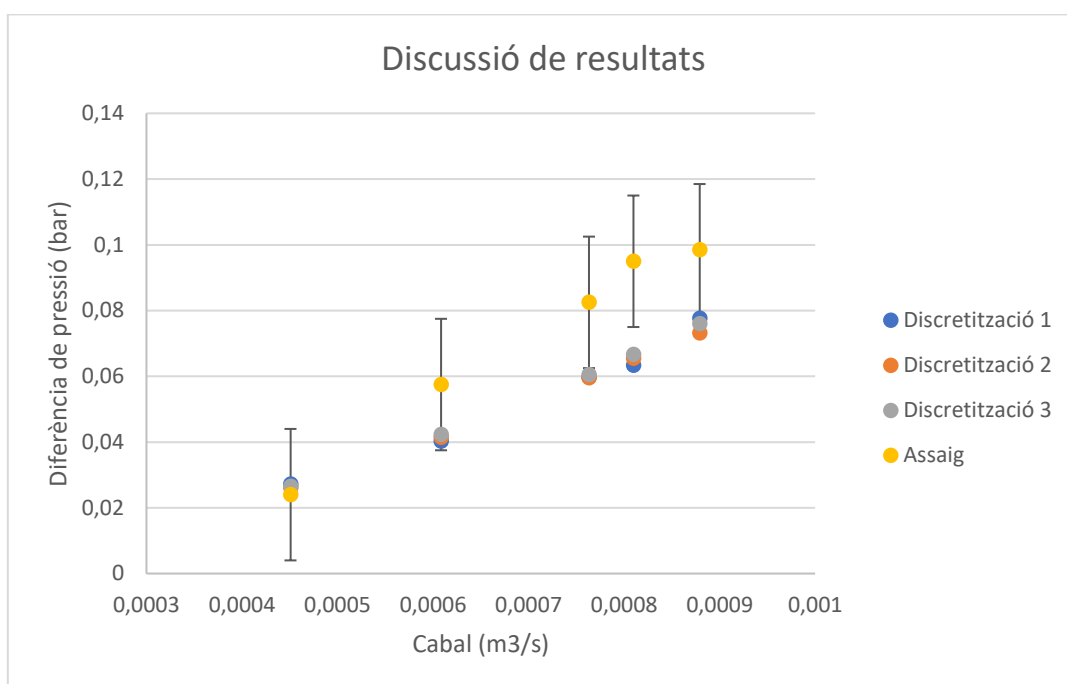


Figura 21. Discussió de resultats

Es pot observar com les pèrdues de càrrega en l'assaig experimental són clarament superiors a les obtingudes amb les simulacions realitzades per a cabals elevats. A mesura que augmenta el cabal, augmenta la distància entre les diferències de pèrdua de càrrega experimentals i simulades. Aquest fet ens demostra que les discretitzacions a partir de les dimensions del mallat no ens afecten en assolir un millor ajustament amb les dades reals, sinó que afecten en obtenir un ajustament més estable al llarg de la simulació.

El comportament de pèrdues de càrrega és similar tant en l'assaig experimental com en la simulació, i és que aquestes s'incrementen a mesura que augmenta el cabal d'entrada.

Per això s'observa com l'increment de les pèrdues de càrrega en funció del cabal és més elevat en l'assaig de laboratori, ja que en el punt amb menor cabal, l'assaig mostra una pèrdua de càrrega més petita que les simulacions, però quan augmenta el cabal, les pèrdues experimentals creixen de forma molt més pronunciada que no pas en la simulació.

Un aspecte remarcable és que, en cabals més elevats, les pèrdues de càrrega reals són menys estables que les simulades, ja que es produeix un augment bruscat en el penúltim cabal més alt, essent aquest més alt que la tendència de la resta, en canvi en l'últim disminueix considerablement. Caldria repetir l'assaig amb aigua neta amb aparells més precisos per a mesurar la pressió, per comprovar si aquest comportament es repeteix.

Podem argumentar així, que el filtre té un comportament més inestable com major és el cabal d'entrada. Un dels motius pels quals pot succeir això es pot explicar amb els resultats obtinguts en el punt 4.1.2. Anàlisi de pèrdues de càrrega, en el que la simulació ens mostrava com, degut a la geometria del filtre i la naturalesa de l'element filtrant, el fluid no es distribuïa equitativament de la mateixa manera al llarg del cilindre que formen les anelles, sinó que aquest circulava al voltant de l'interior del filtre de forma no ordenada, presentant una sèrie de turbulències abans d'entrar en els canals de les anelles i després de sortir-ne i, creant així, una tendència en el flux a entrar en els canals de les anelles de la part més inferior. Aquestes turbulències feien que es generessin punts en el filtre on les velocitats augmentaven i, en conseqüència, la pressió. D'aquesta manera, es pot entendre que com major és el cabal d'entrada, major és la velocitat, per tant més problemes de turbulència i punts amb augment de velocitat i pressió hi haurà a l'interior del filtre.

Es pot comprovar però com en els punts de velocitats més elevades, els resultats de les simulacions no entren dins el marge d'error dels resultats experimentals. És per això que no podem considerar que els resultats de les simulacions siguin propers als experimentals.

Un fet que pot ser causant de la diferència entre els resultats obtinguts és la determinació dels paràmetres C_0 i C_1 . Aquests valors, corresponents a les propietats filtrants de les anelles, s'han determinat a partir de la geometria d'aquestes i d'un càlcul analític independent de les pèrdues de càrrega que genera. Per comprovar si algun altre ajust hagués sigut més pròxim als resultats experimentals, es comproven diferents configuracions de paràmetres per a les variables C_0 i C_1 .

Es fa una taula amb les diferents combinacions possibles dels valors de C_0 i C_1 en funció de les velocitats obtingudes en els assajos, els resultats corresponents a la caiguda de pressió, en Pascals.

Taula 8. Diferència de pressió (Pa) segons configuracions possibles de C_0 i C_1

		Velocitat (m/s)				
C_0	C_1	0,89	1,20	1,50	1,59	1,73
9500000	1	2930,28	4456,48	6235,12	6819,49	7722,18
9500000	1,06	2533,07	3953,57	5633,19	6189,52	7051,55
11500000	1	3290,28	4941,22	6844,51	7465,92	8424,33
11500000	1,06	2809,28	4332,19	6116,30	6704,60	7611,36
13500000	1	3649,80	5427,11	7452,70	8109,73	9125,66
13500000	1,06	3085,69	4711,50	6599,23	7218,59	8173,67
13500000	1,12	2652,68	4152,20	5922,70	6507,67	7411,77

A partir dels resultats extrets, representem gràficament les diferents caigudes de pressió en comparació amb els resultats experimentals. Veure Figura 22.

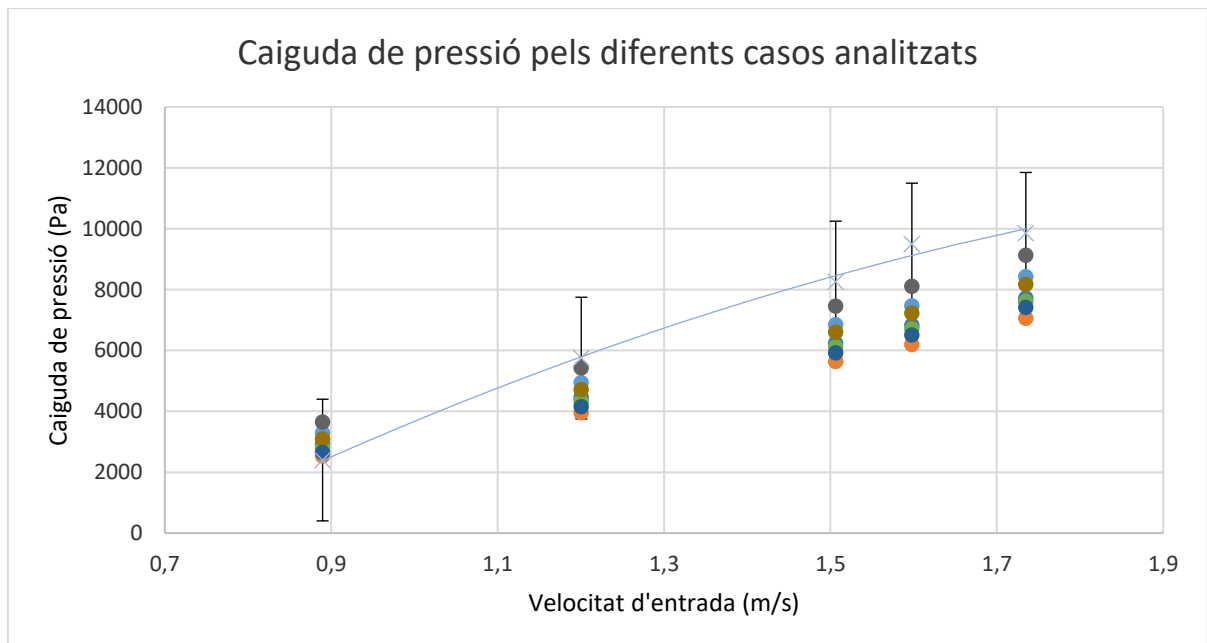


Figura 22. Caiguda de pressió per diferents valors de C_0 i C_1

Es pot observar com en aquest cas sí que hi ha alguns punts que entren dins els marges d'error de les mesures experimentals de caiguda de pressió. En concret només hi ha

dos punts que ho assolixin, que són els corresponents als valors de 13500000 per C_0 , en ambdós casos, i de 1 i 1,06 per els valors de C_1 .

Podem determinar d'aquesta manera que modificant l'ajustatge realitzat per simular el comportament filtrant dels elements és possible realitzar una simulació més ajustada al comportament del filtre.

Tot i així, podem observar com les simulacions obtenen uns valors amb una tendència que no s'assimila al comportament dels valors experimentals, amb un augment de la caiguda de pressió en funció de la velocitat menys intensa.

6. CONCLUSIONS

Un cop ha finalitzat l'estudi del filtre d'anelles *ARKAL curt 1"* (Arkal, 2017) es pot concloure que s'han assolit els objectius inicialment proposats però que es poden incorporar millores en simular la propietat filtrant de les anelles.

Inicialment s'ha fet un assaig al laboratori on s'han variat les velocitats de cabal d'entrada, amb valors des de 0,89 a 1,73 m/s, els quals s'han calculat a partir d'un comptador de volum i sabent el diàmetre de la secció de la canonada. Per cada velocitat s'han realitzat tres assajos per fer una mitjana de les lectures preses del temps en que tarda el comptador en indicar 80 litres. En cadascuna d'aquestes, es prenen un conjunt de mesures de pressió d'entrada i de sortida al filtre, per fer una mitjana de la pèrdua de càrrega total per aquell determinat cabal.

Per realitzar les simulacions, s'han efectuat una sèrie de càlculs analítics a partir de les geometries de les anelles, per obtenir una expressió de la pèrdua de càrrega de les anelles en funció de la velocitat del fluid. Amb aquesta expressió, es pot assimilar l'equació que utilitza per defecte el programari ANSYS Fluid Flow Fluent per caracteritzar un medi porós, la qual és de tipus potencial. A través d'uns ajustatges obtenim els valors dels coeficients C_0 i C_1 , necessaris per introduir en l'equació i així caracteritzar la pèrdua de càrrega al pas de les anelles en el procés de simulació

S'ha generat la geometria 3D del filtre, les anelles i la geometria corresponent al fluid, utilitzant els programes SOLIDWORKS i ANSYS Design Modeler. S'han determinat tres discretitzacions de mallat diferents per veure com poden afectar en els resultats i, finalment, s'han seleccionat una sèrie de paràmetres per assimilar el comportament de la simulació a l'assaig experimental, definint també que el paràmetre d'entrada correspon als cabals obtinguts en l'assaig i que el paràmetre de sortida correspon a la pressió de sortida també obtinguda en l'assaig experimental.

En quant a la metodologia establerta per a la configuració de les simulacions, tant la modelització de la geometria com la determinació dels paràmetres previs a la simulació han sigut satisfactoris.

La geometria ha recreat completament el filtre comercial utilitzat per l'estudi, i a través del programari s'ha pogut definir de forma satisfactòria les geometries internes que genera el fluid, així com identificar i classificar les diferents superfícies per la preparació de la simulació.

En quan al mallat, aquest s'ha intentat precisar al màxim per obtenir els valors més reals possibles, partint de tres discretitzacions diferents per poder fer una comparativa final de l'afectació d'aquestes en els resultats. S'han aplicat millores en la definició d'aquestes per agilitzar les simulacions i, com s'ha pogut comprovar en l'estudi, els paràmetres de comprovació reflectien uns resultats molt bons en quant a qualitat del mallat.

Distingim dos tipus de resultats, els qualitatius i els quantitius.

Els qualitatius ens permeten observar com és el comportament de la simulació. Aquesta ha permès recrear exitosament el comportament del fluid a l'interior del filtre, tant en els recorreguts com en les velocitats i pressions. Com s'ha pogut analitzar en els resultats, les diferències de pressió augmenten a mesura que augmenta el cabal d'entrada, de la mateixa manera que ens ha permès aprofundir en el comportament del fluid a l'interior del filtre, veient que les anelles no filtren uniformement el fluid, sinó que aquest tendeix a accedir primer a través de les anelles inferiors, igual com s'ha pogut observar que el fluid es dispersa en entrar al filtre i no totes les partícules de fluid segueixen les mateixes trajectòries, generant així diferents turbulències. Tot i així, totes traspassen a través de les anelles filtrants i segueixen de forma exitosa el recorregut esperat fins la sortida del filtre.

El segon tipus de resultats són els quantitius, els quals ens han servit per comparar, primerament, les tres discretitzacions diferents utilitzades i, posteriorment, fer una comparació amb els valors de l'assaig experimental. Per fer-ho ens hem basat en analitzar els valors de pèrdua de càrrega obtinguts.

En la comparació de les diferents discretitzacions hem pogut comprovar com els resultats obtinguts són similars per totes, de la mateixa manera que s'ha pogut mostrar com els resultats de la discretització que utilitza més nombre d'elements és la que té un millor ajustatge envers les altres, tot i que el comportament segueix essent el mateix.

Finalment, en la comparació dels resultats experimentals amb els de les simulacions s'ha pogut observar com el comportament no és del tot assimilable en ambdós casos. S'ha observat com el comportament experimental del filtre no és del tot lineal, sobretot en cabals alts. En el cabal més baix existeix una diferència màxima del 13%, mentre que en la velocitat més alta és del 35%. Un dels causants de la diferència poden ser les turbulències que es generen a l'interior del filtre, fent que no totes les anelles del filtre treballin per igual, ja que el fluid té tendència a incidir en les de la part inferior, produint així irregularitats en l'element filtrant.

Un altre causant en la discordança dels comportaments és la determinació dels paràmetres C_0 i C_1 . Aquests han sigut determinats a partir del càlcul analític independent de les pèrdues de càrrega degudes a la geometria de les anelles filtrants, però al fer-ho s'ha tingut en compte que aquests coeficients serien constants al llarg de la variació del cabal, ja que és la suposició amb la que treballa per defecte el programari ANSYS.

S'ha representat quines pèrdues de càrrega s'obtidrien per diferents valors dels paràmetres C_0 i C_1 , obtenint així dues opcions en que tots els resultats es troben dins el marge d'error de les lectures experimentals, però igualment es segueixen basant en una suposició de paràmetres constants a mesura que augmenta el cabal.

Podem concloure de l'estudi que l'equació que utilitza el programari ANSYS per assimilar les pèrdues de càrrega de les anelles no és la idònia, ja que no representa el mateix comportament que tenen aquestes, observades en assaig experimental.

Per obtenir millores, s'hauria d'utilitzar una bomba amb més potència per poder realitzar assajos experimentals amb cabals més elevats, i utilitzar un sensor de pressió diferencial més precís, obtenint així més informació de quin comportament té el filtre en aquests.

En referència a la simulació, no es pot acceptar com a vàlida la representació que fa de les pèrdues de càrrega al pas de les anelles que té per defecte, sinó que s'hauria de determinar manualment quina és a partir de la realització d'assajos experimentals amb més dades de cabals elevats.

El present projecte consta dels següents documents:

Document 1. Memòria i Annexos

- Annex A. Geometria
- Annex B. Discretització del model
- Annex C. Configuració del model
- Annex D. Resultats

Document 2. Pressupost

- Annex al pressupost

8. BIBLIOGRAFIA

ANSYS, Inc. (2022). ANSYS Fluent 12.0 User's Guide 18. Canonsburg, EEUU.

FESMEX, Fluid Equipment Supply. Perdidas por Fricción en Tuberías (esmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/, 22 de gener de 2020).

Regaber, Filtro de anillas 1", 1½" y 1", 1½" Largo. Riegos Iberia Regaber S.A. Barcelona.

Sang-ink Lee, Jin-Yong Choi and Won Choi. Effect of Groove Shape on Head Loss and Filtration Performance of Disc Filters. College of Agriculture and Life Science. Seoul National University, Seoul. 2021.

A GEOMETRIA

A.1 Dibuix CAD

Per poder reconstruir la geometria del filtre per utilitzar en la simulació, s'han dibuixat les diferents peces que formen el filtre mitjançant el programari SOLIDWORKS i posteriorment s'ha fet l'assemblatge.

La primera peça que es fa és la carcassa del filtre. Es dibuixa la meitat del contorn exterior, i s'aplica una operació de revolució respecte l'eix que travessa l'eix Y, creant així tot el contorn exterior del filtre. En la Figura 23 es pot observar el perfil del croquis utilitzat.

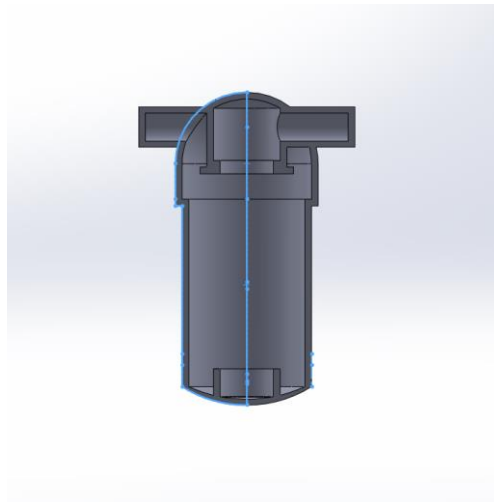


Figura 23. Croquis 1.

En la mateixa secció, es dibuixa la meitat superior del conducte d'entrada i de sortida del filtre, per posteriorment poder fer una revolució respecte l'eix en X. Un cop generada, es crea una extrusió amb la mida del diàmetre interior del conducte, per fer que aquest estigui buit per dins i pugui circular el fluid. Amb aquesta operació no tallem completament la geometria del conducte, sinó que deixem un petit gruix tant a l'entrada com en la sortida, ja que necessitem que el perfil estigui tancat per obtenir la geometria del fluid.

Es prossegueix en fer un buidat interior del filtre. Per fer-ho, es realitza un croquis del perfil interior del filtre, similar a l'exterior però en dimensions més reduïdes, respectant el gruix de diferència que hi ha entre la part interior i exterior. Es realitza un tall per revolució per eliminar tot el material interior del filtre.

L'últim pas per acabar la primera peça, es dibuixar la meitat del perfil dels dos elements interiors que subjecten el cilindre d'anelles. Seguidament es fa una operació de revolució respecte l'eix vertical Y.

La següent peça que es dibuixa, no s'utilitza posteriorment en l'assaig, ja que la complexitat de la geometria dificultava molt el procés de parametrització del mallat, i generava molts problemes en la simulació. La seva realització és merament addicional per comprendre el muntatge del filtre.

Per realitzar-lo, es parteix de la revolució d'un element circular que en conforma la base. Sobre d'aquesta, es crea una segona revolució en forma de trapezi, considerant aquesta la base superior. Es pot veure en més detall l'operació en la Figura 24.

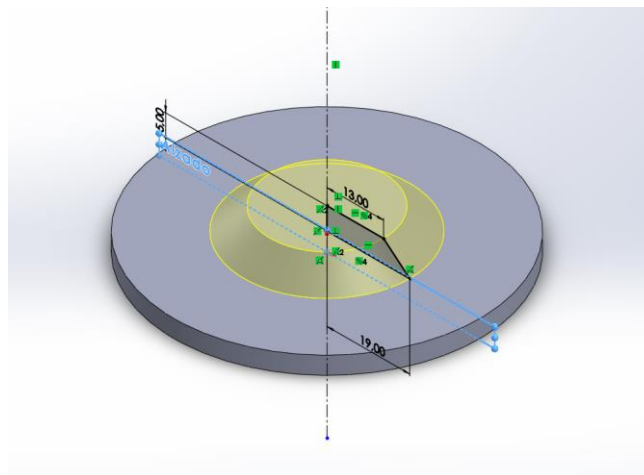


Figura 24. Revolució de la base

En la base superior, es dibuixen tres perfils de forma triangular, els quals s'extreuen en 179 mm d'altura. En el mateix pla de la base, es dibuixa una secció circular en el punt central de la base, que s'extreueix 130mm, creant així el suport central de l'estructura.

Per unir les barres de l'estructura exterior amb la interior, es dibuixen tres perfils en forma de rombe en cada suport exterior, a una distància de 32 mm entre elles, estant el perfil més inferior a 32 mm també de la base. Es pot observar en més detall el perfil en la Figura. Seguidament, s'extreuen aquests perfils fins connectar amb el perfil cilíndric interior.

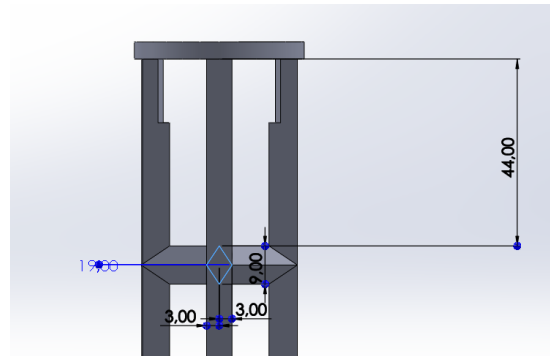


Figura 25. Extrusió perfil de rombe.

En la vista superior de la Figura 25, es dibuixa una forma circular de diàmetre 40 mm que uneix les tres barres de suport exteriors. Es talla per extrusió la part interna, en un diàmetre de 30 mm i una profunditat de 19 mm, tallant així també part de les barres de suport. Es pot observar amb més claredat les dos operacions en la Figura 26 i la Figura 27.

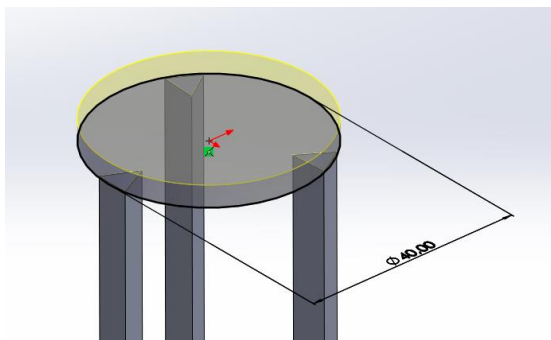


Figura 26. Sortint per extrusió

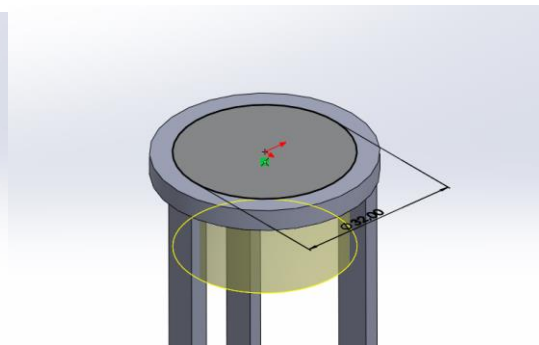


Figura 27. Tall per extrusió

D'aquesta manera queda construïda la peça de l'estructura interior que suporta les anelles. En la Figura 28 es mostra el resultat final.

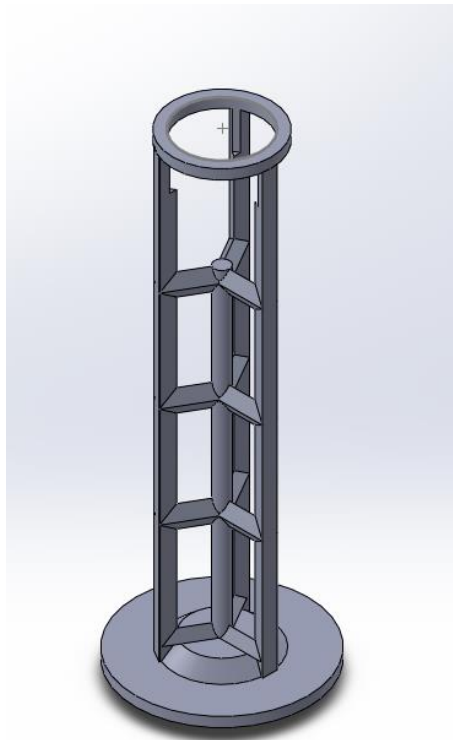


Figura 28. Suport interior de les anelles.

Per últim es crea el cos corresponent a les anelles. Com ja s'ha mencionat prèviament en l'estudi, la geometria del conjunt d'anelles es considera com un cilindre massís amb un forat interior.

Des del perfil de planta, es dibuixa una circumferència de diàmetre 70 mm, corresponent al diàmetre exterior de les anelles. Es selecciona la figura, i es crea una operació de sortint per extrusió, amb una alçada total de 142 mm. Un cop generat el cilindre, es dibuixa una circumferència de diàmetre 40 mm, per generar una operació de buidat per extrusió, creant així el forat interior de les anelles. En la Figura 29 i la Figura 30 es pot observar els detalls de les operacions

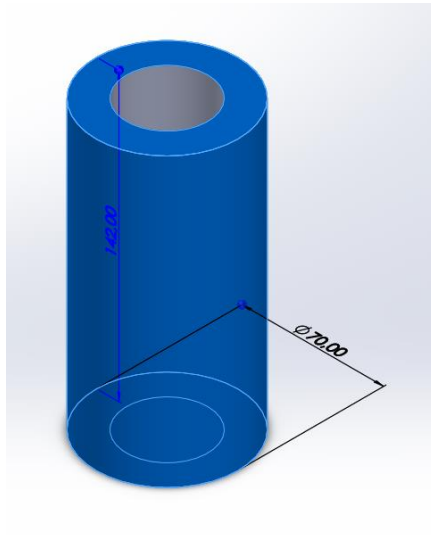


Figura 29. Sortint per extrusió

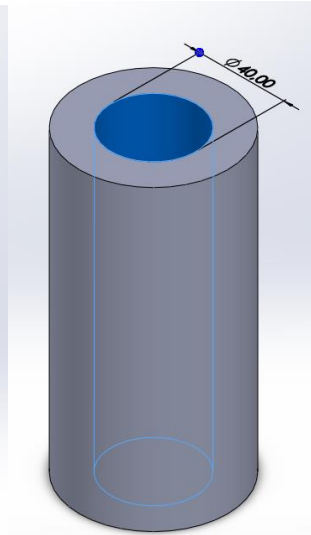


Figura 30. Tall per extrusió

Un cop s'han generat les peces que conformen el filtre, s'uneixen mitjançant un assemblatge. Es remarca que l'element de suport interior del cilindre es suprimeix de l'assemblatge per motius d'optimització de la simulació ja que, com s'ha mencionat prèviament, la complexitat de la seva geometria genera problemàtiques en el mallat de la simulació, derivant això a problemes en l'hora de realitzar la simulació.

Es procedeix a entrar doncs les peces corresponents a la carcassa i les anelles del filtre en l'opció d'assemblatges del SOLIDWORKS.

Per definir les posicions relatives d'un cos respecte l'altre, es defineixen unes relacions de posició per recrear les condicions reals. Primerament es defineix una relació de posició de contacte entre la cara superior del cilindre de les anelles i la superfície de l'acoblament superior de l'interior del cilindre. Es defineix la mateixa relació de posició per la cara inferior del cilindre i la superfície de l'acoblament inferior de l'interior del cilindre. Per últim, es defineix una relació de posició de concentricitat entre el diàmetre interior del cilindre, i els diàmetres de l'acoblament superior i inferior.

En la Figura es pot veure el resultat final de l'assemblatge. Aquesta és la geometria que s'utilitza per definir en el Design Modeler d'ANSYS la geometria del flux del fluid que circula per dins el cilindre.

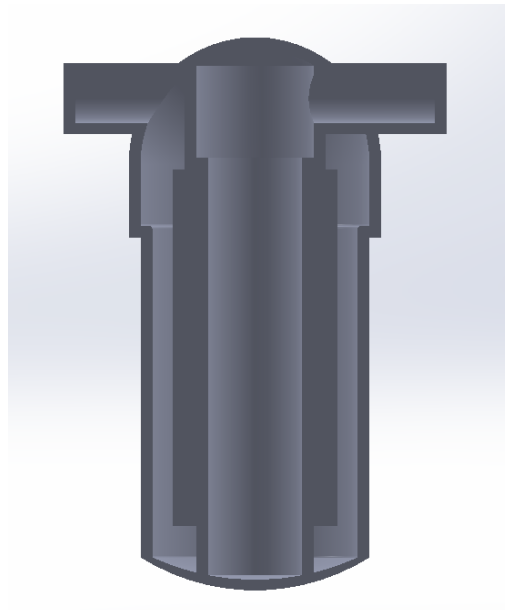


Figura 31. Assemblatge de la geometria.

A.2 Geometria del fluid

Un cop obtinguda la geometria del filtre, podem obtenir la geometria del fluid que circula pel seu interior a partir del programari ANSYS Design Modeler.

Importem la geometria en el programa, i el procediment per obtenir la del fluid consisteix en generar el negatiu de l'interior del filtre, és a dir, obtenir la geometria de la part buida de l'assemblatge del cilindre, que correspon als espais que ocuparà el fluid.

Aquest procés es farà mitjançant una operació booleana de resta, que consisteix en restar un cos d'un altre. Per fer-ho, es genera un cos, en aquest cas un cilindre, que es sobreposi totalment al filtre, fent que així el filtre quedi contingut a l'interior del cilindre. Veure Figura 32. Amb això aconseguim que les cavitats interiors del filtre quedin ocupades per la nova geometria. Fem l'operació booleana de resta entre la carcassa exterior del filtre i el cilindre generat, definint que volem que ens conservi el cos del filtre. Veure Figura 33. D'aquesta manera, s'elimina tota la part del cilindre que quedava a l'exterior del filtre, i es conserva el material del cilindre que està a l'interior del filtre. Aquest material és el que conforma la geometria del fluid en l'interior del filtre. Veure Figura 34.

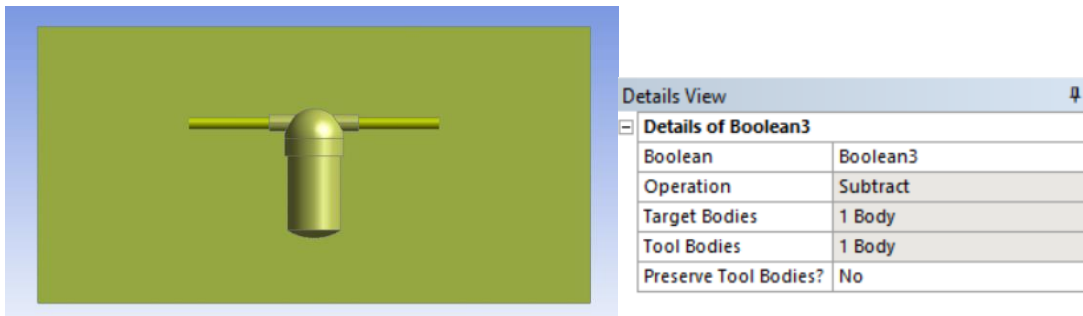


Figura 32. Filtre contingut a l'interior del cilindre Figura 33. Detalls operació booleana

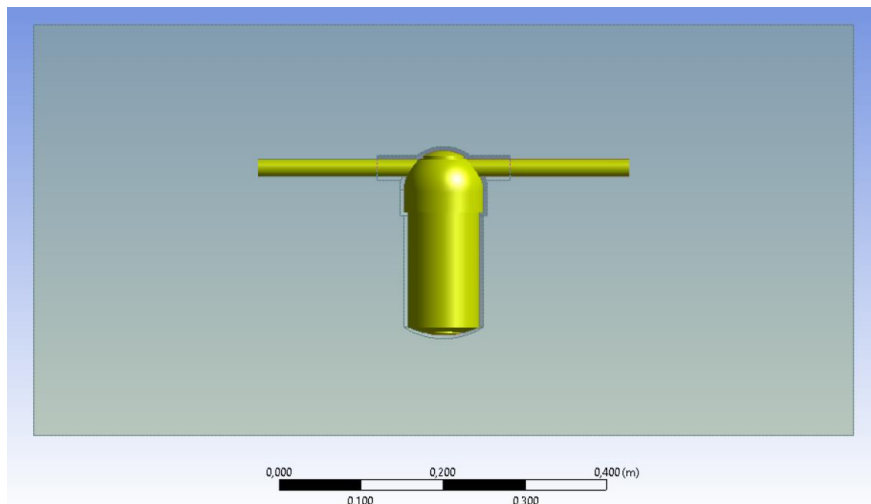


Figura 34. Geometria resultant interior del filtre.

A partir d'aquí, ja tenim la geometria amb la que es treballa en l'estudi, que correspon a la geometria del flux del fluid.

El següent pas és definir quina part de la geometria correspon al flux d'entrada, i quina part al flux de sortida.

Per fer-ho, fem una operació anomenada Slice, que ens permet dividir el filtre per la meitat, en l'alçat, i així tenim una millor visió de la geometria. Això també ens és útil per la posterior configuració de la simulació, on entrem els paràmetres de la simulació per la meitat de la geometria, aprofitant el pla de simetria del cos.

Amb la vista de la secció, com es pot veure en la Figura, podem apreciar com la geometria interna del filtre queda dividida en dues; una part correspon a l'entrada del fluid fins arribar a la zona de les anelles i l'altra a la sortida, que va des del forat interior del cilindre de les anelles a la sortida. Definim així aquests dos cossos diferents com a entrada i sortida.

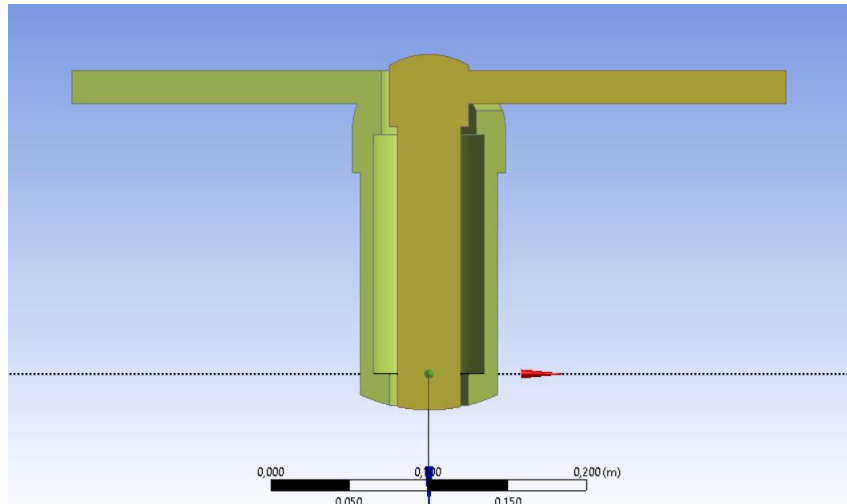


Figura 35. Secció alçat geometria interior del filtre.

Un cop tenim la geometria interior, l'últim pas és crear una geometria nova corresponent a les anelles. Anteriorment, aquestes venien unides al filtre, ja que la geometria era tot un assemblatge i ens ha servit per poder generar la geometria interior. Per poder seguir amb la simulació però, necessitem generar de nou aquesta geometria que anomenarem anelles.

Primerament es crea un nou pla en la superfície que correspon a la base del conjunt de les anelles. Es pot veure amb més claredat en la Figura.

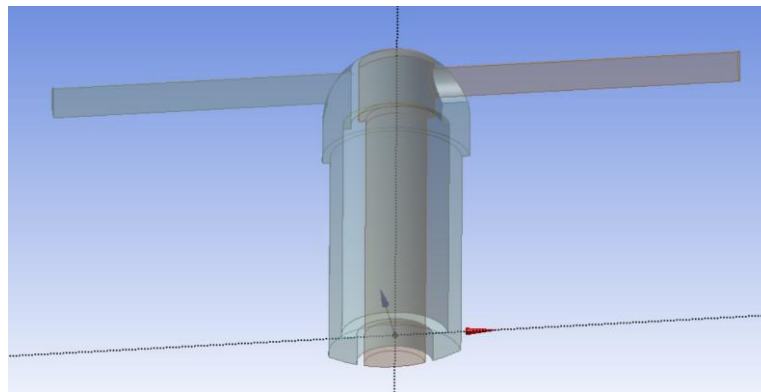


Figura 36. Pla de les anelles

En aquest pla és on generem la nova geometria de les anelles. Primer es genera un cilindre, amb les dimensions del diàmetre exterior de les anelles i l'altura total de tot el conjunt. En el mateix pla, es genera un segon cilindre de la mateixa altura, però amb el diàmetre corresponent al forat interior de les anelles. Veure Figura 37.

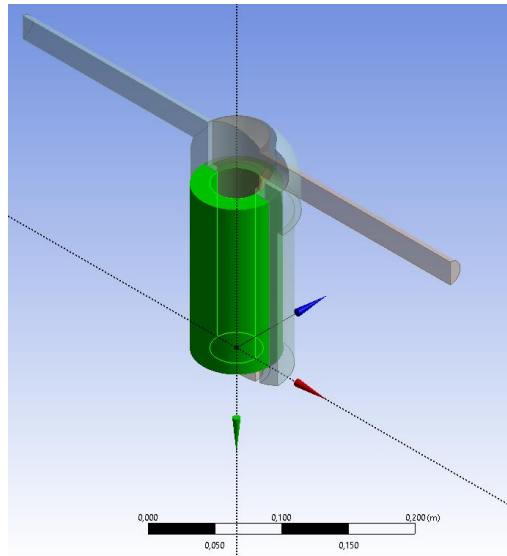


Figura 37. Operació booleana de les anelles

Una vegada els hem creat fem una operació booleana de resta, com ja s'ha fet anteriorment, indicant que volem conservar el primer cilindre. El resultat obtingut és el cilindre de les anelles, amb el forat interior que correspon al forat per on circula el flux de sortida del fluid.

En aquest punt ja disposem de totes les geometries necessàries per realitzar la simulació. Es pot observar el resultat en la Figura 38.

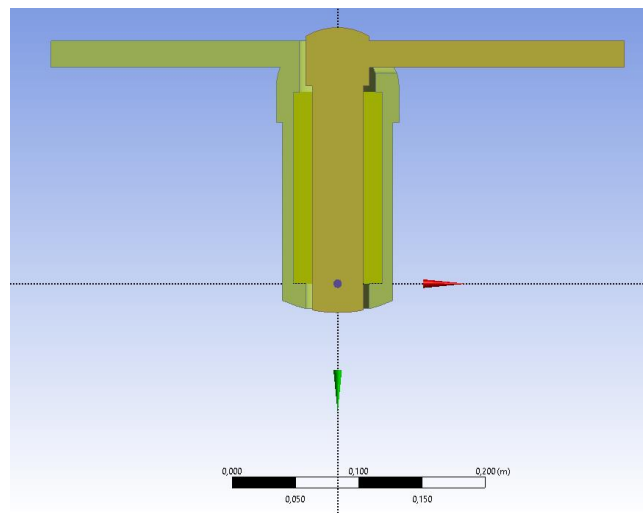


Figura 38. Cossos resultants.

Una problemàtica que s'observa amb la generació dels cossos és que les superfícies queden dividides. Per unir les superfícies d'una mateixa cara dels cossos, s'utilitza l'operació anomenada "Merge". En aquesta es defineix el tipus d'unió que, en aquest

cas, son cares de superfície, per tant definim "Merge Type" com a "faces". En la Figura 39 s'observa com s'uneixen les cares corresponents als conductes d'entrada i sortida, fent que cada conducte quedi format per sols una cara.

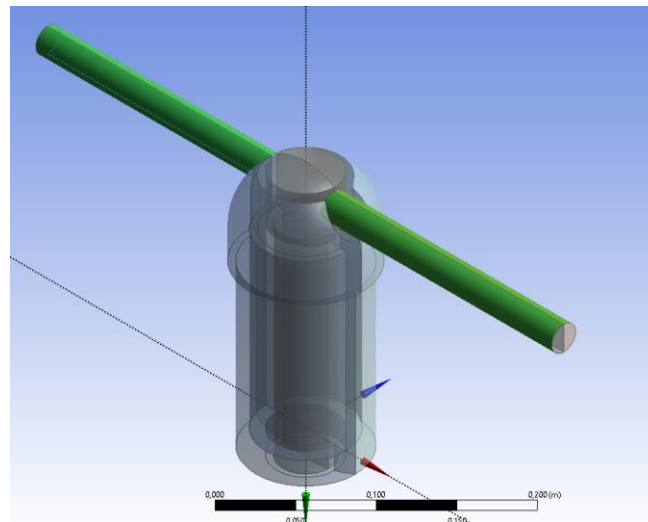


Figura 39. Unió cares conducte entrada i sortida.

En la Figura 40. S'uneixen les cares de la geometria corresponent al flux de sortida, mentre que en la Figura 41 es mostra la unió de les superfícies del flux d'entrada

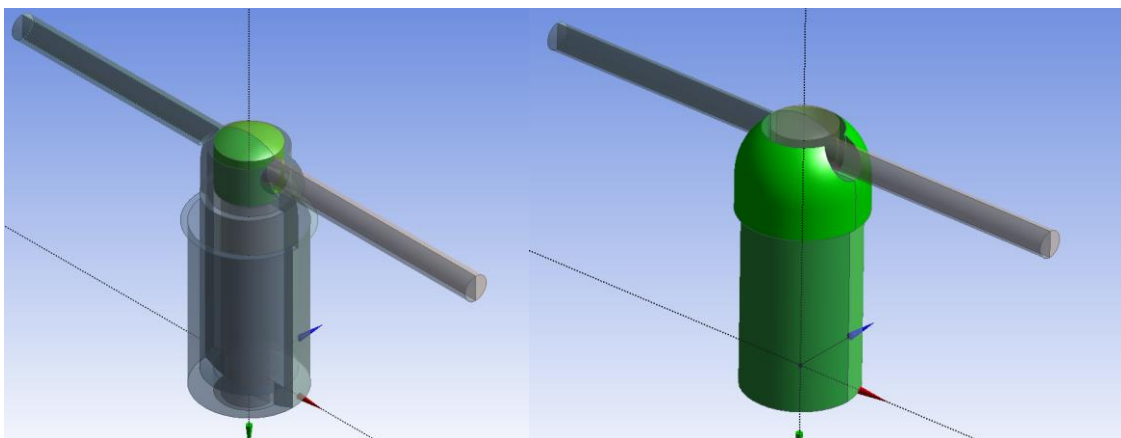


Figura 40. Unió cares flux sortida

Figura 41. Unió cares flux entrada

L'últim pas de configuració de la geometria consisteix en dividir les geometries obtingudes en dos ja que, com ja s'ha mencionat prèviament, la configuració de la simulació es realitzarà amb la meitat de les geometries dels fluxos i anelles i, posteriorment, indicarem que la simulació s'ha de realitzar per la geometria total, a partir del pla de simetria. Seleccionem la opció de "Supress body", per tots els cossos amb els que ja no ens interessa treballar, que són la carcassa, sòlid generat corresponent al

cilindre i totes les geometries que corresponen a la secció del tall amb la que ja no treballem.

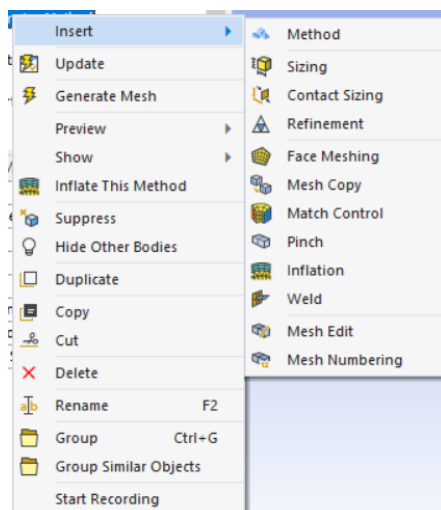
B DISCRETITZACIÓ DEL MODEL

El procés posterior a la generació de la geometria del model consisteix en discretitzar el domini d'aquesta. Per fer-ho, s'utilitza l' ANSYS-Meshing, en el mateix programari de l'ANSYS-Workbench.

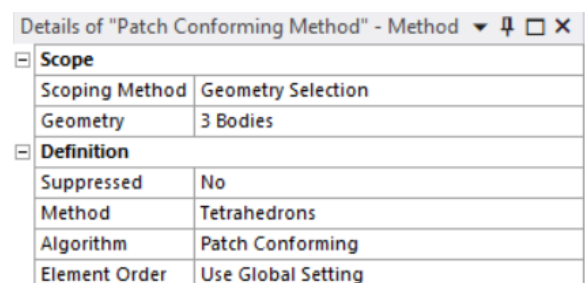
Aquest es basa en la definició d'un conjunt de nodes amb les corresponents arestes de connexió col·locades al llarg de les superfícies amb les que treballarem. Unides entre si, constitueixen els diferents elements que conformen el mallat de les superfícies. Un cop definida aquesta discretització superficial, es genera una discretització volumètrica la qual generarà, segons com s'hagi definit la superfície, piràmides, prismes, tetraedres o hexaedres.

Depenent de la forma generada, obtindrem resultats diferents; una malla tetraèdrica contindrà una major quantitat d'elements però un menor nombre de nodes en comparació a una formada per hexaèdres.

Per a la realització de les simulacions del present estudi, s'utilitza el mètode de mallat per tetraedres degut a que la geometria és complexa i es pot definir millor que amb hexaedres. Per definir-ho, com es pot veure en la Figura 42, amb botó dret del ratolí dins l'apartat de *Mesh*, sel·leccionem *Insert* i posteriorment *Method*. A sota s'obra una pestanya corresponent als detalls, i en l'opció de *Scoping Method* establim *Geometry Selection*. En aquesta, seleccionem els tres cossos i, en la pestanya posterior corresponent a *Method*, definim *Tetrahedrons*.



A



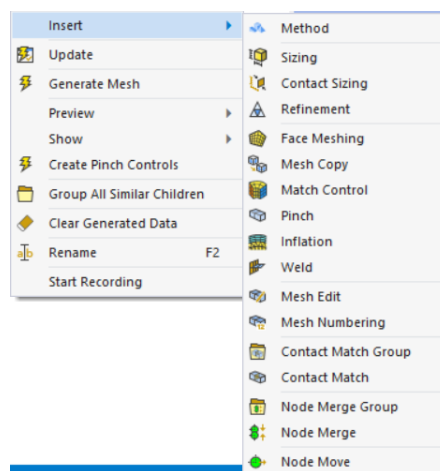
B

Figura 42. Configuració mallat. A; insertar mètode, B; Definir mètode

B.1 Operacions de discretització

Per aplicar les solucions adoptades, s'importa el conjunt format amb els 3 cossos amb els que es treballa que són els anomenats entrada, sortida i anelles.

Per generar el 3D del mallat, es segueix el primer pas que el procés anterior però ara, s'inserta la opció *Inflation*. De manera similar, fem una selecció per geometria i seleccionem l'entrada en el primer cas. En la part inferior, ens demana el mètode de definició de límits, en la casella *Boundary Scoping Method*. En aquest cas, es fa una *Named Selections*, i seleccionem la superfície de contacte entre la geometria d'entrada i les parets del conducte d'entrada, que hem anomenat anteriorment com a *Entrada_Parets*. En el cas de la sortida, es realitza de nou el mateix procediment però en aquest cas es selecciona la geometria de sortida i s'estableix com a límit la superfície de contacte entre la sortida i les parets del conducte de sortida, en aquest cas *Sortida_parets*. Veure Figura 43.



A

Scope		Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	1 Body
Definition		Definition	
Suppressed	No	Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections	Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Entrada_parets	Boundary	Sortida_parets
Inflation Option	Smooth Transition	Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	Default (0,272)	<input type="checkbox"/> Transition Ratio	Default (0,272)
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5	<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2	<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre	Inflation Algorithm	Pre

B

C

Figura 43. Mallat 3D. A; Generació Inflació, B; Geometria entrada, C; Geometria sortida

L'últim pas de l'apartat és el de anomenar totes les superfícies de contacte que es generen, perquè el programa les pugui diferenciar clarament en la simulació. Dins l'apartat *Named Selections*, nomenem una nova selecció, i introduïm el nom de la superfície, seleccionant a quina cara fem referència. Es repeteix el procediment per totes les diferents superfícies de contacte. En la Figura 44 es mostra totes les seleccions resultants que s'han diferenciat.

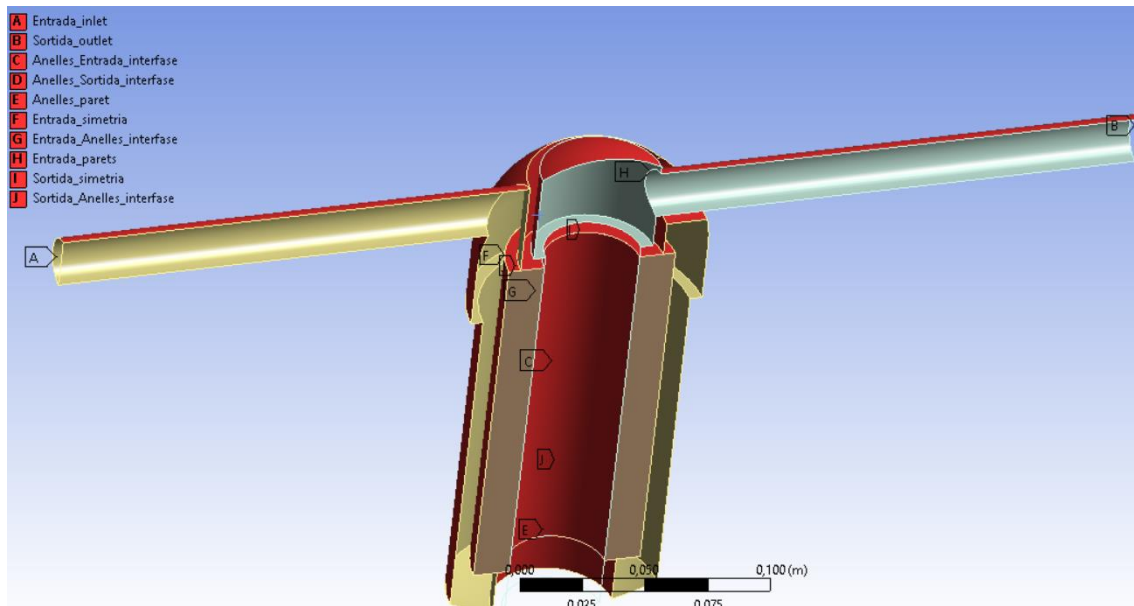


Figura 44. Selecció de superfícies de contacte.

B.2 Qualitat de la discretització

Un cop definida la discretització, és important analitzar si, segons els paràmetres seleccionats, aquests ens aportaran resultats fiables en la simulació, ja que aquests han de cobrir i definir correctament tots els aspectes de la geometria, especialment les zones més crítiques. El programa ens permet analitzar aquest aspecte abans de procedir amb la simulació en si. Aquí mostrem el resultat de 3 anàlisis diferents de qualitat de malla, els quals trobem en l'apartat de detalls del mallat del programa. Es pot veure en la Figura 45.

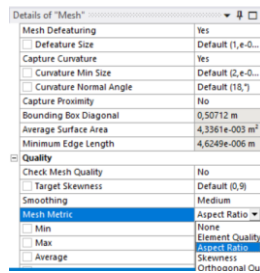


Figura 45. Detalls del mallat

Per concretar, en aquest annex es mostren els resultats obtinguts de qualitat de malla amb la discretització corresponent a un mallat intermig en nombre i mesura d'elements. En la discretització en la que s'utilitza menys elements i de major mida els resultats no seran tan bons. En canvi, la discretització amb elements més fins obtindrà uns resultats lleugerament millors que els aquí representats. Amb tot, els valors eren molt semblants als que es mostren tot seguit.

B.2.1 Aspect ratio

És un paràmetre que analitza l'estirament de les cel·les generades. Es defineix com a la relació entre el valor màxim i el valor mínim de qualsevol de les següents distàncies: distància normal entre el centroide de l'element en 3D i els centroides de les cares i distància entre el centroide d'una cel·la i el node.

Per obtenir valors òptims, s'estableix que el valor mitjà de la relació per tots els elements ha de ser proper a 1. Com es pot observar en la Figura 46, la relació obtinguda per el valor mitjà és de 2,7239. Per el valor màxim en canvi, s'estableix un valor inferior a 50, que es comprova com es compleix.

<input checked="" type="checkbox"/> Min	1,1576
<input type="checkbox"/> Max	17,855
<input type="checkbox"/> Average	2,7239
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	1,8862

Figura 46. Resultats Aspect ratio

En la Figura 47 es veu representat gràficament el mètric del nombre d'elements. Es pot observar com la majoria de punts es troben en un mètric entre 1,16 i 2,5, molt proper a 1. L'element amb pitjor aspecte obté un mètric de 17.86

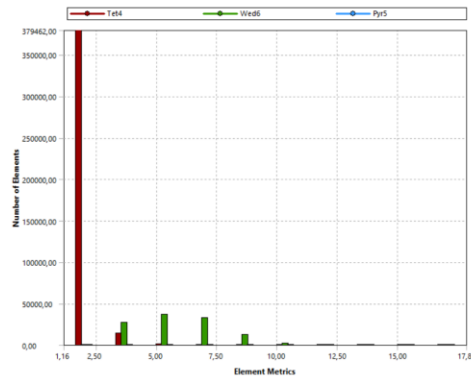


Figura 47. Gràfic Aspect ratio

A partir d'aquesta podem visualitzar a quins elements correspon cada mètric i podem observar en la Figura 48 com aquest element correspon a un punt de canvi de secció entre el pas del conducte d'entrada i l'interior del filtre.

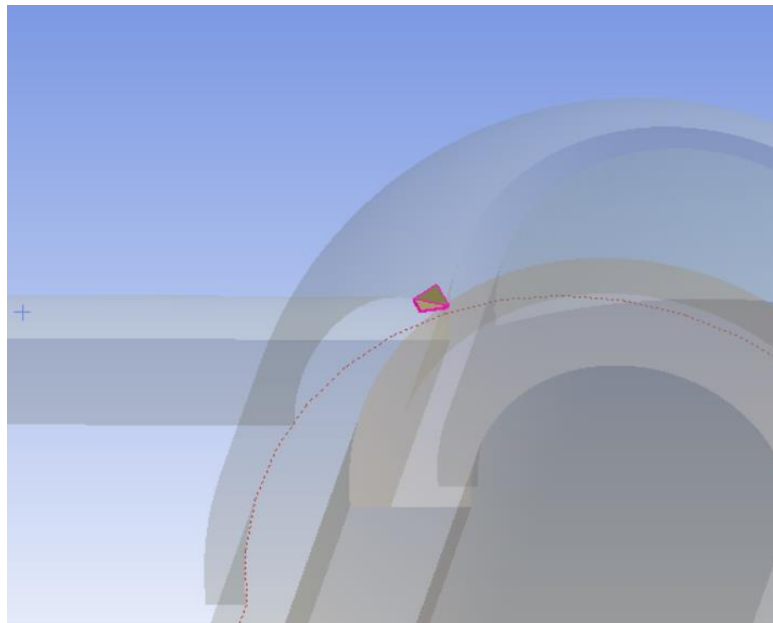


Figura 48. Element més desfavorable.

B.2.2 Skewness

Aquest paràmetre representa la diferència que hi ha entre la forma de cada cel·la de la discretització utilitzada, que en aquest cas és triangular, amb una cel·la formada per un triangle equilàter de volum equivalent. En el cas dels elements tridimensionals, la relació de la obliquïtat és la més desfavorable entre els valors de cada cara. Per fer aquesta relació, s'agafa l'angle que formen les línies que uneixen la base inferior i el vèrtex oposat, amb els punts entremitjos dels costats restants. Veure Figura 49.

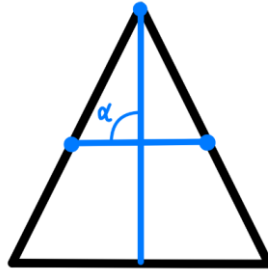


Figura 49. Skewness

D'aquest angle se li resten 90 graus, i es divideix entre 90, per així obtenir la relació d'aquest triangle amb un triangle equilàter.

Per obtenir uns resultats òptims, el valor de obliquïtat ha de estar entre 0 i 1, essent més òptim com més proper a 0, i no acceptable si assoleix el valor de 1.

Es pot observar en la Figura 50 com el valor mitjà obtingut és molt proper a 0 i l'element amb valor màxim no supera el 0,91, cosa que mostra una relació bona d'obliquïtat.

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	8,3046e-008
<input type="checkbox"/> Max	0,90287
<input type="checkbox"/> Average	0,206
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12768

Figura 50. Resultats Skewness

B.2.3 Orthogonal quality

Aquest paràmetre representa el quocient entre el producte escalar del vector normal de cada superfície del tetraedre i el seu centroid, amb el producte del mòdul d'aquests vectors.

Al contrari que l'obliquïtat, al ser un quocient, el valor serà més òptim com més proper sigui a 1. Com es pot observar en la figura 51, el valor mitjà obtingut és de 0,79, i el valor mínim assolit és de 0,097, lleugerament per sota del llindar acceptat com a bo (0,14).

Mesh Metric	Orthogon...
<input type="checkbox"/> Min	9,7128e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,9949
<input type="checkbox"/> Average	0,79229
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12576

Figura 51. Resultats Orthogonal quality

C. CONFIGURACIÓ DEL MODEL

Una vegada ja s'ha definit correctament la geometria i s'ha escollit i parametritzat una discretització adequada, s'han de realitzar una sèrie de modificacions per establir una configuració determinada del model abans d'inicialitzar la simulació. Per fer-ho, s'utilitza l'eina de configuració *Setup* del mateix programari ANSYS-Fluent.

C.1. Configuració general

En la configuració de *Setup* del programari es disposa d'un menú desplegable, on realitzarem tota la sèrie de configuracions seguint el mateix ordre. Veure Figura 52.

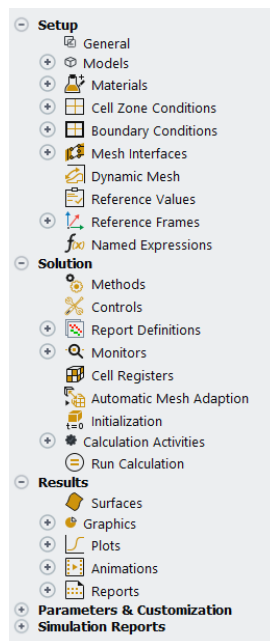


Figura 52. Menú configuració

En l'apartat *General*, es defineix que el *solver* s'ha de basar en una formulació d'equacions de conservació de la massa i de la quantitat de moviment en variables primitives on la pressió s'utilitzarà com a variable per realitzar l'estudi. En l'apartat *time* es defineix el tipus *Steady*, el qual significa que la simulació no és transitòria, és a dir, que no depèn del temps. Definim que la velocitat amb la que es treballa és absoluta. Per últim establim que no s'incorpori l'efecte de la gravetat en l'estudi, ja que el líquid circula per la inèrcia del fluid i la gravetat afecta de forma poc important en la simulació. Veure Figura 53.

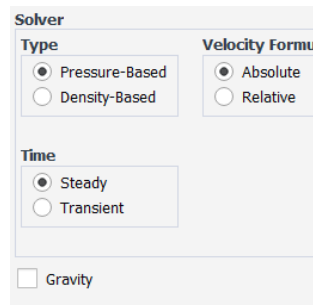


Figura 53. Configuració general

El següent pas que ens trobem en el menú de la simulació es la selecció de diferents models. Veure Figura 54. Com ja s'ha mencionat prèviament, en el present estudi no es treballa amb multifases i, al treballar a temperatura constant, tampoc es resol l'equació de conservació d'energia i les seves derivades (radiació o bescanvi de calor).

Es treballa amb règim turbulent, aplicant el model de SST K-omega, el qual combina els models *Wilcox k-omega* i *k-epsilon*. Aquesta denominació fa referència a que el model treballa a partir de dues equacions diferencials on les variables són k (energia cinètica turbulent) i ω (taxa de dissipació específica de la turbulència). Aquest model és l'actualment recomanat pel programa ANSYS-Fluent.

La resta de paràmetres de configuració es mantenen en *Off*, ja que no afecten a la simulació realitzada en l'estudi.

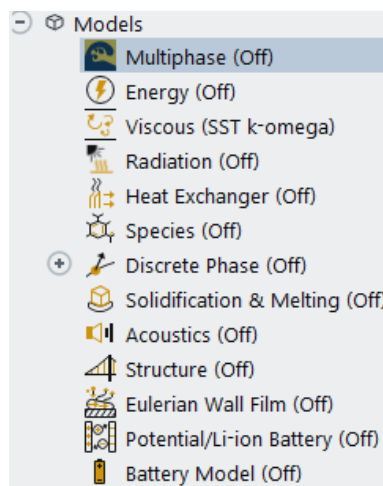


Figura 54. Configuració model.

Seguidament definim el material amb el que treballarem. Al ser aigua, definim un material fluid, "wàter-liquid", que ve determinat per un valor de densitat de $998,2 \text{ kg/m}^3$ i viscositat absoluta $0,001003 \text{ kg/ms}$.

En l'apartat següent, *Cell Zone Conditions* es nombren les tres geometries utilitzades les quals corresponen a zones tipus fluid. Els paràmetres es mantenen tots iguals, excepte els de les anelles, que és on definirem, també, la propietat de zona porosa. Veure Figura 55. Per fer-ho, seleccionem la casella que indica que correspon a una zona laminar i seguidament, en zona porosa s'hi introdueixen els dos coeficients C_0 i C_1 que parametritzaran el comportament filtrant de les anelles, els quals hem trobat amb càlculs realitzats com es mostra en l'apartat C.2

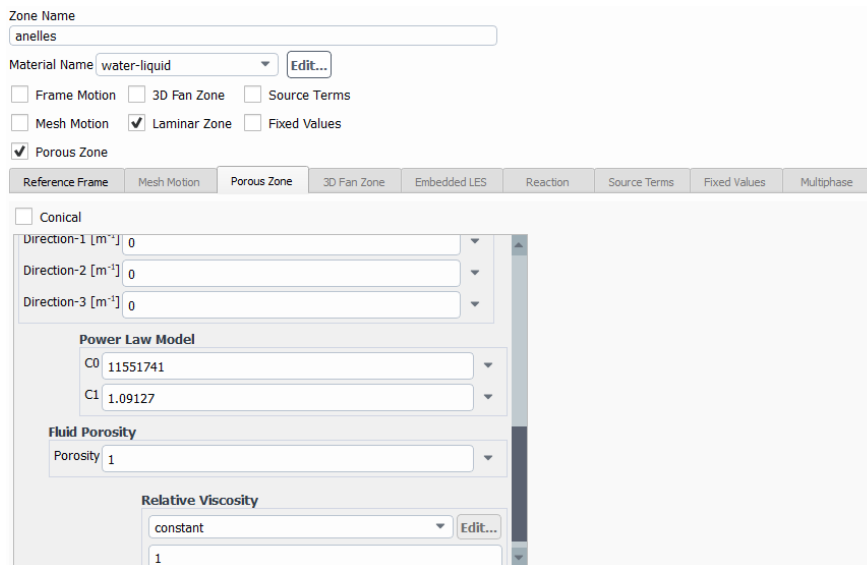


Figura 55. Definició del volum de les anelles com a zona porosa.

El següent pas consisteix en diferenciar les diferents condicions de contorn que conformen la figura amb el menú *Boundary conditions*.

Quan s'obre el desplegable, es defineixen diferents condicions, la d'entrada, interfase, superfícies internes, sortida, simetries i parets. Primerament definim les dues superfícies que considerem com entrada i sortida, ja que en aquestes és on introduïm els paràmetres de les diferents simulacions. En la condició *inlet* hi seleccionem la superfície *entrada_inlet* i, en *outlet*, seleccionem la superfície *sortida_outlet*. En aquestes, hi podem modificar els paràmetres de velocitat, en el cas de l'entrada, i pressió en el cas de sortida. Veure Figura 56.

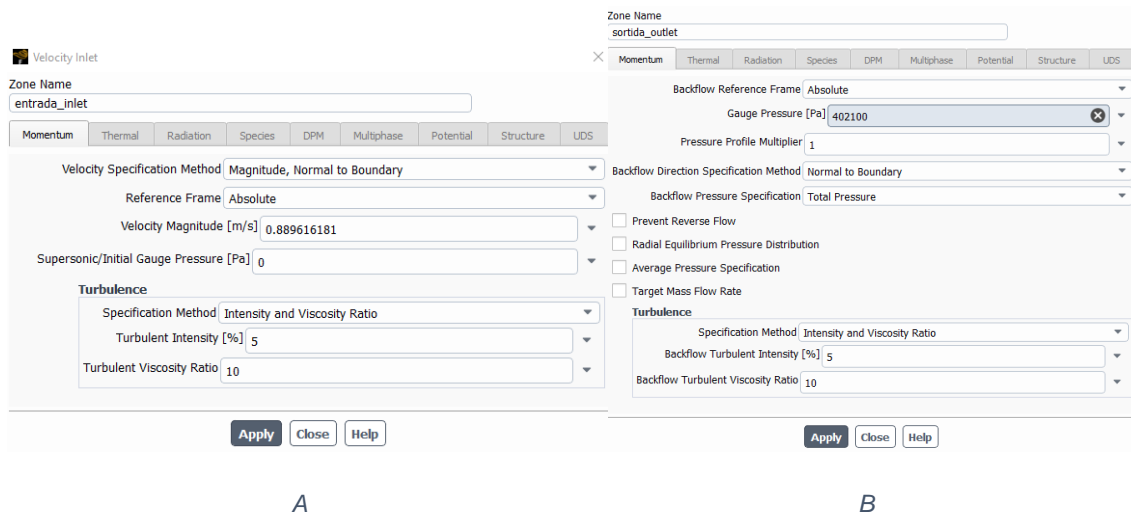


Figura 56. Definició de paràmetres. A; Entrada, B; Sortida

En l'apartat interfase, seleccionem totes les superfícies que, en la configuració de la geometria, hem definit com a interfases. Veure figura 57.

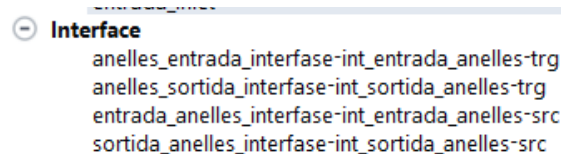


Figura 57. Interfases

Per acabar, en l'apartat de *Symmetry* seleccionem totes les superfícies que hem definit que estan en contacte amb el pla de simetria, que son les corresponents a l'entrada, anelles i sortida.

Una vegada hem diferenciat aquestes figures, el programari ens diferencia de les restants, quines corresponen a parts internes i quines corresponen a parets de la geometria exterior.

L'últim apartat de la configuració del model és l'anomenada *Mesh Interfaces*. Aquesta opció és necessària per definir quines interfases formen part del domini de la geometria entrada i quines al domini de la sortida. Per això, diferenciem la interfase que hi ha entre l'entrada i les anelles de la interfase que hi ha entre la sortida i les anelles.

C.2. Configuració de les anelles

Com s'ha mencionat, en la configuració general del model s'introdueixen dos paràmetres, anomenats C_0 i C_1 , que serveixen per simular el comportament de pèrdues

de càrrega del filtre al pas de les anelles. Per obtenir aquests valors, s'han realitzat una sèrie de càlculs en funció de la geometria de les anelles, per definir quines són les pèrdues de càrrega d'aquestes i, d'aquesta manera, obtenir una equació equivalent que ens permeti simular aquest comportament en un cos massís. Aquests càlculs s'han aplicat per als diferents valors de cabal d'entrada o velocitat obtinguts amb l'assaig experimental.

El càlcul es realitza per cadascun dels canals de l'anella i posteriorment per el nombre total de canals. És per això que el primer pas consisteix en definir quin és el cabal i la velocitat corresponent a un canal. Ho fem gràcies a que sabem el nombre de canals per anella i el nombre total d'anelles.

Taula 9. Mesures de les anelles

Base sup (microm)	Base inf (microm)	Height (microm)
437,7	103,1	243,2
409	265,4	97,3

La Taula 9 mostra les dimensions característiques d'una secció transversal dels canals, que tenen una geometria de tipus trapezoidal. La base superior fa referència a la distància de la part superior de la secció del canal, mentre que la part inferior és la de la base del canal i Height l'altura entre elles. En la primera fila es representa la mesura de l'anella que es troba sobreposada en la part superior, mentre que en la segona fila es troben les dades de l'anella de la part inferior, la que correspon al canal principal. Totes les mesures es troben en micròmetres.

Aquestes mesures han estat extretes de l'article *Sang-ink Lee, Jin-Yong Choi and Won Choi. Effect of Groove Shape on Head Loss and Filtration Performance of Disc Filters. 2021.*

A partir de les geometries principals, es poden calcular el diàmetre hidràulic de la secció, radi hidràulic del canal i el perímetre mullat. Veure Taula 10.

Taula 10. Perímetre mullat, radi hidràulic i diàmetre hidràulic.

hip trapezi (microm)	pm total (microm)	Rh total (microm)	Dh total (microm)
295,19	1131,18	58,14	232,54
120,92	916,25	35,81	143,23

Un cop es tenen les principals dades en referència a la geometria del canal, es poden definir el cabal i la velocitat corresponents a cada canal. Veure Taula 11.

Taula 11. Velocitat i cabal corresponent a cada canal

Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)	Qc (m ³ /s)	vc (m/s)
3,16	0,00088	1,06446E-08	0,22
2,92	0,00081	9,80534E-09	0,20
2,75	0,00076	9,24252E-09	0,19
2,19	0,00061	7,367E-09	0,15
1,62	0,00045	5,45852E-09	0,11

Es defineixen els paràmetres necessaris per aplicar les fórmules de pèrdua de càrrega, per cada pèrdua de càrrega corresponent, i per cada velocitat diferent. Primer definim els paràmetres que utilitzarem per calcular les pèrdues de càrrega en l'entrada.

Taula 12. Paràmetres d'entrada al canal

Rec (-)	lambda c (-)	v.entrada (m/s)	A.entrada (microm)	Dhi/Dhc (-)	K entrada (-)
40,18	1,59	0,027	388551,54	3,32	0,38
37,01	1,73	0,025	388551,54	3,32	0,38
34,89	1,83	0,024	388551,54	3,32	0,38
27,81	2,30	0,019	388551,54	3,32	0,38
20,60	3,11	0,014	388551,54	3,32	0,38

Aquestes corresponen al nombre de Reynolds de l'entrada i el valor del coeficient de fricció Lambda, utilitzats en les fórmules (6), (7) i (8), la velocitat d'entrada al canal, l'àrea d'entrada, la ràtio de diàmetres hidràulics entre l'entrada i el canal, que s'utilitzen per calcular la hipotenusa, que correspon a la mesura de la paret inclinada del canal, la qual és diferent en l'entrada de la sortida, i per últim el coeficient de contracció corresponent al pas d'entrada a les anelles.

De la mateixa manera, es defineixen aquests mateixos paràmetres però corresponents a la sortida del canal, en el pas entre aquesta i la zona llisa oberta de la part més interior de les anelles a la taula 13.

Taula 13. Paràmetres de sortida del canal

As (microm)	Dhi/Dhc (-)	Ksortida (-)	v.sortida (m/s)	Resort (-)	lambda sortida (-)
114786	1,80	0,48	0,092	31,11	2,06
114786	1,80	0,48	0,085	28,65	2,23
114786	1,80	0,48	0,081	27,01	2,37
114786	1,80	0,48	0,064	21,53	2,97
114786	1,80	0,48	0,048	15,95	4,01

En aquest cas, l'àrea de sortida és més petita que la d'entrada ja que la secció del canal es va fent més estreta a la part més interior, per tant també seran diferents els valors de la velocitat de sortida, els Reynolds i la Lambda. En el cas de sortida la constant K canvia de valor, ja que ara correspon a una expansió de dues seccions diferents.

Per últim, es defineixen aquests mateixos paràmetres però en el pas de sortida del flux de la zona llisa oberta de l'interior de les anelles fins sortir completament de les anelles.

Taula 14. Paràmetres de sortida de l'anella.

As 2 (microm)	Dhi2/Dhi (-)	Ksort 2 (-)
217981	1,38	0,22
217981	1,38	0,22
217981	1,38	0,22
217981	1,38	0,22
217981	1,38	0,22

Una vegada calculats tots els paràmetres necessaris, es poden aplicar les fórmules corresponents a les diferents pèrdues de càrrega que s'han definit a l'apartat 3.1.4.

Model de pèrdua de càrrega per a les anelles

Taula 15. Pèrdues de càrrega

DpPrimàries (Pa)	DpSecundàries (Pa)	DpPrimàries2 (Pa)	DpSecundàriesE (Pa)	DpSecundàriesS (Pa)	DpSecundàries2 (Pa)	Dp total (Pa)	Dp total (bar)
2896,83	419,82	86,17	8,91	11,18	0,96	3423,87	0,034
2668,42	356,23	79,37	7,56	9,49	0,82	3121,89	0,031
2515,26	316,51	74,82	6,71	8,43	0,73	2922,45	0,029
2004,85	201,09	59,63	4,27	5,36	0,46	2275,66	0,022
1485,48	110,37	44,19	2,34	2,94	0,25	1645,60	0,016

Aquestes fan referència a les pèrdues de càrrega que s'han diferenciat anteriorment. La primera correspon a les pèrdues de càrrega primàries, les quals s'apliquen a partir dels paràmetres definits en la Taula 12, corresponents als valors d'entrada del canal, de la mateixa manera que s'utilitzen per les pèrdues de càrrega secundàries d'aquest mateix tram. Seguidament es defineixen les pèrdues de càrrega primàries 2, que correspon a les primàries de la segona superfície, amb les seves corresponents pèrdues secundàries 2, situades en la quarta columna.

En quant a les anomenades *DpSecundàriesE*, aquestes es refereixen a les pèrdues de càrrega secundàries produïdes en l'entrada del canal degudes a la contracció del fluid, calculades amb les dades de la Taula 12, mentre que les *DpSecundàriesS* corresponen a les pèrdues de la sortida del canal, degudes a l'expansió, amb les dades corresponents de la Taula 13.

Finalment es fa un sumatori de les pèrdues de càrrega totals de cada canal, per cada velocitat diferent en pascals, i seguidament aquesta convertida en bars.

D. RESULTATS

En l'apartat 4.2.2. Anàlisi de pèrdues de càrrega es mostren les figures corresponents només a una simulació de la primera discretització, ja que és la discretització mitjana en quant a nombre d'elements, i l'assaig correspon al cabal d'entrada més baix, que és on les simulacions obtenen resultats de pèrdues de càrrega que s'ajusten més a les obtingudes en l'assaig experimental. Per poder afirmar que els resultats obtinguts són similars per a totes les simulacions amb diferents velocitats, es fa una comparativa dels resultats obtinguts de les simulacions restants, amb cabals i pressions diferents.

D.1. Distribució de la pressió

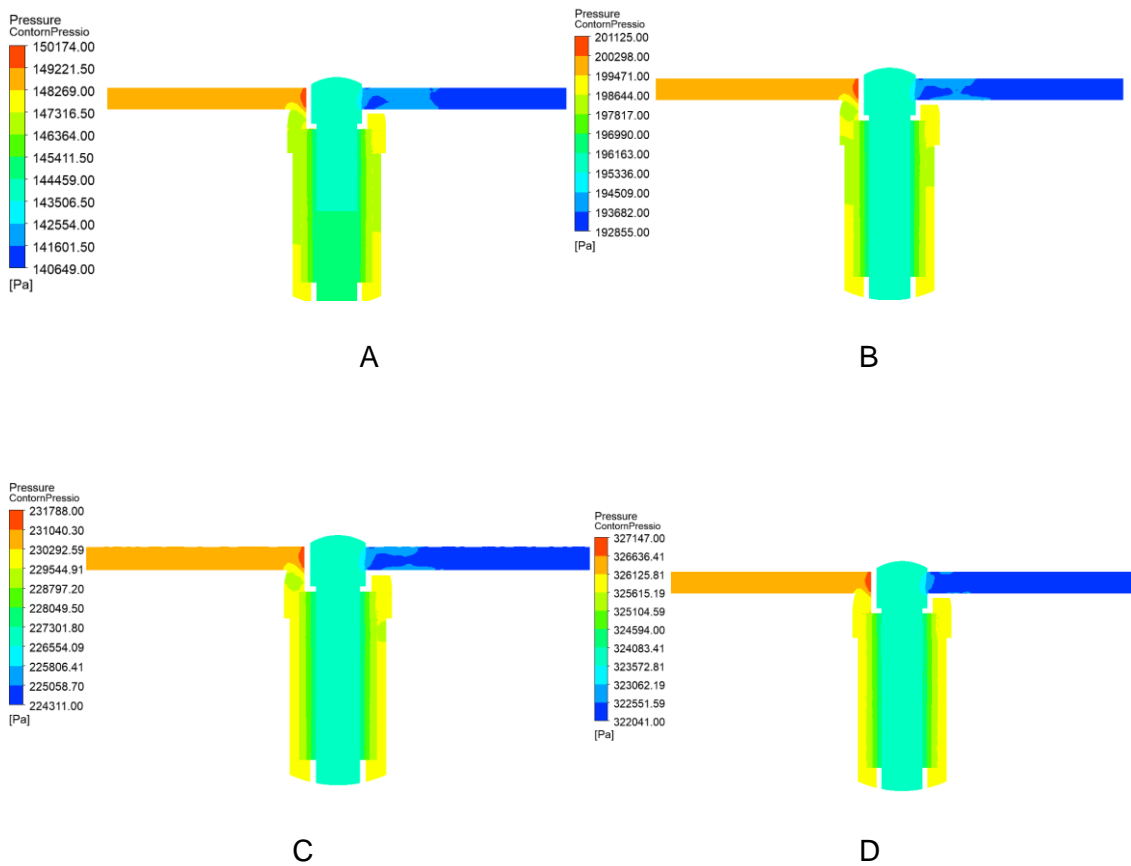


Figura 58. Resultats distribució de pressió

Es comprova que la distribució de pressions és similar en les altres quatre simulacions, tot i que és més irregular en les simulacions amb cabals menors. Tant en la simulació (A) com en la (B), la pressió d'entrada no és uniforme, ja que aquesta comença sent major en la part inferior, fet que també es produeix en la pressió de sortida de la primera

simulació. Pel que fa a les dues últimes simulacions, (C) i (D), es mantenen molt estables en totes les fases, mantenint també el mateix punt de sobrepressió de l'entrada.

D.2. Línies de corrent

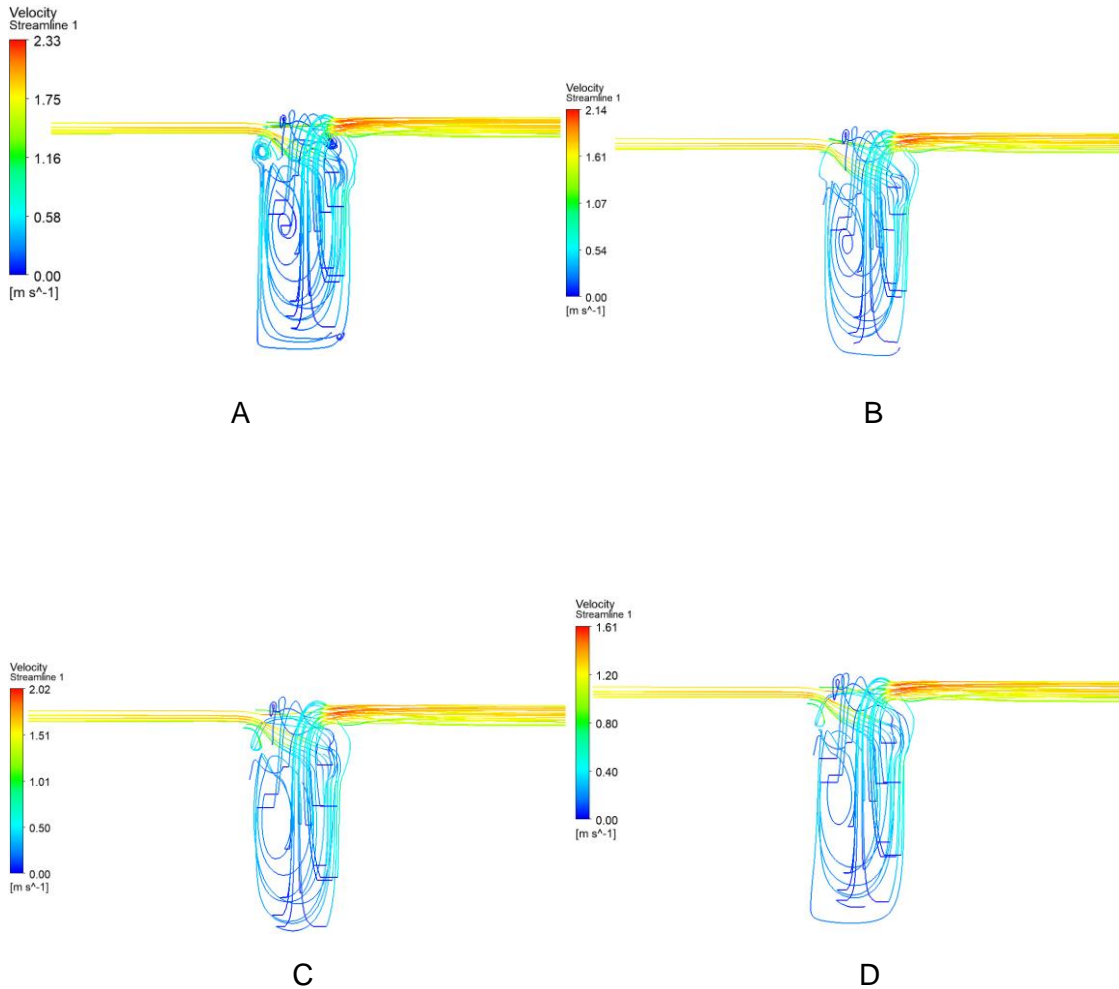


Figura 59. Resultats línies de corrent

La representació de les simulacions de línies de corrent es realitza amb 25 punts, escollits a l'atzar, de la simulació, és per aquest motiu que el recorregut dels punts mostrats, no pertanyen als mateixos.

De totes maneres, es pot comprovar com en les quatre simulacions es repeteix el comportament de la simulació comentada en l'apartat 4.2.4. Línies de corrent i velocitat del fluid. En totes elles, es comprova com el flux d'entrada genera unes petites turbulències en l'entrada, i que en aquesta hi ha una dificultat abans d'entrar al canal de les anelles i que ho fa majoritàriament per la part inferior.

D.3. Velocitat del fluid

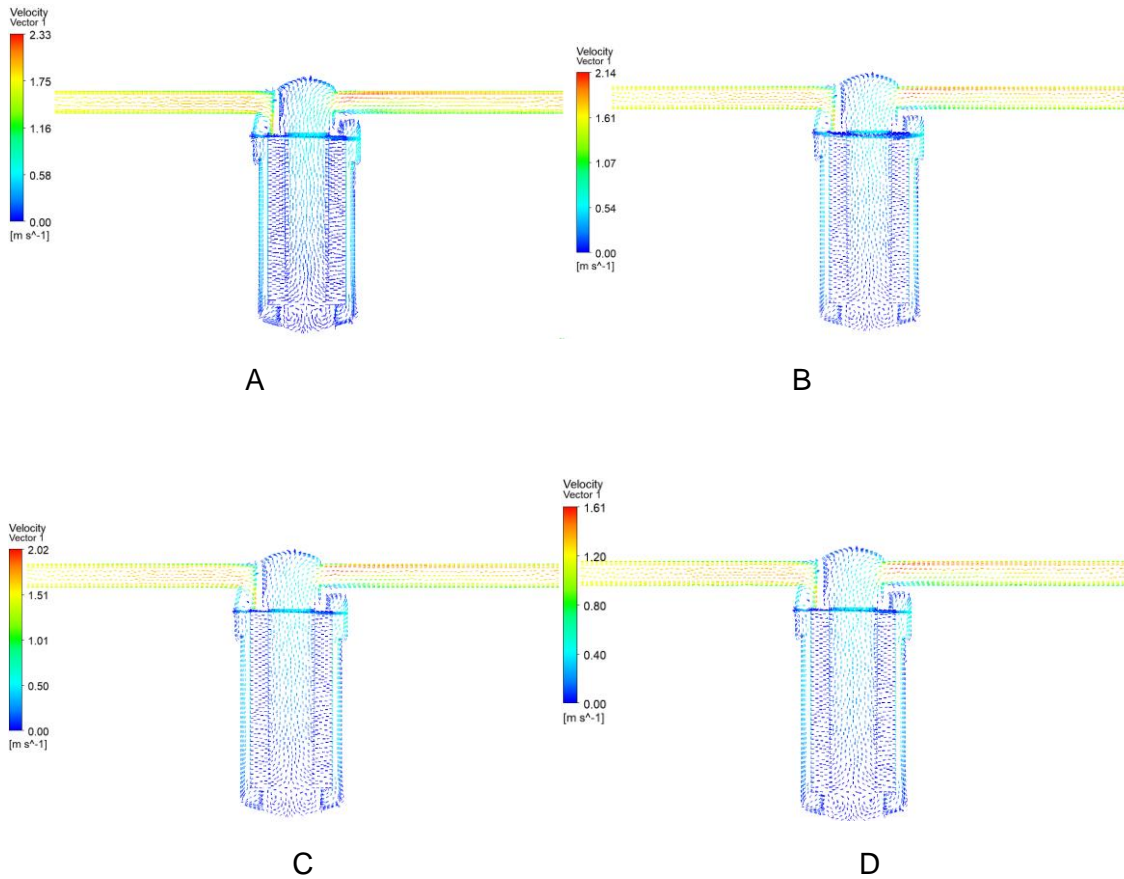


Figura 60. Resultats velocitat del fluid.

Per últim, es pot analitzar com la velocitat de l'interior del filtre és major en les simulacions amb més cabal d'entrada i que la distribució de les velocitats és pràcticament idèntica en totes les simulacions, apreciand també com es genera una petita turbulència en l'entrada del fluid, i un altre a la sortida de les anelles, deguda a la tendència del flux del fluid a entrar en les anelles de la part inferior.

