



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



TREBALL FINAL DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

Estudi CFD d'una Vàlvula Papallona de l'àmbit energètic

CURS 2019-2020

Autor: Sergi Sayós Silva

Director: José Miguel
Giménez Pradales

Data: 03-07-2020

Localitat: Manresa

Agraïments

A la meva família i el seu suport moral, sense el qual no hagués estat possible finalitzar el treball.

El gran suport moral i consells referents a la redacció del treball que la meva parella, la Júlia, m'ha proporcionat dia rere dia.

A tot l'equip docent per tot el que he après d'ells i, en especial, al meu tutor del treball Jordi Vives Costa pel seu suport i ajuda en els moments de dubte. També, a l'escola en general per la facilitació en l'ús dels *softwares* i per la superposició envers els problemes sorgits per la pandèmia vírica.

Als companys i, en especial, al meu tutor de les pràctiques professionals sense les quals no m'haguessin sorgit la motivació i la idea per posar en marxa el projecte.

Resum

Amb l'enorme progrés que s'ha realitzat en els *softwares* dedicats al càlcul i simulació per elements finits i, concretament, als enfocats a la mecànica de fluids, s'ha aconseguit augmentar considerablement tant el nivell d'exactitud dels resultats com la facilitat relativa per relacionar-se amb l'entorn. És per això que es poden dur a terme càlculs i obtenir resultats de gran complexitat amb un temps relativament baix.

L'objectiu del treball consisteix a fer l'estudi fluidodinàmic d'una vàlvula papallona del sector hidroelèctric mitjançant el mètode dels elements finits aplicats a la branca de la mecànica de fluids. Per a fer l'estudi utilitzarem el *software* ANSYS Fluent per a la simulació i el *software* Solidworks per a la simplificació, modificació i millora de la geometria.

L'estudi té dos objectius específics, els quals són l'estudi i reducció de la pèrdua de càrrega i l'estudi i reducció de risc de la cavitació. Un cop la simulació amb la geometria original ha conclòs, s'ha buscat millorar dita geometria i comprovar la viabilitat de la millora efectuada i les seves conseqüències analitzant, comparant i justificant els resultats envers el model original.

Resumen

Debido al enorme progreso que se ha realizado en los *softwares* dedicados al cculo y simulación mediante los elementos finitos y, concretamente, a los enfocados a la mecnica de fluidos, se ha conseguido aumentar considerablemente tanto en nivel de exactitud de los resultados como en facilidad relativa de adaptación al entorno. Es por esto que se pueden llevar a cabo cculos y obtener resultados de gran complejidad en un tiempo relativamente bajo.

El objetivo del trabajo consiste en realizar el estudio fluidodinámico de una vlvula mariposa del sector hidroeléctrico mediante el método de los elementos finitos aplicados a la rama de la mecnica de fluidos. Para realizar el estudio usaremos el *software* ANSYS Fluent para la simulación y el *software* Solidworks para la simplificación y modificación de la geometría.

El estudio tiene dos objetivos específicos, los cuales son el estudio y reducción de la pérdida de carga y la reducción del riesgo de cavitación. Una vez la simulación con la geometría original ha concluido, se ha buscado la mejora de dicha geometría y la comprobación de la viabilidad de la mejora efectuada analizando, comparando y justificando los resultados junto al modelo original.

Abstract

Given the huge advances produced in software dedicated to the calculus and simulation by finite elements and, specifically, on fluid mechanics, a remarkable increase has been achieved both in the accuracy level of results and the relative facility to interact with the environment. This is why it is possible now to do calculus and obtain high complexity results in a relatively short time.

The aim of this report consists of doing a fluid dynamic study of a butterfly valve of the hydroelectrically sector by the method of the finite elements applied to the fluid mechanic engineering. For this study we will use the ANSYS Fluent software for the simulation and the Solidworks software for the simplification and modification of geometry.

The study has two specific aims, the reduction of the pressure drop and the study and reduction of the risk of cavitation. After the simulation of the original geometry has been computed, copy of the simulation with the original geometry has been concluded, it has been improved and checked the viability of this by analyzing, comparing and justifying the results against the original model.

Glossari

FEM – Mètode dels elements finits

CFD – Computational Fluid Dynamic

Node – Unitat elemental del FEM. Punt d'avaluació de les incògnites del sistema

Element – Unitat resultant de la unió de 2 o 3 nodes en 2D i 3D respectivament

Malla – Unió de nodes mitjançant els elements

PN – Pressió nominal

DN – Diàmetre nominal

Re – Número de Reynolds

CAD – Computer Aided Design

MA – Millora Aplicada

Índex

Agraïments	1
Resum	2
Resumen	3
Abstract	4
Glossari	5
Índex il·lustracions	9
Índex equacions.....	12
Índex taules	14
Índex gràfiques	15
1. Introducció	16
1.1. Origen i motivació del treball	16
1.2. Objectiu del treball.....	16
1.3. Interessos.....	16
2. Mecànica de fluids	17
2.1. Conservació de la massa i de la quantitat de moviment	17
2.2. Principis de la termodinàmica.....	17
2.3. Hipòtesis del medi continu.....	17
2.4. Partícula fluida.....	17
2.5. Flux laminar i turbulent	18
2.6. Capa límit.....	19
2.7. Número de Reynolds.....	19
2.8. Pèrdua de càrrega.....	20

2.9. Cavitació	21
3. Definició del model numèric	22
3.1. CFD.....	22
3.2. Discretització del domini.....	24
3.3. Model Cavitació.....	27
3.4. Model de turbulència	28
4. Model numèric	29
4.1. Consideracions inicials	29
4.2. Geometria	32
4.3. Mallat	37
4.4. Models de Simulació	43
4.4.1. Model de la pèrdua de càrrega	43
4.4.2. Model de cavitació	49
4.5. Millora hidrodinàmica.....	59
4.6. Model numèric amb la millora.....	62
4.6.1. Geometria.....	62
4.6.2. Mallat.....	64
4.6.3. Preparació de la simulació.....	65
4.6.4. Resultats del model de pèrdua de càrrega	66
4.6.5. Resultats del model de cavitació.....	70
5. Anàlisi dels resultats	75
6. Programació	79
7. Pressupost.....	80

7.1. Costos directes.....	80
7.2. Costos indirectes.....	80
7.3. Costos totals del projecte	81
8. Impacte mediambiental.....	82
9. Conclusions	83
10. Bibliografia	84

Índex il·lustracions

Il·lustració 1. Flux Laminar i Flux Turbulent. <i>Font Pròpia</i>	18
Il·lustració 2. Capa límit. <i>IPSUM Reconstruccion de accidentes de trafico</i>	19
Il·lustració 3. Efecte de l'estela d'un coche de F1 sobre el perseguidor. <i>Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga</i>	22
Il·lustració 4. Estudi del flux al voltant d'un helicòpter. <i>Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga</i>	23
Il·lustració 5. Estudi aerodinàmic d'un vaixell. <i>Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga</i>	23
Il·lustració 6. Mallat estructurat. <i>Google sites (MANI FO1)</i>	24
Il·lustració 7. Mallat no estructurat. <i>Google sites (MANI FO1)</i>	25
Il·lustració 8. Geometria original. <i>Font pròpia</i>	32
Il·lustració 9. Geometria simplificada. <i>Font pròpia</i>	33
Il·lustració 10. Secció 2D de la geometria amb les cannonades. <i>Font pròpia</i>	34
Il·lustració 11. Selecció del mòdul geometria. <i>Font pròpia</i>	34
Il·lustració 12. Geometria amb les cannonades. <i>Font pròpia</i>	35
Il·lustració 13. Geometria simplificada 2. <i>Font pròpia</i>	35
Il·lustració 14. Volum extret de la geometria. <i>Font pròpia</i>	36
Il·lustració 15. Secció del volum. <i>Font pròpia</i>	36
Il·lustració 16. Selecció del mòdul de mallat. <i>Font pròpia</i>	37
Il·lustració 17. Volum mallat. <i>Font pròpia</i>	38
Il·lustració 18. Mallat seccionat. <i>Font pròpia</i>	39
Il·lustració 19. Detall del mallat seccionat. <i>Font pròpia</i>	39
Il·lustració 20. Secció 2 del mallat. <i>Font pròpia</i>	40
Il·lustració 21. Detall de la seccó 2 del mallat. <i>Font pròpia</i>	40
Il·lustració 22. Entrada flux. <i>Font pròpia</i>	41
Il·lustració 23. Sortida del flux. <i>Font pròpia</i>	41
Il·lustració 24. Paret exterior. <i>Font pròpia</i>	42

Il·lustració 25. Paret interior. <i>Font pròpia</i>	42
Il·lustració 26. Mòdul de simulació. <i>Font pròpia</i>	43
Il·lustració 27. Taula residuals. <i>Font pròpia</i>	45
Il·lustració 28. Trajectoria de la velocitat. <i>Font pròpia</i>	46
Il·lustració 29. Detall trajectoria velocitat. <i>Font pròpia</i>	46
Il·lustració 30. Gràfic pressió. <i>Font pròpia</i>	47
Il·lustració 31. Gràfic 2 pressió. <i>Font pròpia</i>	47
Il·lustració 32. Detall gràfic 2 pressió. <i>Font pròpia</i>	48
Il·lustració 33. Gràfic 3 pressió. <i>Font pròpia</i>	48
Il·lustració 34. Residuals cavitació. <i>Font pròpia</i>	54
Il·lustració 35. Gràfic cavitació. <i>Font pròpia</i>	54
Il·lustració 36. Gràfic 2 cavitació. <i>Font pròpia</i>	55
Il·lustració 37. Detall gràfic 2 cavitació. <i>Font pròpia</i>	55
Il·lustració 38. Detall 2 gràfic 2 cavitació. <i>Font pròpia</i>	56
Il·lustració 39. Detall seient gràfic 2 cavitació. <i>Font pròpia</i>	56
Il·lustració 40. Detall gràfic 3 cavitació. <i>Font pròpia</i>	57
Il·lustració 41. Gràfic 3 cavitació. <i>Font pròpia</i>	57
Il·lustració 42. Gràfic 4 cavitació. <i>Font pròpia</i>	58
Il·lustració 43. Detall gràfic 4 cavitació. <i>Font pròpia</i>	58
Il·lustració 44. Localització punts crítics secció. <i>Font pròpia</i>	59
Il·lustració 45. Localització punts crítics. <i>Font pròpia</i>	60
Il·lustració 46. MA secció. <i>Font pròpia</i>	61
Il·lustració 47. MA. <i>Font pròpia</i>	61
Il·lustració 48. Geometria MA. <i>Font pròpia</i>	62
Il·lustració 49. Volum extret MA. <i>Font pròpia</i>	63
Il·lustració 50. Secció geometria MA. <i>Font pròpia</i>	63
Il·lustració 51. Mallat MA. <i>Font pròpia</i>	64
Il·lustració 52. Secció mallat Ma. <i>Font pròpia</i>	64

Il·lustració 53. Secció 2 mallat MA. <i>Font pròpia.</i>	65
Il·lustració 54. Trajectoria velocitats MA. <i>Font pròpia.</i>	66
Il·lustració 55. Gràfic pressió MA. <i>Font pròpia.</i>	67
Il·lustració 56. Detall trajectòria velocitats MA. <i>Font pròpia.</i>	67
Il·lustració 57. Gràfic 2 pressió MA. <i>Font pròpia.</i>	68
Il·lustració 58. Detall gràfic 2 pressió MA. <i>Font pròpia.</i>	68
Il·lustració 59. Gràfic 3 pressió MA. <i>Font pròpia.</i>	69
Il·lustració 60. Gràfic 1 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	70
Il·lustració 61. Gràfic 2 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	71
Il·lustració 62. Detall gràfic 2 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	71
Il·lustració 63. Detall 2 gràfic 2 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	72
Il·lustració 64. Detall seient gràfic 2 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	72
Il·lustració 65. Gràfic 3 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	73
Il·lustració 66. Detall gràfic 3 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	73
Il·lustració 67. Gràfic 4 cavitació MA. <i>Font pròpia.</i>	74
Il·lustració 68. Detall gràfic 4 cavitació. <i>Font pròpia.</i>	74

Índex equacions

Equació 1 – Número de Reynolds. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	19
Equació 2 – Pèrdua de càrrega. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	20
Equació 3 – Segona equació pèrdua de càrrega, <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica Jordi Vives</i>	20
Equació 4- Número de cavitació. <i>Wikipedia (Número de cavitación)</i>	21
Equació 5 - Equació diferencial de la conservació de la massa. <i>Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga</i>	25
Equació 6 - Equació diferencial de la conservació de la massa simplificada. <i>Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga</i>	25
Equació 7 - Equació 1 de Navier-Stroke. <i>Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga</i>	26
Equació 8 - Equació 2 de Navier Stroke. <i>Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga</i>	26
Equació 9 - Equació 3 de Navier-Stroke. <i>Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga</i>	26
Equació 10 - Equació Viscositat turbulenta. <i>ANSYS HELP</i>	28
Equació 11 - Equació del cabal màssic. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	29
Equació 12 - Equació del cabal. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	29
Equació 13 - Equació de l'area del cercle. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	30
Equació 14 - Equació de l'area del cercle. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	30
Equació 15 - Número de Reynolds. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	30
Equació 16 - Nombre de Reynolds resultat. Resolució pròpia.....	31
Equació 17 - Equació pèrdua de càrrega reestructurada. Resolució pròpia.	50
Equació 18 - Equació de la pressió total. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	50

Equació 19 - Equació de la pressió dinàmica. <i>Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives</i>	51
Equació 20 - Equació de la pressió total reestructurada. <i>Resolució propia</i>	51

Índex taules

Taula 1 Característiques del mallat. <i>Font pròpia</i>	38
Taula 2. Pèrdua de càrrega. <i>Font pròpia</i>	45
Taula 3. Pressions estàtiques i dinàmiques. <i>Font pròpia</i>	45
Taula 4. Pèrdua de càrrega per a diferents velocitats. <i>Font pròpia</i>	48
Taula 5. Pressions extrapolades a 10bar. <i>Font pròpia</i>	51
Taula 6. Característiques del mallat MA. <i>Font pròpia</i>	64
Taula 7. Pressions extrapolades a 10bar MA. <i>Font pròpia</i>	65
Taula 8. Pèrdua de càrrega MA. <i>Font pròpia</i>	66
Taula 9. Pressions estàtiques i dinàmiques MA. <i>Font pròpia</i>	66
Taula 10. Pèrdua de càrrega segons diferents velocitats MA. <i>Font pròpia</i>	69
Taula 11. Comparativa pèrdua de càrrega. <i>Font pròpia</i>	75
Taula 12. Comparativa pressions estàtiques i dinàmiques. <i>Font pròpia</i>	75
Taula 13. Comportament del flux. <i>Font pròpia</i>	75
Taula 14. Comparativa pèrdua de càrrega segons diferents velocitats. <i>Font pròpia</i> . ..	76
Taula 15. Comportament flux cavitació. <i>Font pròpia</i>	78
Taula 16. Programació. <i>Font pròpia</i>	79
Taula 17. Costos directes. <i>Font pròpia</i>	80
Taula 18. Costos indirectes. <i>Font pròpia</i>	80
Taula 19. Costos totals. <i>Font pròpia</i>	81
Taula 20. Costos totals reals. <i>Font pròpia</i>	81
Taula 21. Impacte mediambiental. <i>Font pròpia</i>	82

Índex gràfiques

Gràfic 1. Pèrdua de càrrega. <i>Font propia</i>	49
Gràfic 2. Pèrdua de càrrega MA. <i>Font pròpia</i>	70
Gràfic 3. Compàrativa pèrdua de càrrega. <i>Font pròpia</i>	77

1. Introducció

1.1. Origen i motivació del treball

Des que vaig cursar les assignatures relacionades amb la mecànica de fluids, vaig trobar aquest camp de l'enginyeria molt interessant. El fet d'haver realitzat les pràctiques professionals en una empresa on dissenyaven i feien l'enginyeria de vàlvules destinades a centrals hidroelèctriques i, d'igual manera, el fet que se'm va quedar l'espina de conèixer i aprofundir en els *softwares* dedicats al CFD, van originar la motivació per realitzar l'estudi CFD d'una vàlvula papallona amb tot el que això comporta.

1.2. Objectiu del treball

L'objectiu del treball consisteix a realitzar l'estudi fluidodinàmic d'una vàlvula papallona de DN1200 i PN10 al passar-hi un fluid (aigua) amb diferents règims d'apertura de la vàlvula, per tal de trobar característiques i resultats com són la pèrdua de càrrega i la cavitació originada. Tot això, mitjançant l'ús del *software* ANSYS Fluent.

A nivell personal, considero interessant remarcar els beneficis d'aprendre i relacionar-me amb l'entorn del *software* CFD, i també la responsabilitat i repte que suposa portar endavant un projecte individual.

1.3. Interessos

L'interès del treball roman, també, en la idea d'observar molts dels conceptes teòrics adquirits durant el grau aplicats a la pràctica plasmant, així, gran part del que s'ha après als estudis. Una part molt interessant del treball és, a partir de la variació de la geometria, comprovar els efectes hidrodinàmics en dependència de la geometria utilitzada podent agafar, tanmateix, una idea dels efectes aerodinàmics/hidrodinàmics d'aquestes en molts altres camps.

2. Mecànica de fluids

És la branca de la física que es basa en l'estudi de l'efecte de les forces sobre el fluid i el seu respectiu moviment. Es divideix en dos camps, l'estàtica de fluids i la dinàmica de fluids.

2.1. Conservació de la massa i de la quantitat de moviment

La quantitat de moviment és una magnitud física que descriu el moviment d'un cos. Es defineix com el producte de la massa d'un cos per la seva velocitat en un moment determinat.

En la mecànica de fluids, es parteix de la hipòtesi que assumeix que els fluids conserven la massa i la quantitat de moviment.

2.2. Principis de la termodinàmica

S'assumeix que els fluids segueixen dos dels principis de la termodinàmica:

1. 1r principi de la termodinàmica: Un sistema aïllat pot intercanviar energia amb el seu entorn en forma de treball i de calor, acumulant energia en forma d'energia interna.
2. 2n principi de la termodinàmica: Tots els sistemes tendeixen sempre a un augment del desordre, és a dir, major entropia. No és possible un procés on hi hagi com a únic resultat la transferència de calor d'un cos de menor temperatura a un altre de major temperatura.

2.3. Hipòtesis del medi continu

En aquesta hipòtesi s'ignora l'estructura molecular i les discontinuïtats d'aquesta, considerant que el fluid es continu al llarg de l'espai que ocupa. Aquesta hipòtesi permet considerar que les propietats del fluid (densitat, temperatura, etc.) són funcions contínues.

2.4. Partícula fluida

Aquest concepte està molt lligat al medi continu i és summament important en la mecànica de fluids. Se li diu partícula fluids a la massa elemental de fluid que en un instant determinat es troba en un punt de l'espai. Aquesta massa elemental ha de ser suficientment gran per contenir un gran nombre de molècules i suficientment petit per considerar que en el seu interior no hi ha variacions de les propietats macroscòpiques del fluid, de tal manera que està sempre format per les mateixes molècules. Així doncs, un determinat punt de l'espai en diferents instants estarà ocupat per diferents partícules fluides.

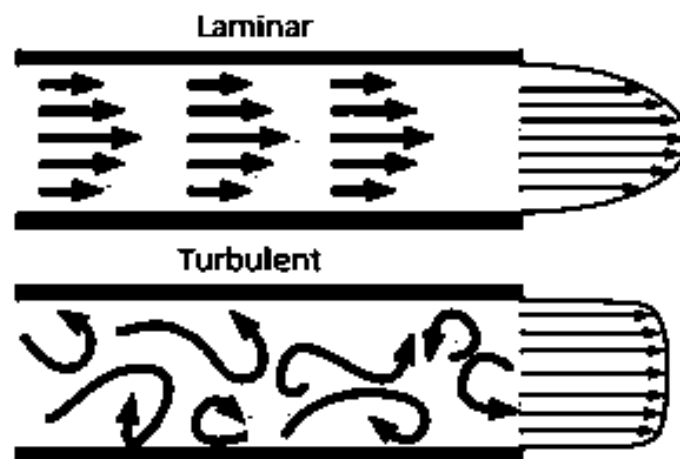
2.5. Flux laminar i turbulent

Quan entre dues partícules en moviment n'hi ha una que es mou més de pressa respecte a l'altre, es produeixen forces de fricció que actuen tangencialment a elles mateixes.

Aquí és on entra en joc la viscositat, la qual intenta impedir l'efecte, generat per les forces esmentades, d'induir una rotació entre les partícules en moviment. Es troben diferents fluxos depenent del valor relatiu de les forces.

S'anomena flux laminar al tipus de moviment d'un fluid quan aquest es troba perfectament ordenat, estratificat i suau, de forma que el fluid es mou en làmines paral·leles sense barrejar-se. Les capes adjacents del fluid llisquen suaument entre elles. Aquest flux es dona quan la diferència de moviment entre les partícules és relativament baixa i, per tant, les partícules es desplacen però no roten.

S'anomena flux turbulent al tipus de moviment d'un fluid quan aquest es troba més irregular, caòtic i impredecible, de forma que les partícules es mouen desordenadament, tot formant remolins aperiòdics. Aquest flux es dona quan la diferència de moviment entre les partícules és relativament alta i, per tant, les partícules adquireixen una energia de rotació apreciable.

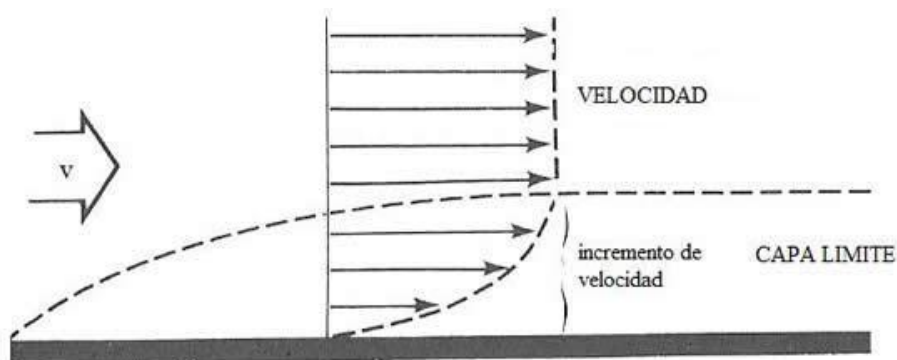


Il·lustració 1. Flux Laminar i Flux Turbulent. Font Pròpia

2.6. Capa límit

La capa límit d'un fluid és la zona on el moviment del fluid és pertorbat per la presència d'un sòlid amb el qual està en contacte. La capa límit s'entén com aquella en què la velocitat del fluid respecte el sòlid en moviment, varia de 0 a 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada.

La capa límit pot ser laminar o turbulenta i l'espessor variarà depenent de la geometria i el comportament del fluid com, per exemple, si és laminar o és turbulent.



Il·lustració 2. Capa límit. *IPSUM Reconstruccion de accidentes de trafico*

2.7. Número de Reynolds

El nombre de Reynolds (Re) és un número adimensional utilitzat en mecànica de fluids per caracteritzar el moviment d'un fluid. El seu valor indica si el fluid segueix un model turbulent o laminar.

El nombre de Reynolds relaciona la densitat, la viscositat, la velocitat i la dimensió típica d'un fluid en una expressió adimensional. El flux es considerarà laminar quan el número Re sigui petit i es considerarà turbulent quan el número sigui gran.

Per un fluid que circula per l'interior d'una canonada circular, el nombre de Reynolds ve donat per la següent expressió:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Equació 1 – Número de Reynolds. *Apunts ingenyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

Re = Número de Reynolds.

v = Velocitat promig característica del fluid.

D = Diàmetre de la canonada.

ν = Viscositat cinemàtica del fluid.

Depenent del número de Re obtingut, es determinarà el tipus de flux del fluid:

- $Re < 2300$: Flux laminar. El flux es manté estacionari i es comporta com si estigues format per làmines primes.
- $2300 < Re < 4000$: Flux de transició. El flux pateix petites ondulacions però segueix mantenint una relativa forma de làmines primes.
- $Re > 4000$: Flux turbulent. Es caracteritza per un moviment del fluid desordenat, no estacionari i tridimensional.

En problemes d'hidràulica en canonades, es considera que quan $Re \approx 2000$, s'inicia el règim turbulent.

2.8. Pèrdua de càrrega

És la pèrdua de pressió degut a la fricció produïda en un flux entre partícules i contra la paret de la canonada.

$$h_L \approx K \frac{v^2}{2g}$$

Equació 2 – Pèrdua de càrrega. Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives

h_L = Pèrdua de càrrega localitzada.

K = Coeficient de resistència.

v = Velocitat mitja de l'aigua.

g = Gravetat.

$$\Delta P = P_i - P_f$$

Equació 3 – Segona equació pèrdua de càrrega, Apunts enginyeria fluidodinàmica Jordi Vives

ΔP = Pèrdua de càrrega

P_i = Pressió inicial

P_f = Pressió final

2.9. Cavitació

La cavitació o aspiració en el buit és el fenomen en el qual creixen bombolles dins d'un fluid, com pot ésser l'aigua i, seguidament, es produeix una depressió que les fa implotar.

La cavitació es produeix quan un fluid en estat líquid passa a gran velocitat a conseqüència de la geometria per on fem passar el fluid. En augmentar la velocitat i, considerant que el procés és isotèrmic, es pot produir una caiguda de la pressió fins a ser inferior a la pressió del vapor saturat i, per tant, produint la formació de bombolles de vapor. Seguidament, les bombolles implotaran de manera brusca podent arribar a produir un important desgast de les peces.

El paràmetre adimensional que descriu aquest fenomen és el nombre de cavitació:

$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Equació 4- Número de cavitació. *Wikipedia (Número de cavitación)*

Ca = Número de cavitació.

p = Pressió ambient.

p_v = Pressió de vapor saturat.

ρ = Densitat del líquid.

V = Velocitat característica.

3. Definició del model numèric

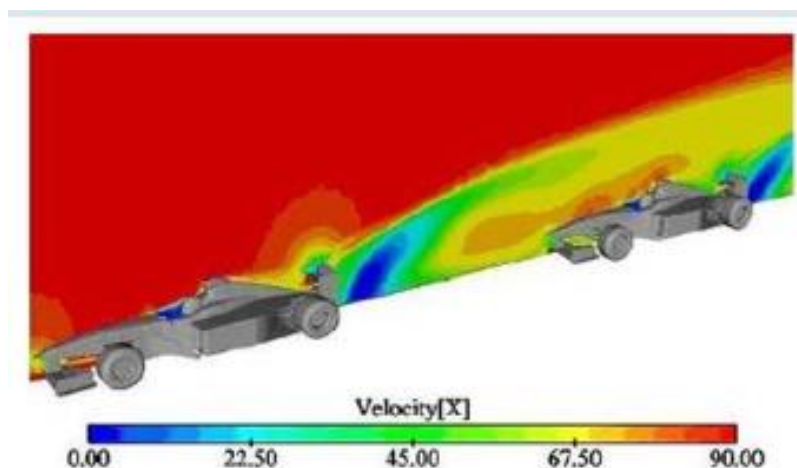
A continuació s'exposen els motius pels quals s'ha utilitzat la simulació computacional per element finits i, en concret, la utilització del software ANSYS CFX. S'explicarà resumidament les equacions que el programa utilitza per solucionar l'estudi i el perquè de la tria del model per al tipus de simulació.

3.1. CFD

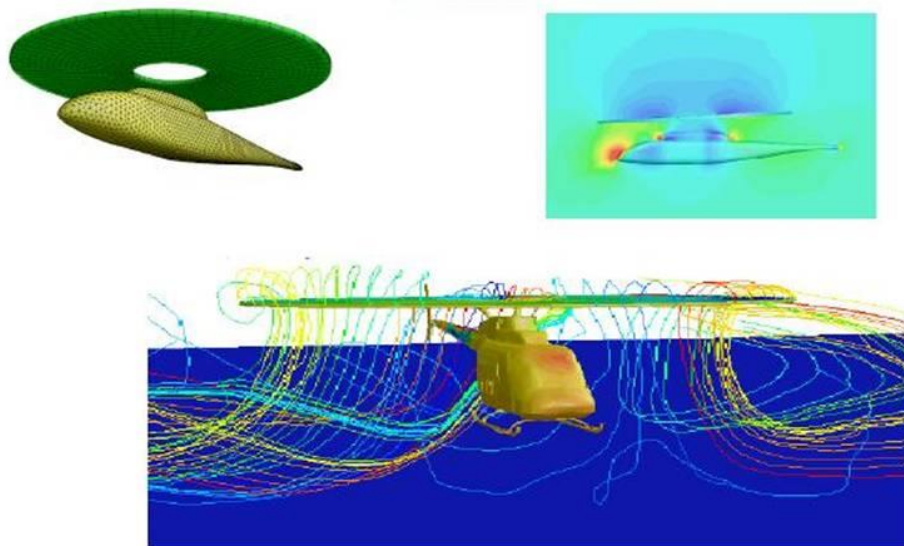
La Dinàmica de Fluids Computacional, abreviat a CFD per les sigles en anglès, és una branca de la mecànica de fluids que utilitza algorismes i mètodes numèrics. Aquests mètodes estan basats en el principi de la conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia per a la resolució i l'anàlisi sobre el flux de fluids.

El CFD permet fer anàlisis complexes de transferències de calor, fluxos inestables i compressibles, mescles i altres. A més, permet simular el pas dels fluids, gasos o líquids, a través d'un cos o al voltant d'aquest.

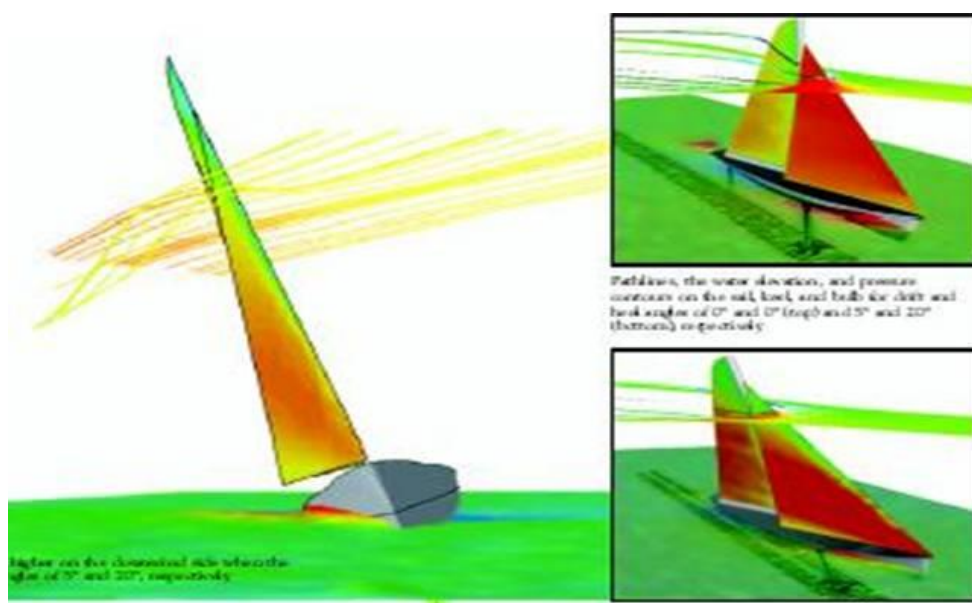
El CFD s'aplica a diferents camps com són l'hidrodinàmic, l'aeronàutica, els motors, les turbomàquines, la combustió i l'enginyeria mediambiental, hidràulica o biomèdica.



Il·lustració 3. Efecte de l'estela d'un cotxe de F1 sobre el perseguidor. *Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga.*



Il·lustració 4. Estudi del flux al voltant d'un helicòpter. *Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga*



Il·lustració 5. Estudi aerodinàmic d'un vaixell. *Grupo Mecànica de Fluidos de Málaga*

3.2. Discretització del domini

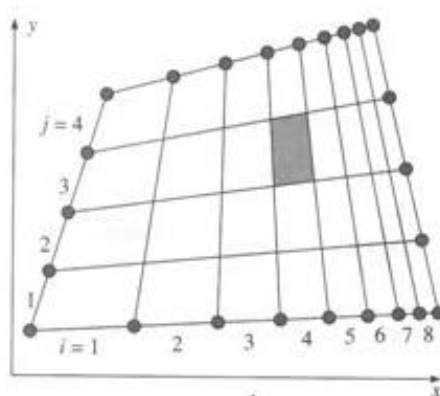
És necessari fer una discretització del volum de control per tal que, posteriorment, es pugui calcular la solució final. A més, cal que es tingui en compte que les discretitzacions es classifiquen en tres categories; les diferències finites, els volums finits i els elements finits.

Els tipus de mallat amb els quals cal centrar-se, es divideixen en dos tipologies:

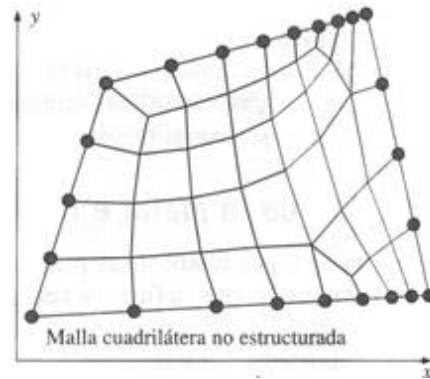
- Mallat estructurat: Les cel·les de la malla són quadrilàters en 2D i hexaedres en 3D.
- Mallat no estructurat: Les cel·les i els nodes de la malla no segueixen cap ordre establert. Els elements de la malla són una barreja de quadrilàters i triangles en 2D i hexaedres en 3D.

Depenent de la discretització de les equacions utilitzades, s'escull un model o altre de mallat. El mètode de volums finits necessita de punts de control en cada volum generat essent possible col·locar els nodes als vèrtexs o al centre dels elements, és a dir, *cell vertex* o *cell center*. Per altra banda, el mètode de diferències finites discretitza les equacions diferencials de Navier-Stokes, amb la necessitat d'una malla estructurada.

Cada un dels dos tipus de mallat té uns avantatges i unes mancances. El principal avantatge del mallat estructurat és la homogeneïtat dels elements i, per tant, la facilitat de tractar els elements veïns. En canvi, però, no compta amb una gran flexibilitat per a dominis complexos i geometries irregulars. En el cas de la malla no estructurada es compta amb l'avantatge de comptar amb molta flexibilitat per adaptar la malla a qualsevol geometria i és molt més senzill per a la computadora, ja que aquesta no ha de complir cap tipus d'ordre predeterminat. Per contra, la malla ocupa molta més memòria que una malla estructural.



Il·lustració 6. Mallat estructurat. [Google sites \(MANI FO1\)](#)



Il·lustració 7. Malla no estructurada. [Google sites \(MANI FO1\)](#)

Després d'haver explicat la discretització del domini a l'anterior apartat, es pot explicar la manera com treballa i opera el *solver* del programa resolent les equacions diferencials sobre els dominis els quals hem discretitzat. El què es busca és que convergeixin i això s'aconsegueix fent repetidament solucions nodals de forma iterativa amb els ajustaments degudament especificats. Les equacions que s'utilitzen són principalment l'equació diferencial de la conservació de la massa i l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Sempre parlant d'un flux estacionari, compressible i newtonià.

L'equació de la conservació de la massa en forma diferencial la podem expressar de la següent manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

Equació 5 - Equació diferencial de la conservació de la massa. [Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga](#)

Tenint en compte que el flux és incompressible, es pot menysprear la densitat. A més, s'aprecia que és un flux permanent i, per tant, les propietats no depenen del temps sinó de la posició i, per tant, menysprearem el temps. Així doncs, l'expressió simplificada serà la següent:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Equació 6 - Equació diferencial de la conservació de la massa simplificada. [Grupo Mecánica de Fluidos de Málaga](#)

Tenint en compte la segona llei de Newton, anomenada també llei fonamental de la dinàmica, i amb l'aplicació d'aquesta al moviment d'un flux dins d'un volum de control

diferent, s'obtenen els tres components de l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Les equacions resultants són anomenades equacions de *Navier-Stokes*.

Sabent que l'objecte d'estudi serà un flux incompressible, amb densitat constant i viscositat, les equacions resulten de la següent manera:

$$\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \mu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}$$

Equació 7 - Equació 1 de Navier-Stroke. *Grupo Mecanica de Fluidos de Malaga*

$$\rho g_y - \frac{dP}{dy} + \mu \left(\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}$$

Equació 8 - Equació 2 de Navier Stroke. *Grupo Mecanica de Fluidos de Malaga*

$$\rho g_z - \frac{dP}{dz} + \mu \left(\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{d^2w}{dy^2} + \frac{d^2w}{dz^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}$$

Equació 9 - Equació 3 de Navier-Stroke. *Grupo Mecanica de Fluidos de Malaga*

3.3. Model Cavitació

El *software* ANSYS Fluent permet implementar la cavitació amb el model multifàsic basat en la mescla de fases. La cavitació pren el paper de mecanisme de transferència de massa entre les dues fases permetent, així, la interacció entre fases.

Aquest model, per defecte, considera que el camp de velocitat del vapor és el mateix que el del líquid i, per tant, utilitza el model homogeni multifàsic. No obstant això, també es pot utilitzar el model no homogeni si el cas ho requereix. El model de cavitació, utilitza l'equació de Rayleigh-Plesset, la qual descriu el creixement de les bombolles de vapor en el líquid.

La implementació i utilització d'aquest model, modifica i afegeix múltiples variables de l'arxiu:

- Pressió: en tenir en compte la transferència de massa, no es garanteix que totes les pressions absolutes calculades pel *solver* siguin positives. No obstant això, sense utilitzar i activar aquest model, les mateixes pressions poden arribar a ser més negatives amb les mateixes condicions de contorn. Les pressions obtingudes amb la cavitació, simulen més acuradament les pressions d'un suposat cas real, ja que l'aparició del vapor, al ser un fet que sorgeix realment a la pràctica, s'ha de tenir en compte.
- Pressió de vaporització: és la pressió que opera de nexa entre la fase líquida i la fase vapor del fluid. Aquest valor el defineix l'usuari tenint en compte la temperatura a la qual treballarà el fluid. La pressió de vaporització que dóna el programa per defecte és de 3540Pa, amb la qual es produeix la interacció de fases a temperatura ambient.

A part de les variables generals que es poden modificar, també hi ha variables específiques del model que es seleccioni, depenent de si es tria el model *Schnerr-Sauer* o el model *Zwart-Gerber-Belamri*:

- *Schnerr-Sauer*
 - Densitat del número de bombolla: El valor per defecte és de $1 \cdot 10^{-11}$.
- *Zwart-Gerber-Belamri*
 - Diàmetre de bombolla: El valor per defecte és de $1 \cdot 10^{-6}$ m.
 - Fracció de volum a la nucleació: Per defecte és de 0.0005.
 - Coeficient d'evaporació: Per defecte el valor és de 50.
 - Coeficient de condensació: El valor predeterminat és de 0.01.

3.4. Model de turbulència

En les simulacions del projecte s'utilitza el model de turbulència k - ϵ estàndard. Aquest model de turbulència és el més utilitzat per a problemes de fluidodinàmica, des que va ser proposat per Launder i Spalding. La robustesa, l'economia i la precisió per a un gran ampli ventall de problemes amb turbulència, han fet que creixés enormement l'ús i popularitat del model.

El model de turbulència està basat en les equacions diferencial parcials de l'energia cinètica de turbulència (k) i del seu grau de dissipació (ϵ). El model d'equació de k és derivat a partir de l'equació exacte. Per contra, el model de l'equació ϵ s'obté utilitzant raonaments físics i té poc en comú amb la seva contrapart matemàticament exacte.

Cal tenir en compte que el model k - ϵ estàndard només és vàlid per fluxos totalment turbulents i, per tant, per utilitzar-lo s'ha de comprovar que el flux es comporta de manera totalment turbulent.

En els models que se simulen en el projecte, s'utilitzen els valors que per defecte dona el *software* quan seleccionem aquest model de turbulència. No obstant això, es poden modificar.

La viscositat turbulenta és calculada combinant la k i la ϵ com es mostra a continuació:

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

Equació 10 - Equació Viscositat turbulenta. *ANSYS HELP*

Sent C_μ una constant

4. Model numèric

4.1. Consideracions inicials

Per a la realització de qualsevol simulació CFD, són necessàries diferents condicions inicials com són la geometria de l'objecte d'estudi o les variables que es consideren inicialment.

En el cas d'aquest projecte particular, la geometria d'estudi és una Vàlvula papallona amb les seves respectives canonades aigües amunt i aigües avall, amb un diàmetre nominal de **1200mm** i considerant que la vàlvula es troba en posició totalment oberta.

El cabal operatiu és de **9,1m³/s** i tenint en compte que la densitat de l'aigua és de **1000Kg/m³** podem calcular el cabal màssic a partir de la següent fórmula:

$$\dot{m} = \rho Q$$

Equació 11 - Equació del cabal màssic. Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives

\dot{m} = Cabal màssic

ρ = Densitat

Q = Cabal

Donant com a resultat un cabal màssic de **9100Kg/s**.

Per a calcular la velocitat d'entrada, la qual s'utilitza directament a la simulació, fem servir la fórmula del cabal:

$$Q = Sv$$

Equació 12 - Equació del cabal. Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives

Q = Cabal

S = Secció

v = Velocitat

Tenint en compte que el diàmetre nominal és de 1200mm, es calcula la secció amb la fórmula de l'àrea del cercle:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Equació 13 - Equació de l'àrea del cercle. *Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

S'obté una secció de **1.13m²** i, per tant, reordenant la fórmula del cabal enfocada a calcular la velocitat, esdevé la següent equació:

$$v = \frac{Q}{S}$$

Equació 14 - Equació de l'àrea del cercle. *Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

Donant com a resultat una velocitat de **8m/s**.

Amb l'objectiu d'observar com es comporta el fluid a diferents velocitats per a la simulació de la pèrdua de càrrega, es simulen quatre velocitats més, a part de l'operativa calculada. Aquestes velocitats són de **2m/s, 5m/s, 11m/s i 14m/s** respectivament.

En decidir que s'utilitza el model de turbulència *k-ε* estàndard, s'ha d'assegurar que el fluid es comportà de forma turbulenta a dins de la geometria, ja que aquest model de turbulència, tal com s'ha especificat a apartats anteriors, només és apte quan el flux en tot moment té un número de $Re > 2000$ i, per tant, en tot moment es considera turbulent.

Per calcular el nombre de Re prenem diferents consideracions, observant l'equació de Reynolds:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Equació 15 - Número de Reynolds. *Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

Sabent que la viscositat cinemàtica de l'aigua a temperatura ambient és, aproximadament, de $1 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, assumint que la velocitat que donaria el número de Re més baix és de **2m/s** (cas menys favorable), calculant l'equació de la viscositat menyspreant la vàlvula en si degut al fet que, tot i tenir un radi hidràulic inferior, hi circula una velocitat més gran i, per tant, el número Re tindria un valor més gran i valorant que el recorregut que el fluid fa a la vàlvula és considerablement inferior al que fa a les canonades obtenim el següent resultat.

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{2 \cdot 1,2}{0,000001} = 400000$$

Equació 16 - Nombre de Reynolds resolt. Resolució pròpia

S'obté un valor de Re de 400000 el qual indica que el fluid circula en un règim totalment turbulent i, per tant, es pot fer servir el model de turbulència $k-\epsilon$ estàndard.

En resum, les consideracions inicials són les següents:

DN = 1200mm

PN = 10bar

Q = 9,1m³/s

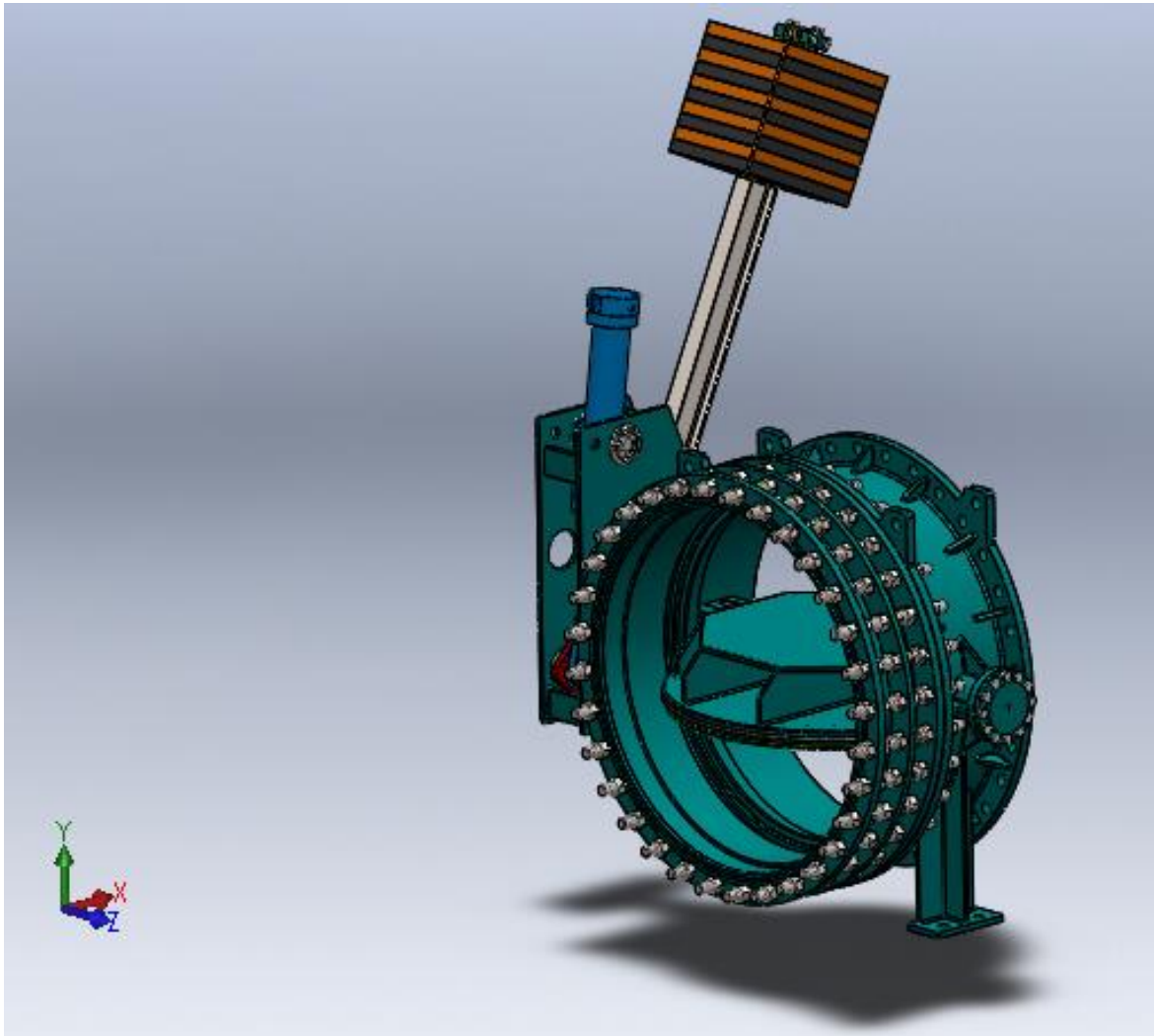
m = 9100Kg/s

v = 8m/s

Re_{min} = 400000

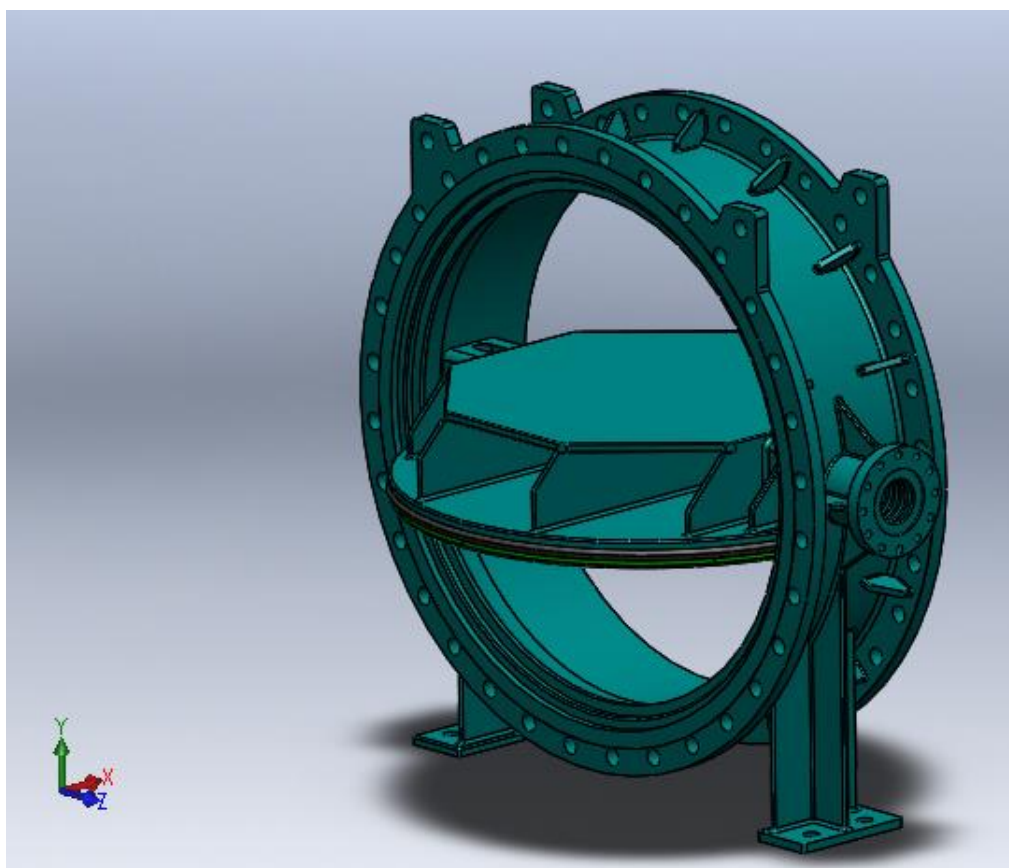
4.2. Geometria

Per a la creació de la geometria, s'ha partit del disseny original d'una vàlvula papallona de diàmetre nominal de **1200mm** amb les característiques geomètriques i estructurals per operar sense problemes a una pressió nominal de 10bar. El *software* utilitzat ha estat el *Solidworks*.



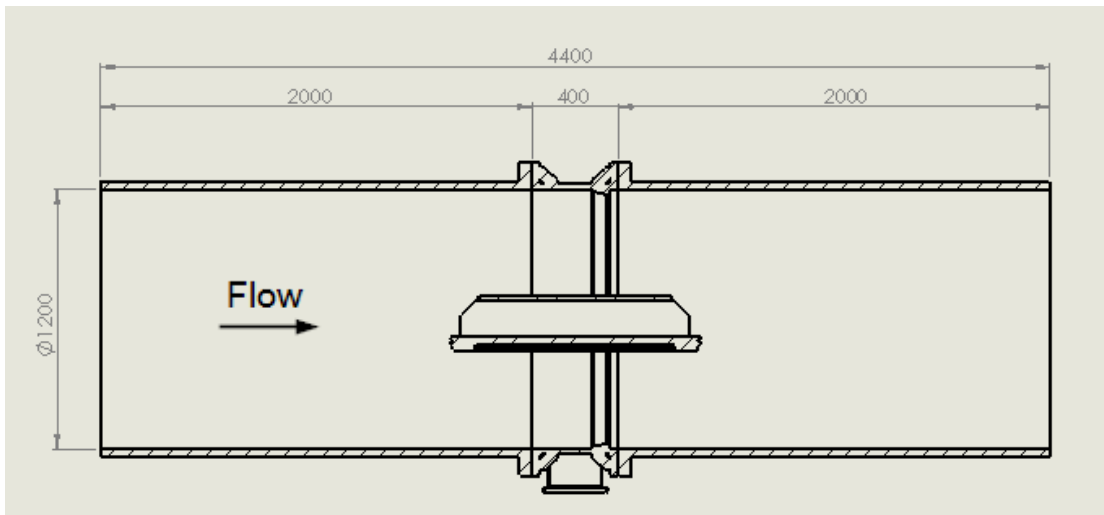
Il·lustració 8. Geometria original. Font pròpia.

A partir de la geometria original, s'ha realitzat una simplificació de la vàlvula, tot suprimint els components que no influïen en el funcionament hidrodinàmic de la pròpia vàlvula. Seguidament, s'ha simplificat els components restants per tal de reduir problemes i dificultats a l'hora de fer el mallat i la simulació de la geometria.



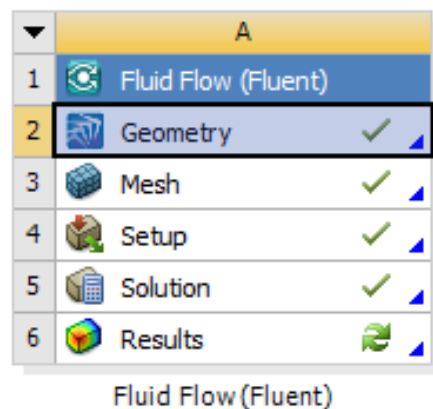
Il·lustració 9. Geometria simplificada. Font pròpia

El següent pas ha estat afegir una canonada aigües amunt i una altra aigües avall, necessàries per optimitzar els resultats de la simulació. Aquestes s'han dimensionat amb la intenció que, si bé suposessin un ajustament més real del comportament del fluid, no generessin problemes a l'hora de mallar i simular per una excessivament gran dimensió, tenint en compte la ja bastant gran dimensió de la vàlvula en si.

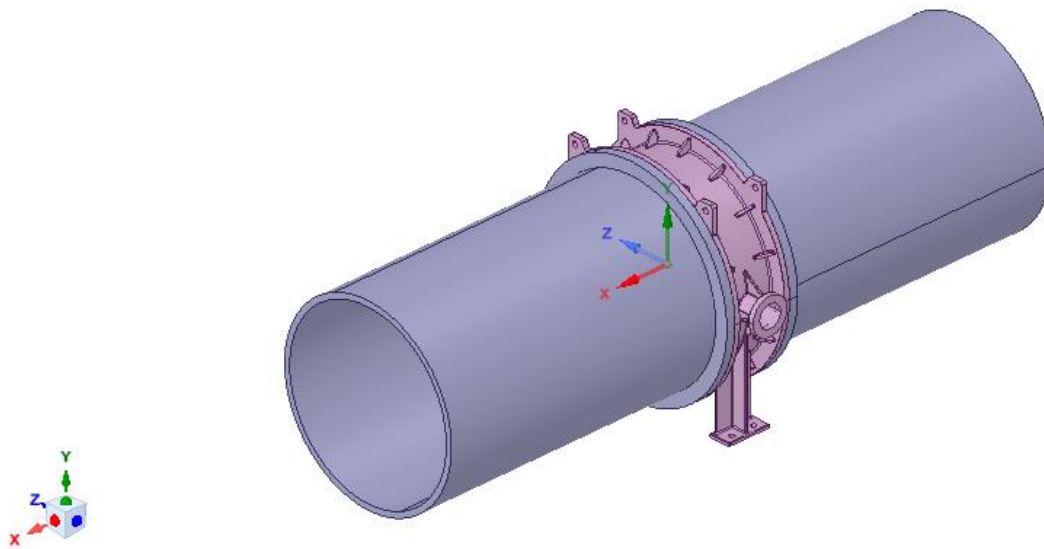


Il·lustració 10. Secció 2D de la geometria amb les cannonades. Font pròpia.

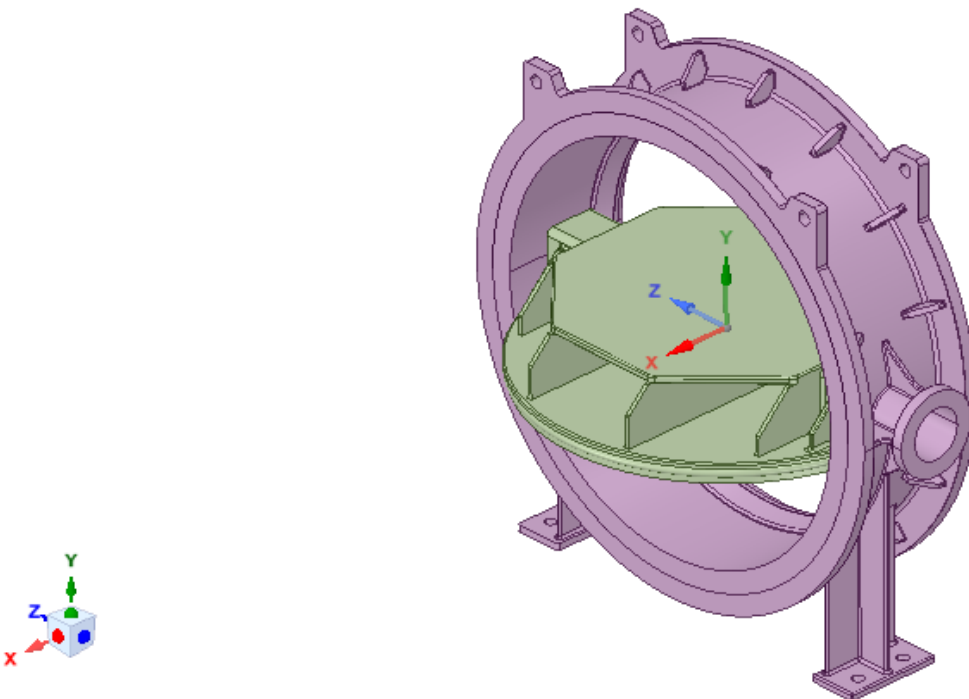
Un cop importada la geometria al *software* Ansys ja treballant amb el mòdul Fluent i, específicament, amb l'opció *Geometry*, s'ha passat a extreure el volum de la geometria que pertany al recorregut que ha de fer el fluid dins de la pròpia geometria. Aquesta geometria extreta serà l'única que s'utilitzarà a la simulació, podent suprimir o desactivar la geometria base.



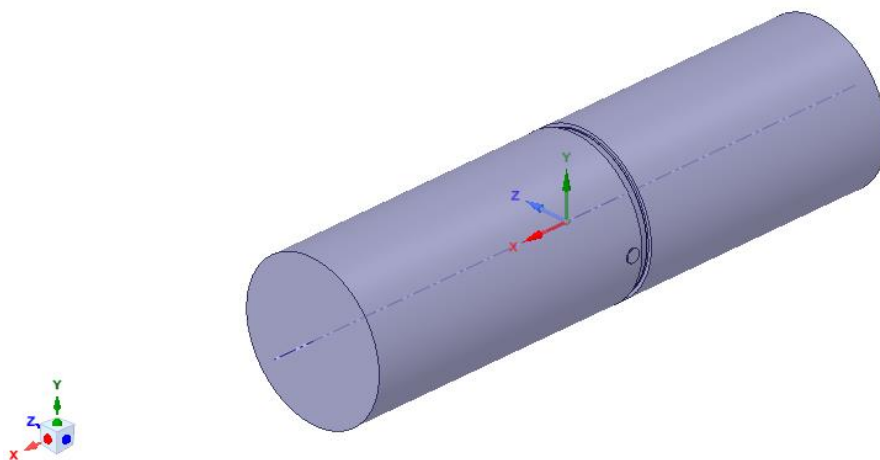
Il·lustració 11. Selecció del mòdul geometria. Font pròpia.



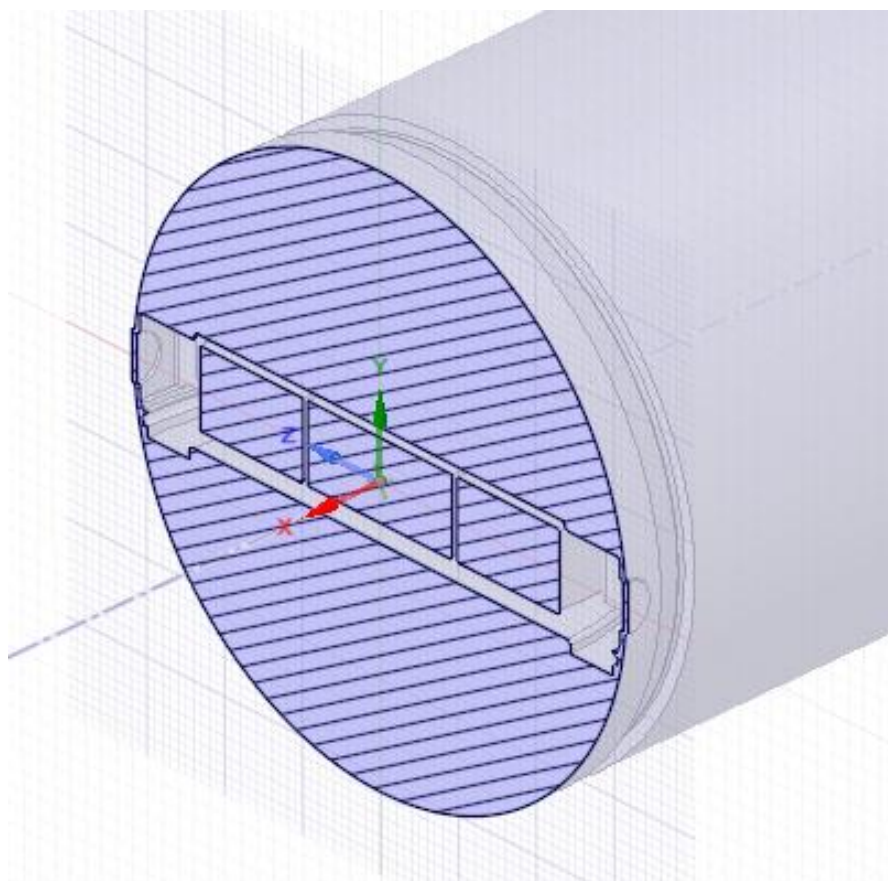
Il·lustració 12. Geometria amb les cannonades. Font pròpia.



Il·lustració 13. Geometria simplificada 2. Font pròpia.



Il·lustració 14. Volum extret de la geometria. *Font pròpia.*



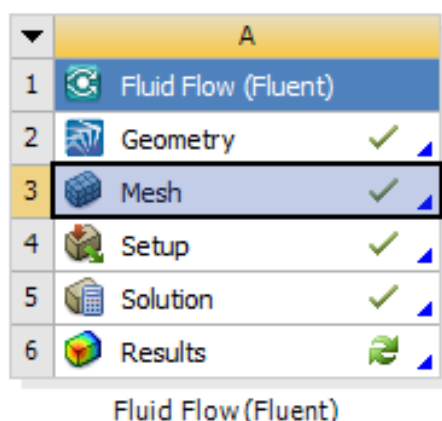
Il·lustració 15. Secció del volum. *Font pròpia.*

4.3. Mallat

Amb la geometria ja establerta, el següent pas ha estat definir la malla que discretitzi el domini de l'objecte d'estudi. Aquest pas té un pes molt important a la simulació, sent un punt clau perquè la simulació doni uns resultats ben semblants als que ocorrien a la realitat, intentant que els temps i dificultats de dits resultats siguin, sempre que sigui possible, els més reduïts, eficients i equilibrats.

A l'hora de definir i optimitzar la malla, s'ha de destacar la necessitat d'arribar a alts nivells de precisió amb els mínims elements possibles, per tal d'optimitzar els recursos del propi *software*. S'ha d'intentar, dintre de la possibilitat, dimensionar elements petits a zones on no hi ha un interès hidrodinàmic que requereixi aquesta distribució. Tot i això, s'ha de tenir en compte que contra més grans siguin els elements de la malla, menys acurats seran els resultats obtinguts i, per tant, és necessari coordinar elements petits a les zones crítiques i elements molt més grans a les zones menys crítiques. Una malla més refinada proporcionarà uns resultats més fiables, però amb un temps de processament per a la solució molt més gran i, en certs casos, amb el rebuig per part del *solver* a executar la simulació.

En definitiva, l'objectiu del disseny de la malla es basa a obtenir un mallat òptim amb el menor nombre d'elements possibles, però sempre tenint en compte l'objectiu d'obtenir uns resultats fiables. Per tal d'aconseguir aquest objectiu, es disposa de diferents tècniques de mallat que proporciona el *software* com són el refinat de la paret on apareix la capa límit o la inflació d'elements personalitzada, entre d'altres.



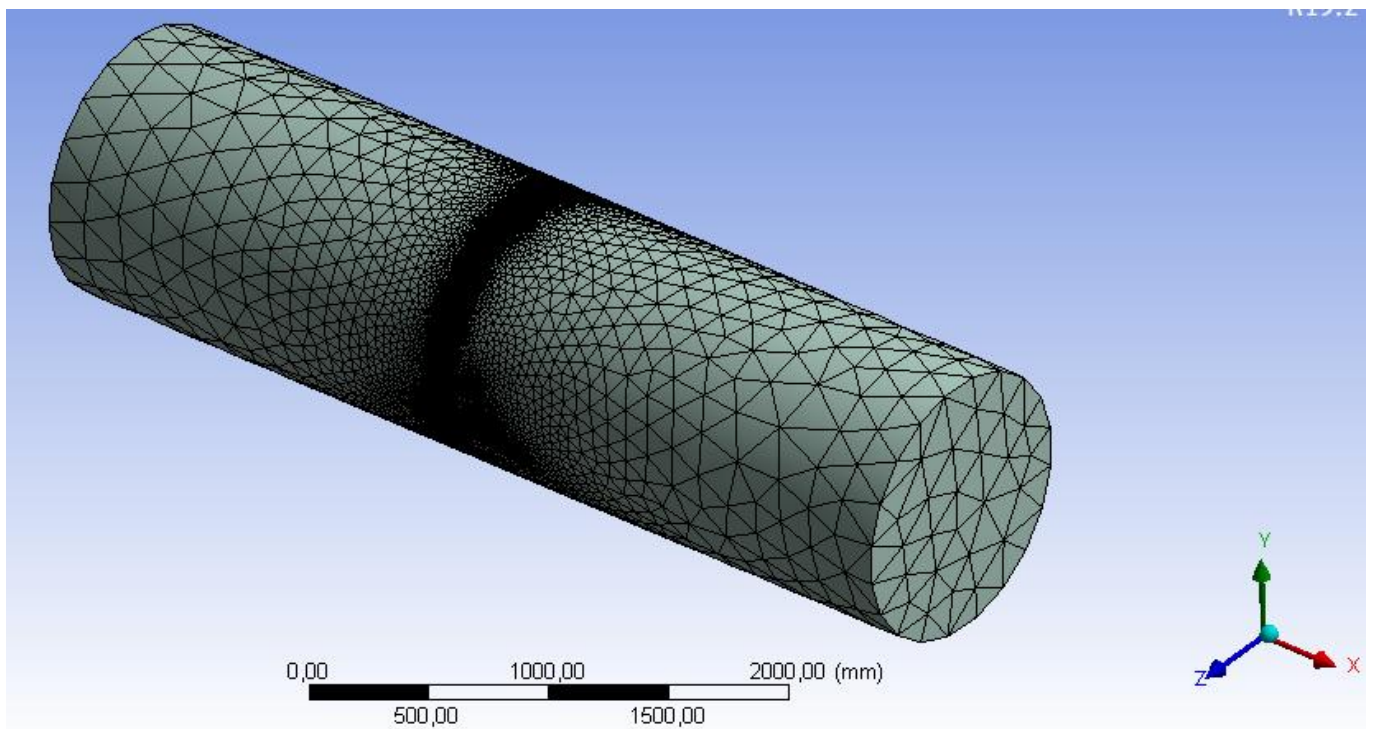
II-lustració 16. Selecció del mòdul de mallat. Font pròpia.

A l'hora de mallar i, després d'haver rebut el rebuig per part del *solver*, en part per la ja important dimensió de la geometria, diversos cops per aportar una malla amb elements excessivament petits i un refinat massa acurat als punts crítics, s'ha decidit fer el malla automàtic que genera el propi fluent (*solver* escollit) amb una suavització del malla alta (*high smoothie*), per tal de fer admissible la malla a l'hora de simular. La decisió de triar el malla automàtic s'ha pres després d'observar que als punts claus de la malla, la mida del malla s'empetitia de manera coordinada amb els interessos hidrodinàmics de la geometria.

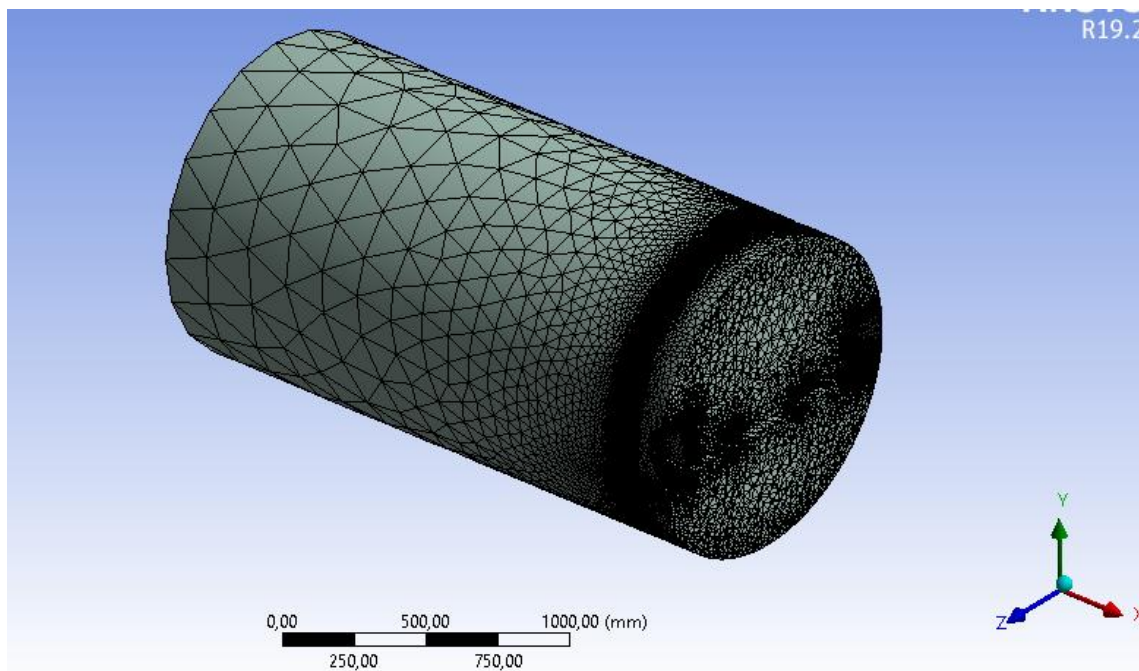
Com es pot observar, el malla és del tipus no estructurat i té les següents característics destacables:

Nodes	641366
Elements	3394937

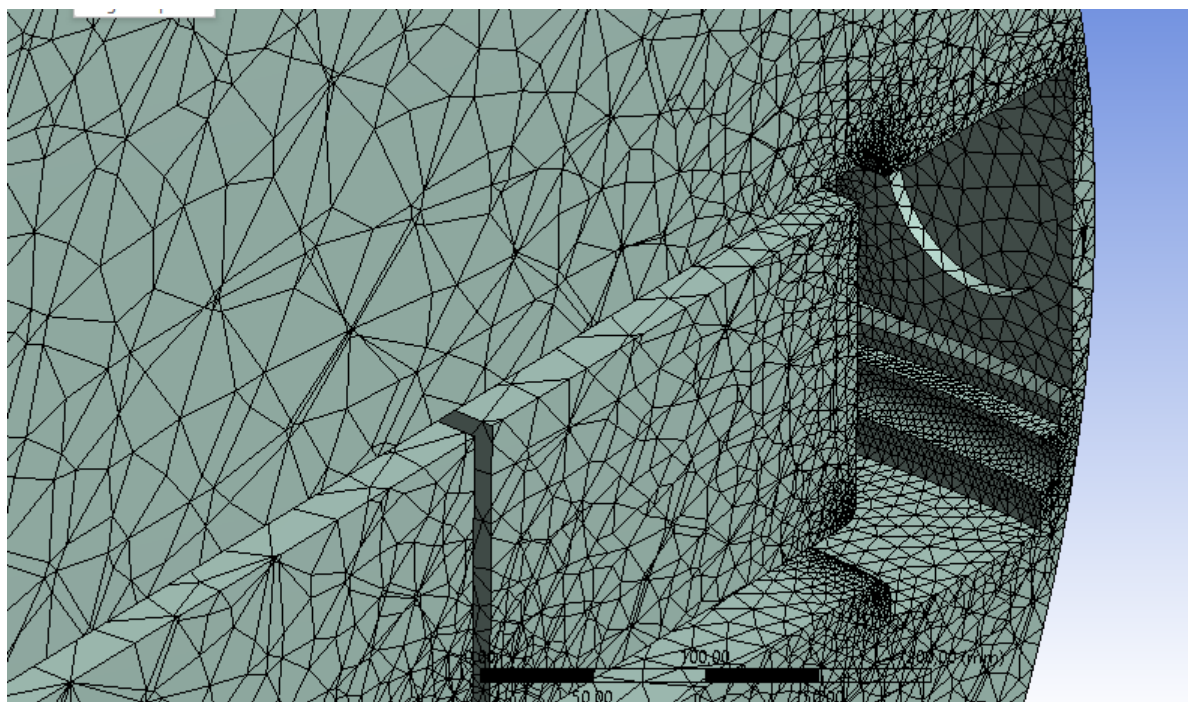
Taula 1 Característics del malla. *Font pròpia.*



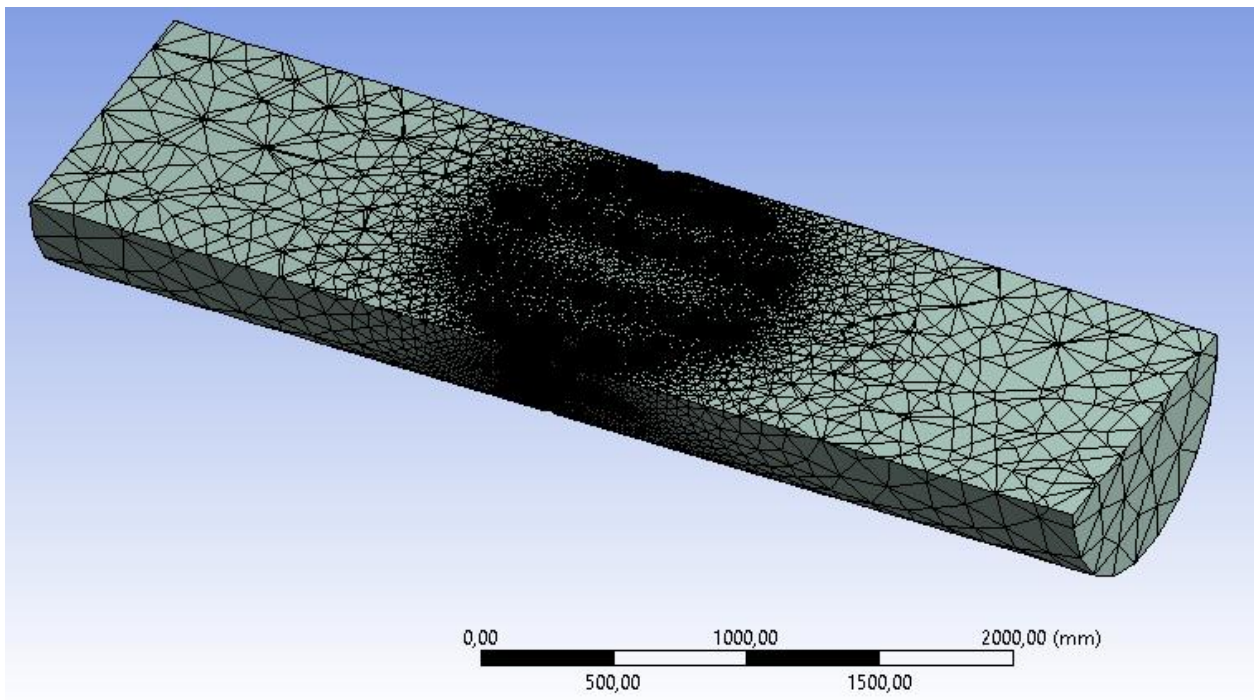
Il·lustració 17. Volum malla. *Font pròpia.*



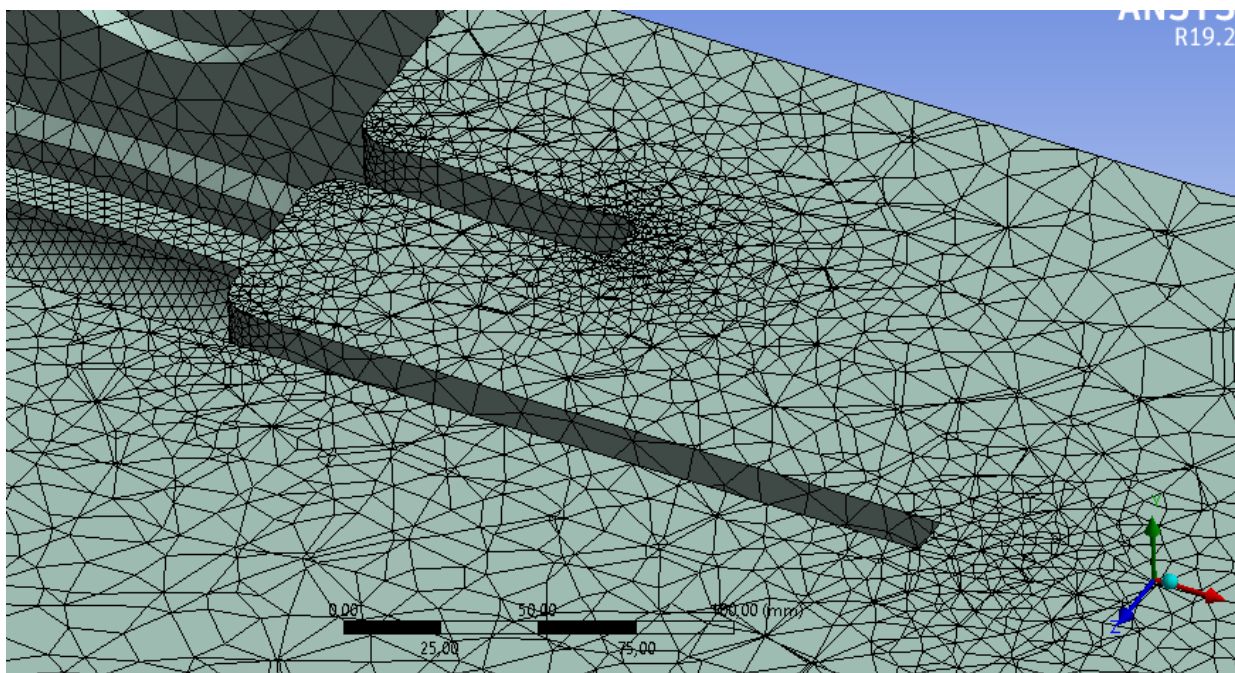
Il·lustració 18. Mallat seccionat. Font pròpia.



Il·lustració 19. Detall del mallat seccionat. Font pròpia.



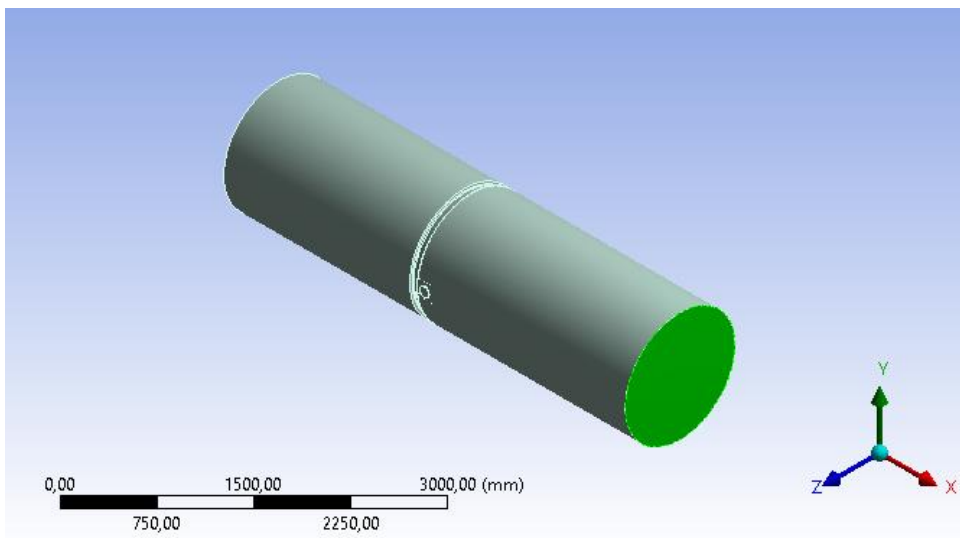
Il·lustració 20. Secció 2 del mallat. Font pròpia.



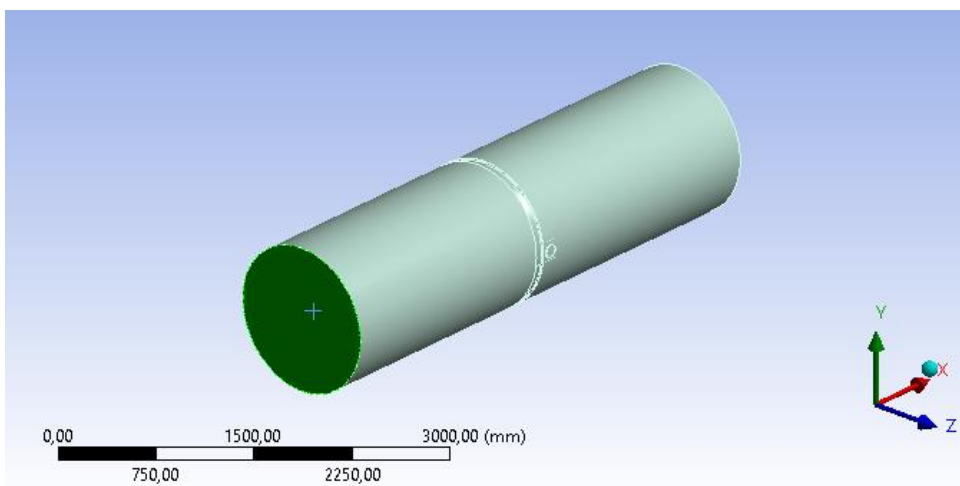
Il·lustració 21. Detall de la secció 2 del mallat. Font pròpia.

Un cop mallada la geometria, és el torn de seleccionar les diferents superfícies del domini i anomenar-les amb la funció "*Named Selections*". Les superfícies definides seran utilitzades quan es defineixin les condicions de contorn a l'hora de fer la simulació. S'assigna el següent nom a cada superfície.

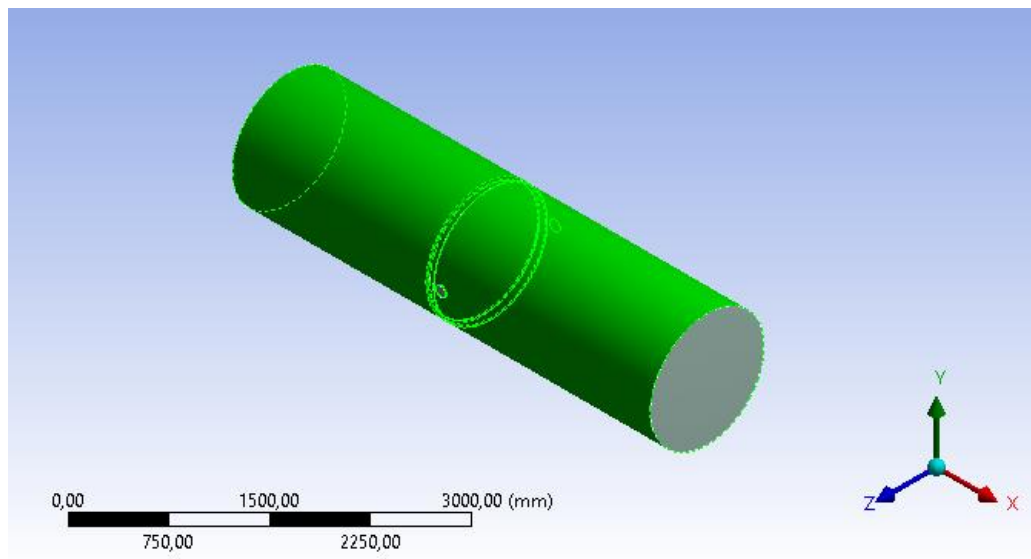
- Entrada flux: *Inlet*
- Sortida flux: *Outlet*
- Paret exterior: *Wall*
- Paret interior: *Inner Wall*



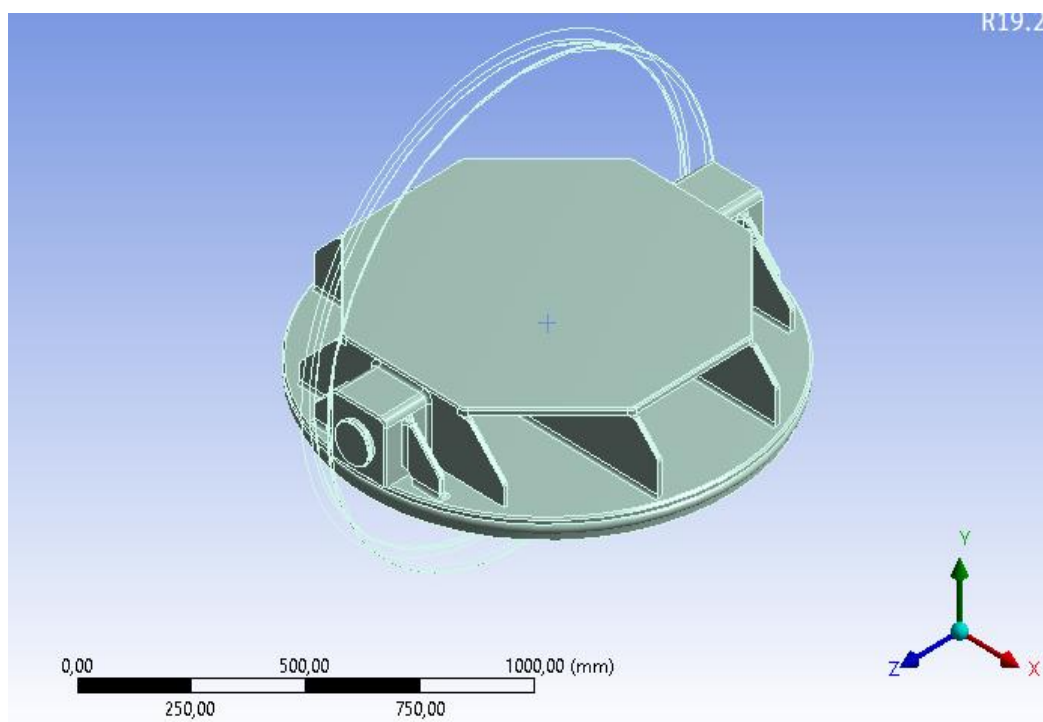
Il·lustració 22. Entrada flux. Font *propia*.



Il·lustració 23. Sortida del flux. Font *propia*.



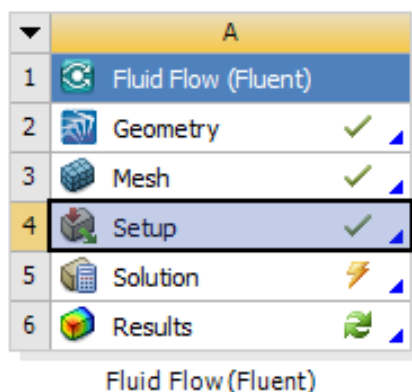
II-lustració 24. Paret exterior. Font pròpia.



II-lustració 25. Paret interior. Font pròpia.

4.4. Models de Simulació

Amb la malla definida, el següent pas és definir els paràmetres i la preparació dels models de simulació, per tal d'aconseguir uns resultats satisfactoris, i observar i analitzar els resultats obtinguts un cop simulat. Per dur a terme això, s'ha buscat donar solució i resultats tant a la pèrdua de càrrega com al possible efecte de cavitació que pugui patir la vàlvula i, per tant, s'ha modelat un tipus de simulació per a cada cas, els quals s'han anomenat com a model de la pèrdua de càrrega i model de cavitació respectivament.



Il·lustració 26. Mòdul de simulació. Font pròpia.

Un cop realitzada la simulació i estudiat els resultats, s'ha procedit a fer una millora de la geometria de la vàlvula amb l'objectiu de millorar la hidrodinàmica d'aquesta i, com a conseqüència, millorar els resultats obtinguts al simular aquesta segona geometria.

4.4.1. Model de la pèrdua de càrrega

Aquest model té com a objectiu estudiar les pèrdues de càrrega produïdes per la vàlvula, a conseqüència del fregament que es dona entre el fluid i la geometria. L'estudi s'ha fet amb diferents velocitats per tal de comparar com afecte la pròpia velocitat a la pèrdua de càrrega.

4.4.1.1. Mòduls

Per a aquesta simulació s'ha activat el mòdul turbulència $k-\epsilon$ estàndard com s'ha comentat anteriorment per tal d'estudiar el fregament amb les parets exteriors i interiors de la geometria. El mòdul de cavitació no s'ha activat, ja que s'activa a la següent simulació amb la base dels resultats d'aquesta primera.

4.4.1.2. Material

El material del fluid que representa la geometria s'ha definit que és aigua líquida (*Water-liquid* (H_2O) al fluent *database*) a temperatura ambient constant (isotèrmic) amb el canvi de la densitat original de $998,2\text{Kg/m}^3$ a 1000Kg/m^3 .

4.4.1.3. Condicions de contorn

Per a les condicions de contorn s'ha definit que el paràmetre d'entrada és la velocitat i, tot i que la vàlvula opera a 10bar, no es defineix la pressió perquè l'objectiu d'aquesta primera simulació és estudiar la pèrdua de càrrega per a una determinada velocitat d'entrada independentment de la pressió d'entrada.

Per a definir aquest apartat s'ha de definir les variables i paràmetres de les superfícies seleccionades i definides al mallat:

- *Inlet*: A l'entrada del flux s'ha definit la opció de velocitat d'entrada (*velocity-inlet*) sent la velocitat d'entrada de 8m/s i, per tal d'observar com evoluciona la pèrdua de càrrega, també s'ha definit les velocitats de 2m/s, 5m/s, 11m/s i 14m/s. S'ha definit una turbulència del 5% d'intensitat amb un radi hidràulic de 1,2m.
- *Outlet*: A la sortida s'ha definit l'opció de sortida de flux (*Outflow*) considerant que és l'opció més adient per calcular la pèrdua de càrrega
- *Wall*: A la paret exterior s'ha definit l'opció de paret (*Wall*) per tal de simular el fregament que produeix la canonada.
- *Inner Wall*: A la paret interior s'ha definit igualment l'opció de paret (*Wall*) per tal de simular el fregament que produeix l'obturador.

4.4.1.4. Preparació del càlcul

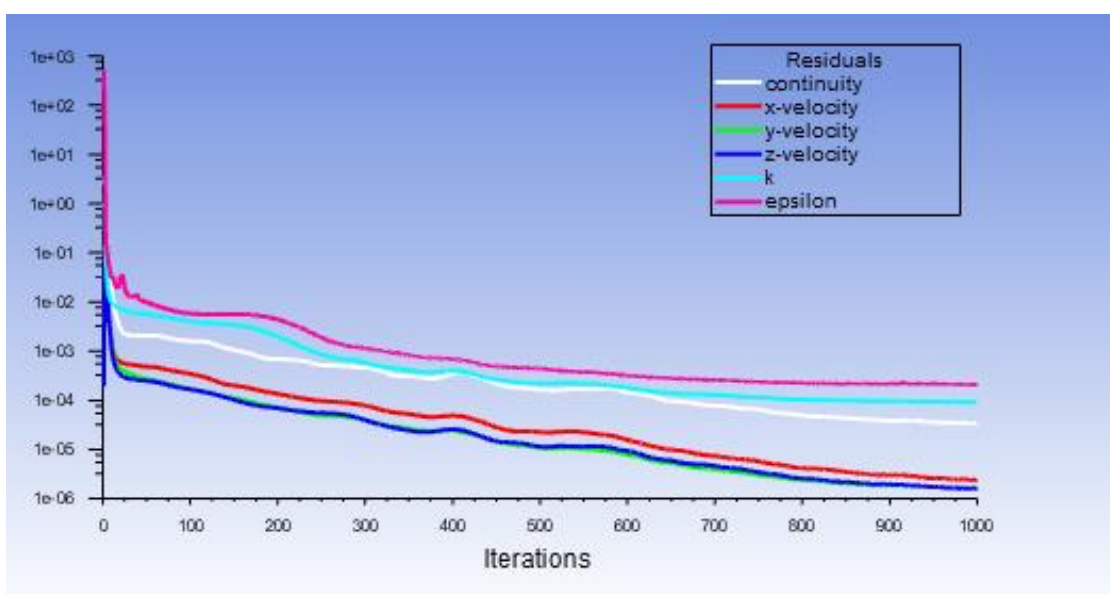
Amb la preparació del càlcul es pot definir tant el nombre d'iteracions fixat on el càlcul s'atura, el valor amb el qual els residus convergeixen i, per tant, s'atura el càlcul, els paràmetres amb els quals inicialitzar la simulació, definir o editar el mètode de solucionar la simulació i/o comprovar que la simulació, mallat i altres no donaran problemes a mig simular.

Després de comprovar que s'obtenen uns resultats amb sentit, s'ha establert que el càlcul de solucions s'aturi tant quan els residus hagin convergit a un valor de 10^{-4} com quan es compleixin les 1000 iteracions (el que passi abans) amb el qual s'obtenen uns resultats satisfactoris.

El mètode de solució s'ha definit per defecte i per a la inicialització s'ha utilitzat els paràmetres definits a l'*inlet* amb els quals la velocitat establerta és perfectament perpendicular a l'*inlet*. S'ha comprovat que el cas no dóna problemes a l'hora de simular. Tot i això, s'ha hagut de redissenyar la malla diverses vegades i la geometria, fins a arribar a un mallat que fos acceptat per la simulació. Tot això amb el cost d'haver realitzat la malla menys refinada degut a les dimensions relativament grans de la geometria.

4.4.1.5. Resultats del càlcul

Després dels passos anteriors s'ha posat en marxa la simulació i, un cop arribat a les 1000 iteracions, el *solver* s'ha aturat. Cal destacar que la majoria dels residuals es trobaven ja sota el líndar del valor de 10^{-4} .



Il·lustració 27. Taula residuals. Font pròpia.

Així doncs, un cop finalitzat el càlcul s'han revisat els resultats obtinguts quant a pressió d'entrada i de sortida, podent calcular així la pèrdua de càrrega per a la velocitat de 8m/s.

Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
8	49651	40353	9298

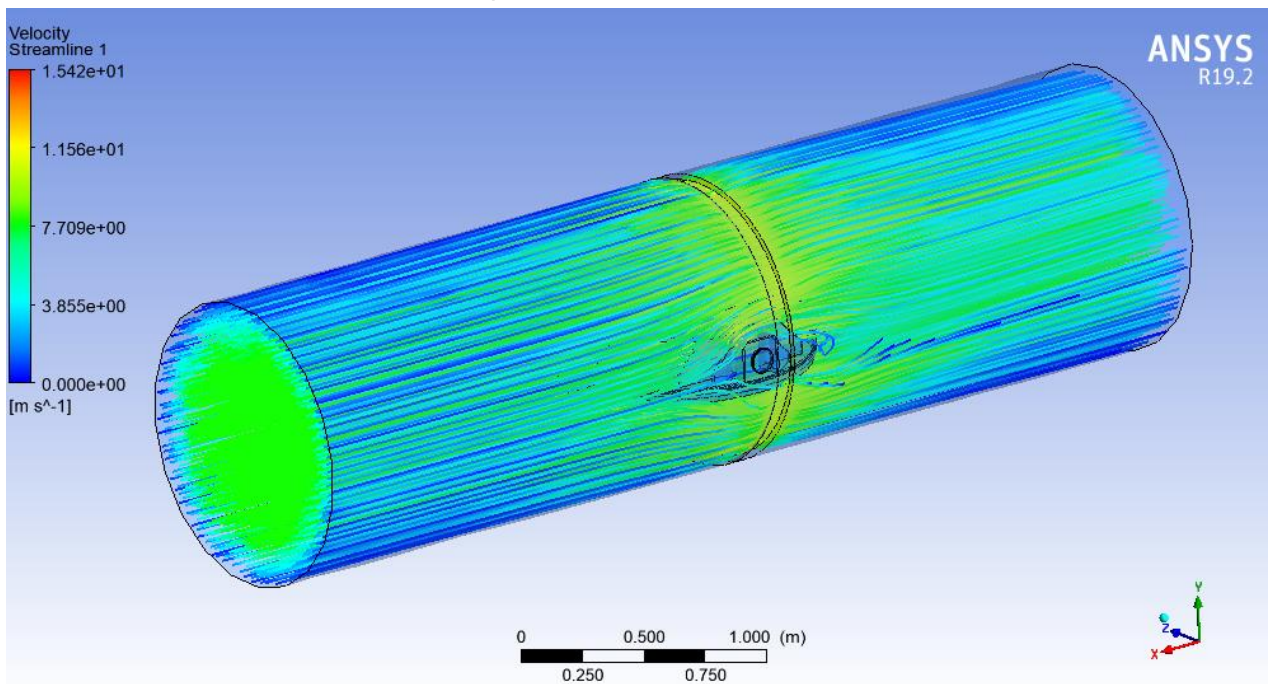
Taula 2. Pèrdua de càrrega. Font pròpia.

A més, també s'ha extret les dades de les pressions estàtiques i dinàmiques.

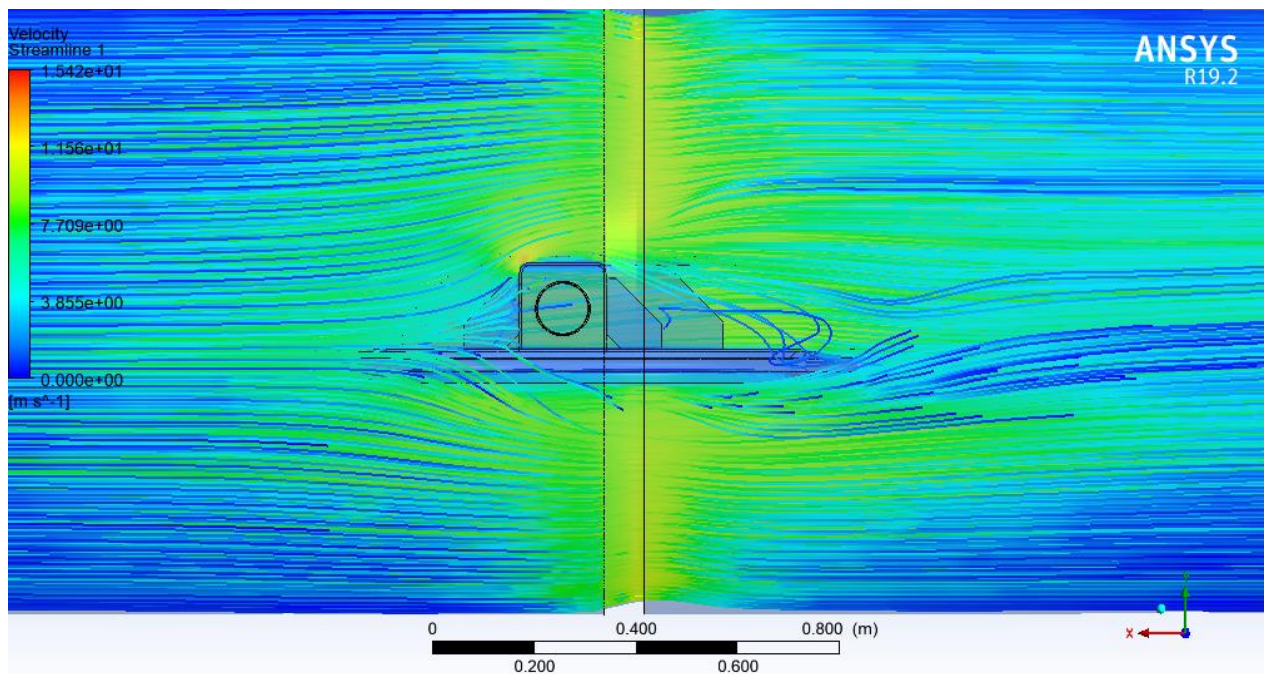
Pi està. (Pa)	Pf està. (Pa)	Pi dinà. (Pa)	Pf dinà. (Pa)
17978	8946	31673	31407

Taula 3. Pressions estàtiques i dinàmiques. Font pròpia.

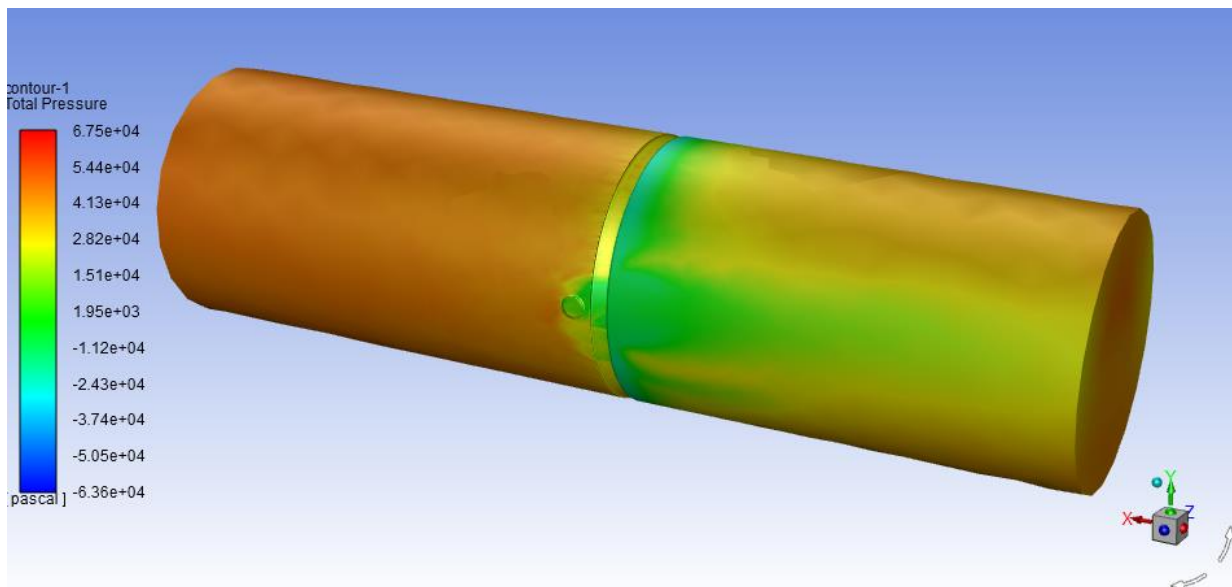
Un cop registrada la pèrdua de càrrega, es passa a observar el comportament del fluid. En les imatges següents s'observen els punts crítics, els punts més turbulents, la variació de velocitat, la variació de pressió, etc.



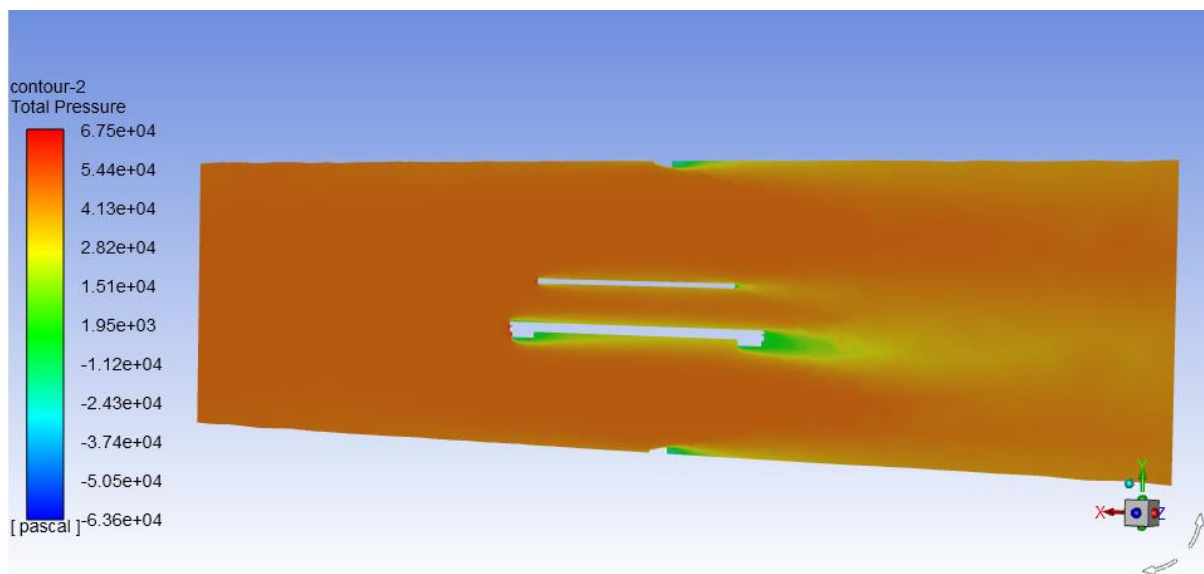
Il·lustració 28. Trajectoria de la velocitat. Font pròpia.



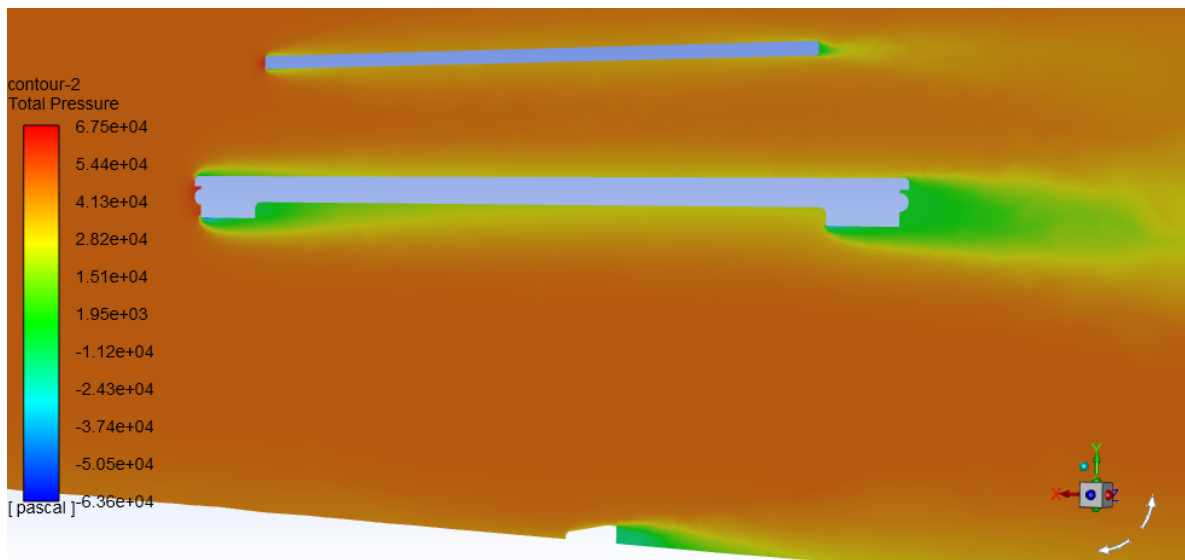
Il·lustració 29. Detall trajectoria velocitat. Font pròpia.



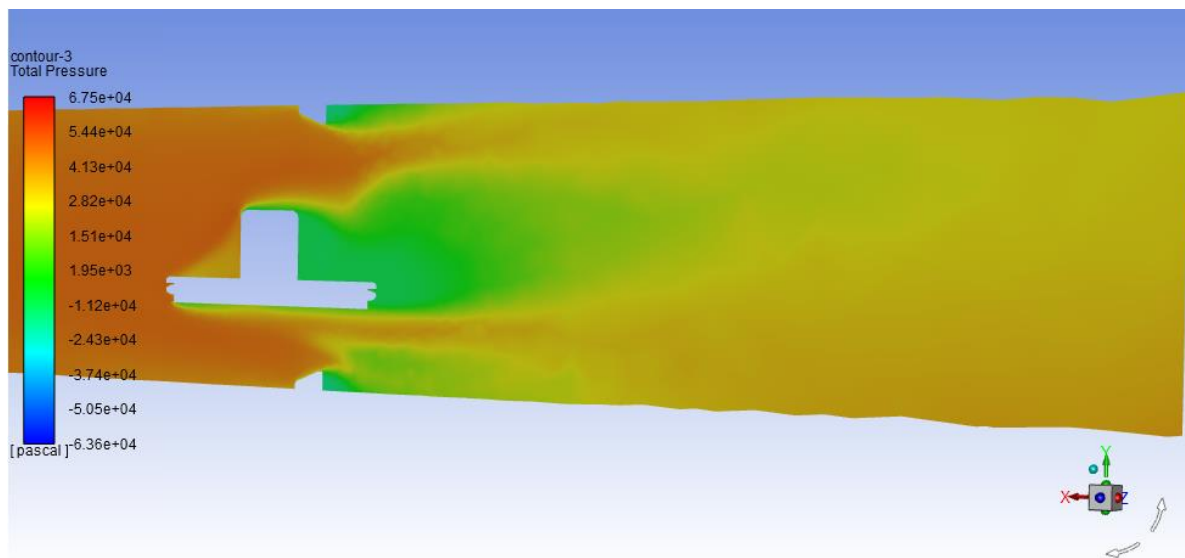
Il·lustració 30. Gràfic pressió. Font pròpia.



Il·lustració 31. Gràfic 2 pressió. Font pròpia.



Il·lustració 32. Detall gràfic 2 pressió. Font pròpia.

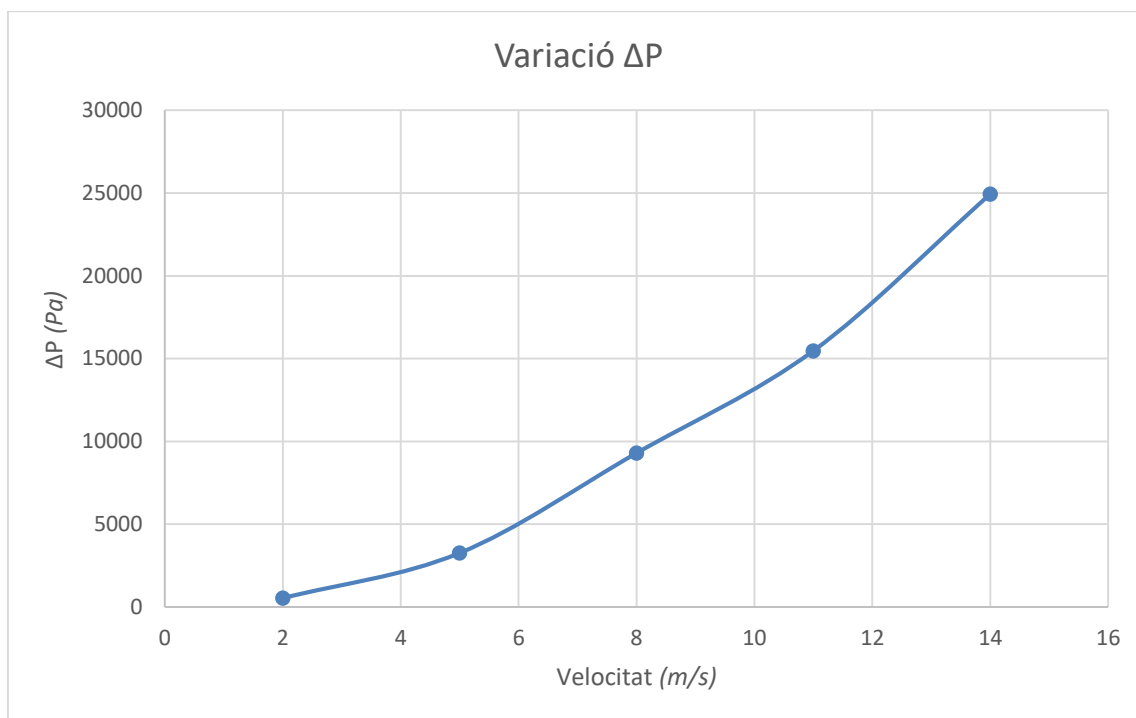


Il·lustració 33. Gràfic 3 pressió. Font pròpia.

Un cop analitzada la pèrdua de càrrega, s'ha fet la simulació amb la resta de velocitats comentades per tal d'observar la variació de la pèrdua de càrrega en relació amb la velocitat.

Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
2	3021	2487	534
5	18872	15610	3262
8	49651	40353	9298
11	91608	76132	15475
14	148279	123340	24939

Taula 4. Pèrdua de càrrega per a diferents velocitats. Font pròpia.



Gràfic 1. Pèrdua de càrrega. Font pròpia.

Observant el gràfic s'aprecia clarament que la tendència és exponencial en coherència amb com la velocitat opera a la fórmula de la pèrdua de càrrega.

Per tal de reduir la pèrdua de càrrega, s'ha de modificar la geometria perquè sigui més hidrodinàmica amb especial atenció als punts més crítics.

4.4.2. Model de cavitació

Aquest model té com a objectiu estudiar la possible cavitació que es pot produir als punts crítics on la pressió pot arribar a baixar per sota de la pressió de saturació del vapor d'aigua, produint així el fenomen esmentat. Contràriament al model anterior, la simulació requereix un temps molt elevat per resoldre el càlcul establert, a causa dels múltiples paràmetres afegits per tal que es generi. A més, en aquest model, ja coneixen les diferents pressions del sistema, tindrem en compte que la vàlvula opera als 10bar esmentats.

4.4.2.1. Mòduls

Per a aquesta simulació, així com a l'anterior, s'ha activat el mòdul turbulència $k-\epsilon$ per tal tenir en compte el fregament amb les parets exteriors i interiors de la geometria. A més, ja amb els resultats obtinguts a la simulació anterior, s'ha activat el mòdul de cavitació.

Per al mòdul de cavitació s'ha establert el model *Schnerr-Sauer*, degut a la lleugera facilitat per definir en relació amb el model *Zwart-Gerber-Belamri*. El fluid inicial serà completament format per aigua líquida, a causa de la pressió que opera la vàlvula i, si la pressió cau fins a la pressió de vaporització, es produeix la interacció amb el vapor d'aigua. Referent als paràmetres, s'ha definit els que hi ha establerts per defecte, ja que el fluid opera a temperatura ambient i, per tant, la interacció de fases es produirà a la pressió de vaporització de 3540Pa

4.4.2.2. Material

El material de la primera fase de la interacció (fase 1) que representa la geometria s'ha definit que és aigua líquida (*Water-líquid* (h2o<l>) al fluent *database*) a temperatura ambient constant (isotèrmic) amb el canvi de la densitat original de 998,2Kg/m³ a 1000Kg/m³. Un cop arribada a la pressió de saturació, si es dona el cas, es produeix la interacció amb la segona fase (fase 2) la qual s'ha definit que és vapor d'aigua (*Water-vapor* (h2o) al fluent *database*) amb els paràmetres per defecte donats pel software.

4.4.2.3. Condicions de contorn

Coneixent les pressions que operen a la geometria i extrapolant aquestes per a una pressió inicial de 10 bar, s'ha definit que el paràmetre d'entrada és la pressió d'entrada, igual que el de sortida, que també és la pressió de sortida.

Primerament, per tal d'obtenir el valor de la pressió total final, simplement reestructurem la fórmula de la pèrdua de càrrega.

$$P_f = P_i - \Delta P$$

Equació 17 - Equació pèrdua de càrrega reestructurada. Resolució pròpia.

En segon lloc, sabent les pressions totals i observant les següents fórmules.

$$P = P_e + P_d$$

Equació 18 - Equació de la pressió total. *Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

P = Pressió total.

P_e = Pressió estàtica.

P_d = Pressió dinàmica.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Equació 19 - Equació de la pressió dinàmica. *Apunts enginyeria fluidodinàmica, Jordi Vives*

P_d = Pressió dinàmica.

ρ = Densitat del líquid.

V = Velocitat característica.

Es dedueix que per extrapolar a les pressions totals esmentades, juntament amb la velocitat de 8m/s que opera a la vàlvula, s'ha de mantenir el valor de la pressió dinàmica i, per a la pressió estàtica, reestructurar la fórmula de la pressió total.

$$P_e = P - P_d$$

Equació 20 - Equació de la pressió total reestructurada. *Resolució pròpia.*

P = Pressió total.

P_e = Pressió estàtica.

P_d = Pressió dinàmica.

Així doncs, restant les pressions dinàmiques obtingudes amb el model de pèrdua de càrrega a la pressió de 10bar i a la pressió de sortida calculada i, tenint en compte que els valors que es defineixen són la pressió total i la dinàmica, s'obtenen aquests resultats, els quals seran usats a la simulació.

Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pi està. (Pa)	Pf està. (Pa)
1000000	990702	968327	959295

Taula 5. Pressions extrapolades a 10bar. *Font pròpia.*

Per a definir aquest apartat, s'ha de definir les variables i paràmetres de les superfícies seleccionades i establertes al mallat, tenint en compte les pressions extrapolades:

- *Inlet*: A l'entrada del flux s'ha definit l'opció de pressió d'entrada (*pressure-inlet*) sent la pressió total d'entrada de 1000000Pa i, per tal de simular la velocitat de 8m/s, també s'ha definit la pressió estàtica de 968327Pa. S'ha definit una turbulència del 5% d'intensitat amb un radi hidràulic de 1,2m.

- *Outlet*: A la sortida s'ha definit l'opció de pressió de sortida (*pressure-outlet*) considerant que és l'opció més adient per calcular la pèrdua de càrrega. La pressió estàtica s'ha definit de 959295Pa, la turbulència del 5% d'intensitat i el radi hidràulic de 1,2m.
- *Wall*: A la paret exterior s'ha definit l'opció de paret (*Wall*) per tal de simular el fregament que produeix la canonada.
- *Inner Wall*: A la paret interior s'ha definit igualment l'opció de paret (*Wall*) per tal de simular el fregament que produeix l'obturador.

4.4.2.4. Preparació del càlcul

Amb la preparació del càlcul es pot precisar, igual que en el cas anterior, tant el nombre d'iteracions fixat on el càlcul s'atura, el valor amb el qual els residus convergeixen i, per tant, s'atura el càlcul, els paràmetres amb els quals inicialitzar la simulació, definir o editar el mètode de solucionar la simulació i/o comprovar que la simulació, mallat i altres no donaran problemes a mig simular.

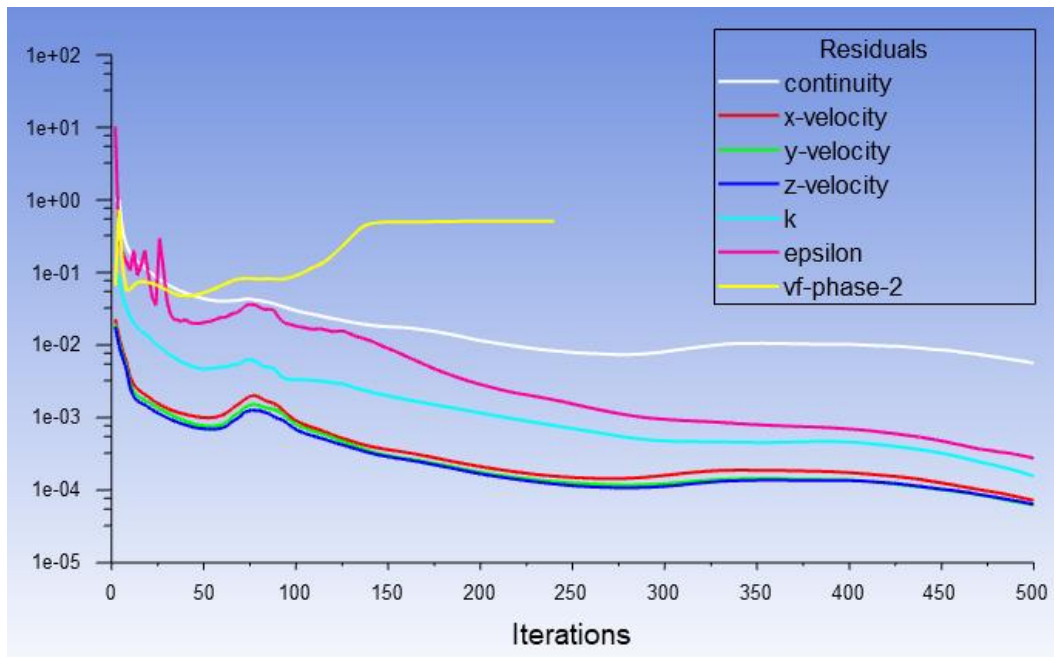
Després de comprovar que s'obtenen uns resultats amb sentit, s'ha establert que el càlcul de solucions s'aturi tant quan els residus hagin convergit a un valor de 10^{-4} com quan es compleixin les 500 iteracions (el que passi abans) amb el qual s'obtenen uns resultats satisfactoris. El fet de triar les 500 iteracions en comptes de les 1000 anteriors ha estat, en part, per l'augment considerable del temps de simulació sent, aproximadament de, 150 hores per aquest segon model.

El mètode de solució s'ha definit amb uns paràmetres amb un ordre de càlcul més alt que el que estableix el software per defecte i s'ha establert que es resolgui amb el doble de precisió tot i l'increment de temps que això comporta. Per a la inicialització s'ha utilitzat els paràmetres definits a l'*inlet* amb els quals la velocitat és perfectament perpendicular a l'*inlet*. S'ha comprovat que el cas no dona problemes a l'hora de simular. Tot i això, i en relació amb el model anterior, s'ha hagut de redissenyar la malla i la geometria diferents cops, fins a arribar a un mallat que fos acceptat per la simulació. Tot això, amb el cost d'haver fet la malla menys refinada degut a les dimensions relativament grans de la geometria.

En resum, aquest segon model de simulació requereix més exigència i precisió a l'hora de calcular la simulació degut a la complexitat que representa aquest model per afegir conceptes com són la transferència de massa, la interacció entre fases, etc.

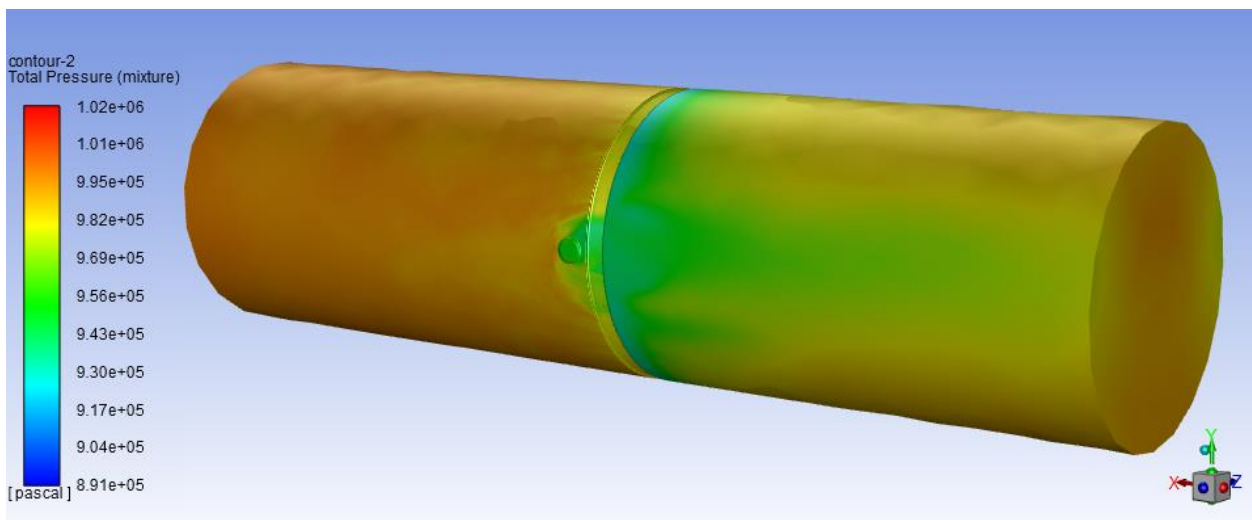
4.4.2.5. Resultats del càlcul

Després dels passos anteriors, s'ha posat en marxa la simulació i, un cop arribat a les 500 iteracions, el *solver* s'ha aturat. Com s'ha comentat a l'apartat anterior, aquesta simulació ha requerit unes 150 hores aproximadament.



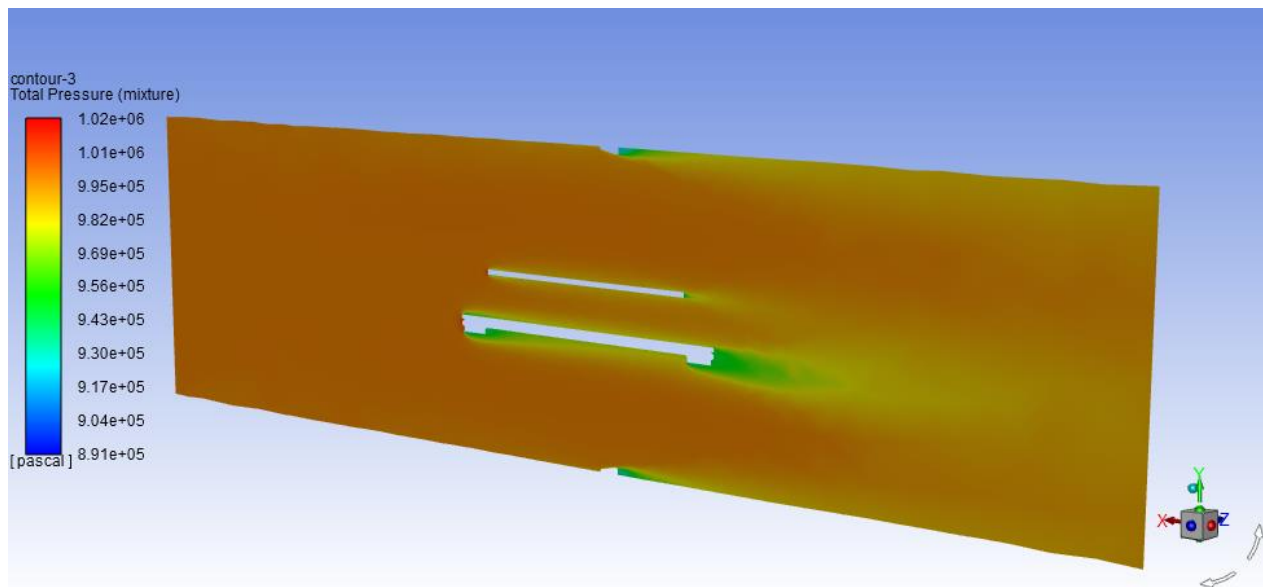
Il·lustració 34. Residuals cavitació. Font pròpia.

Un cop la simulació ha finalitzat, es passa a observar el comportament del fluid. En les imatges següents s'observen els punts crítics, els punts més turbulents, els punts amb cavitació o on aquesta és més propera, la variació de pressió, etc.

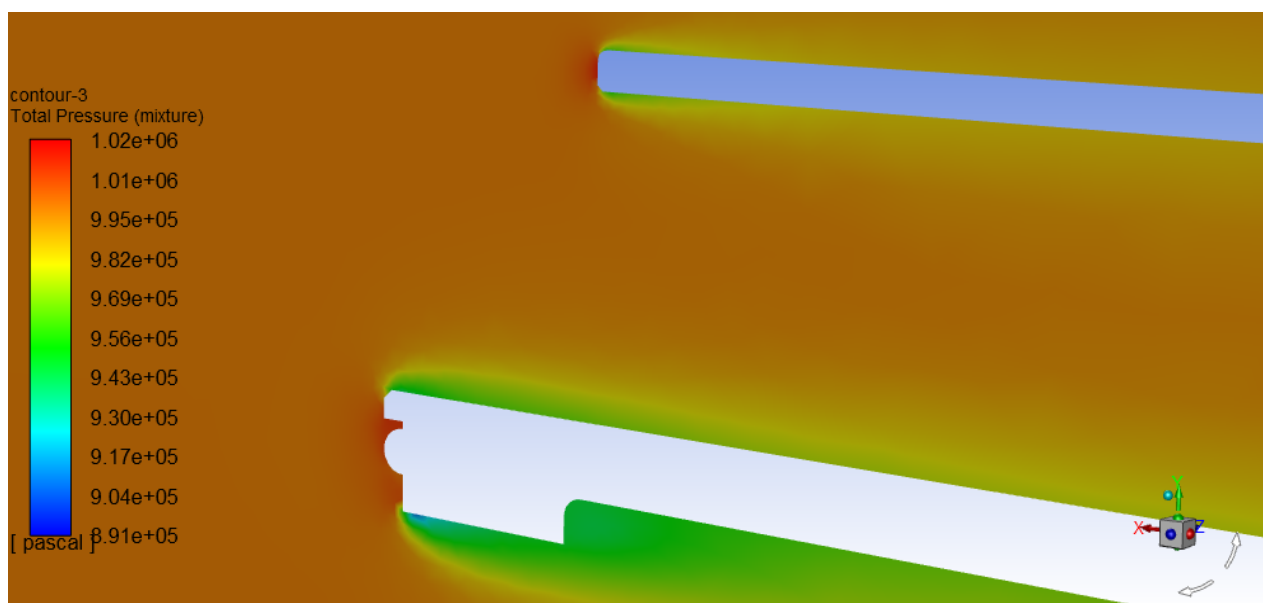


Il·lustració 35. Gràfic cavitació. Font pròpia.

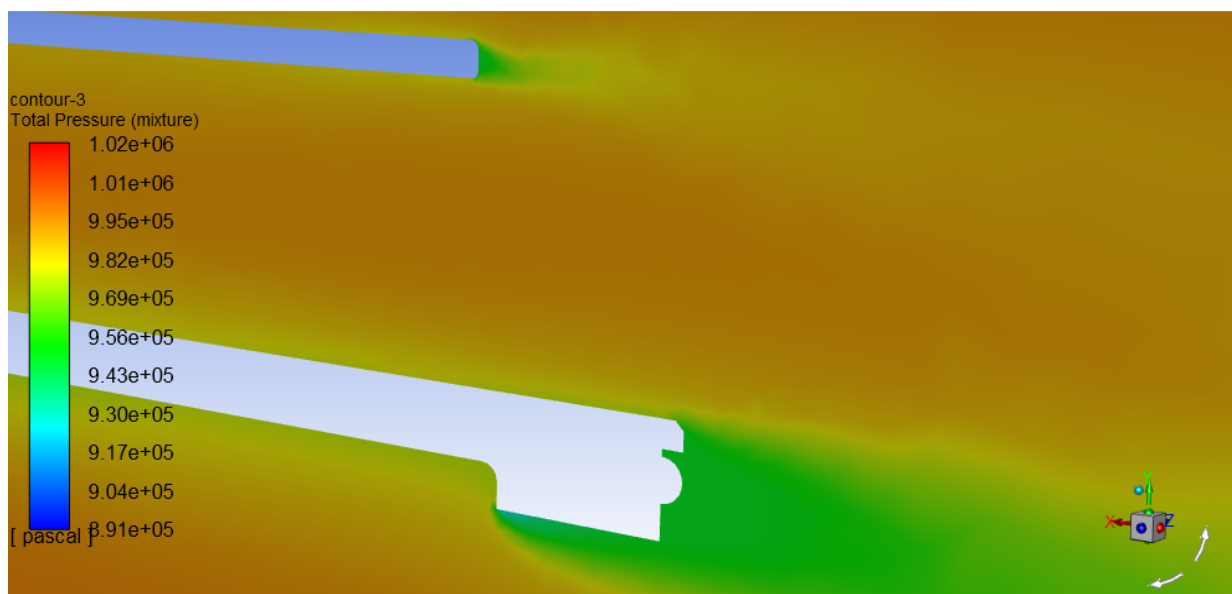
Cal destacar que la pressió mínima se situa als **$8,91 \cdot 10^5$ Pa**.



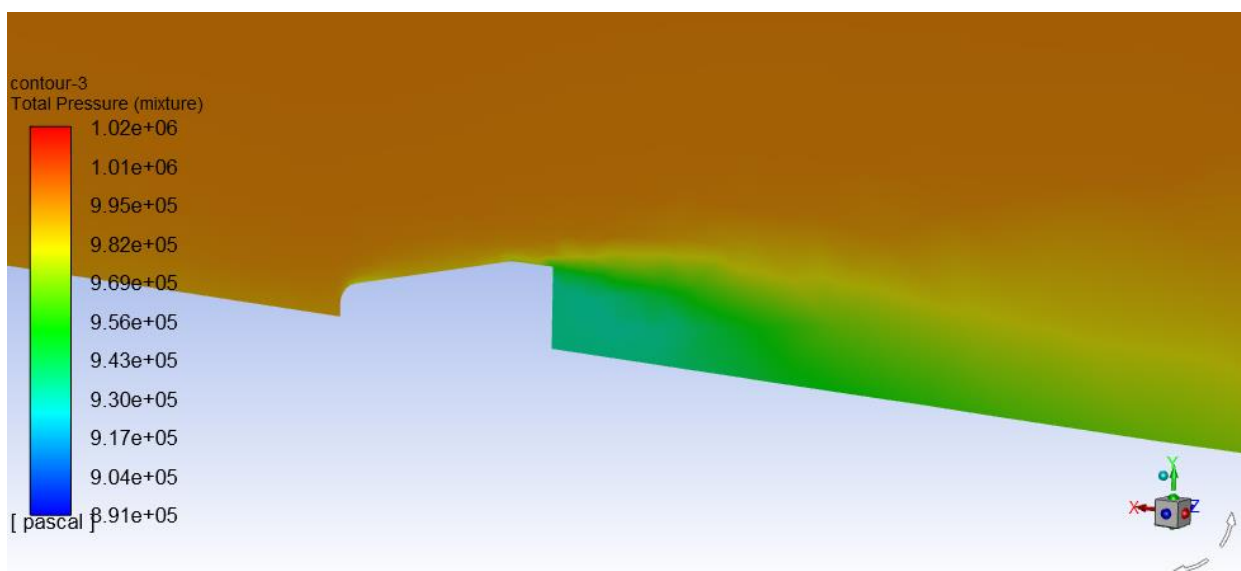
Il·lustració 36. Gràfic 2 cavitació. Font pròpia.



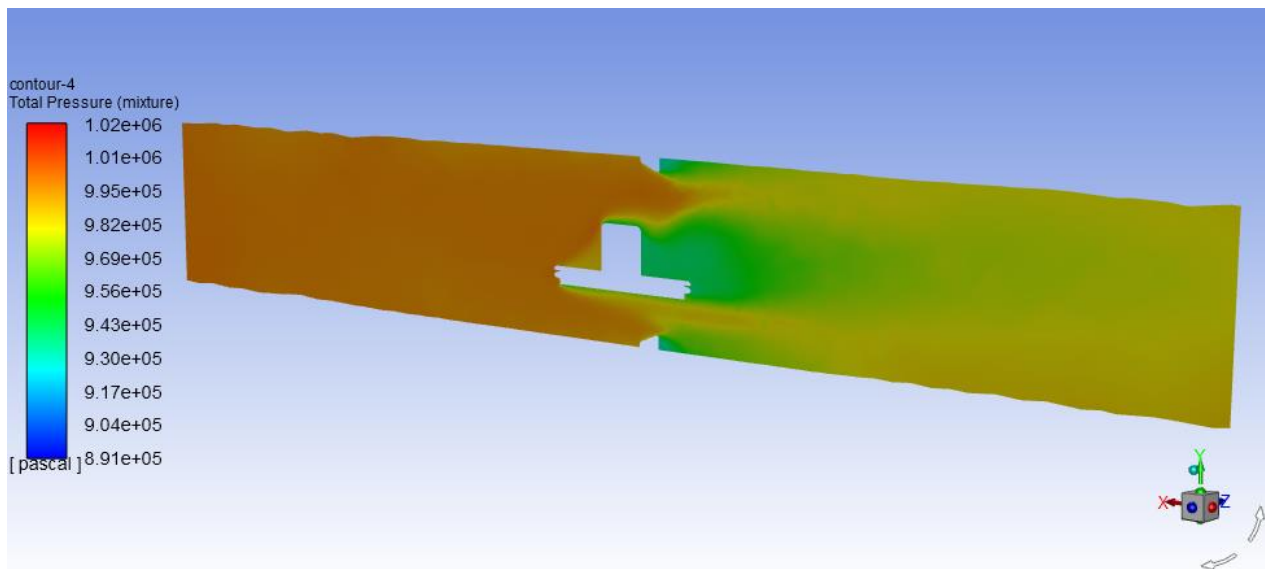
Il·lustració 37. Detall gràfic 2 cavitació. Font pròpia.



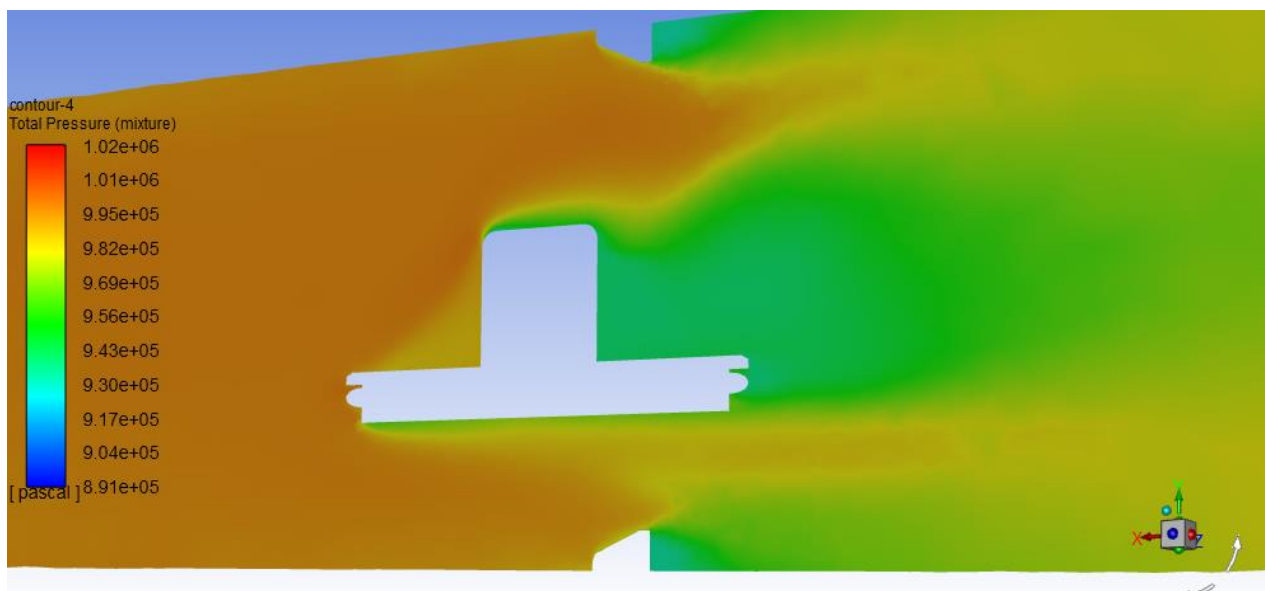
Il·lustració 38. Detall 2 gràfic 2 cavitació. Font pròpia.



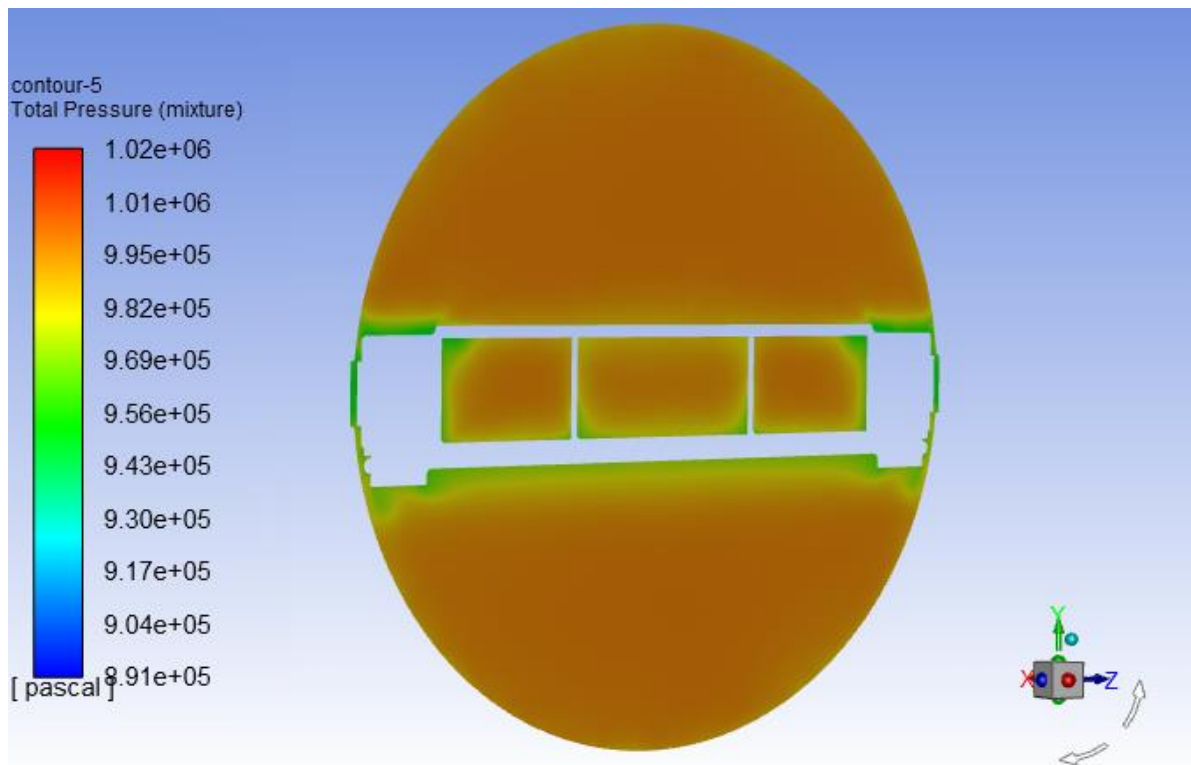
Il·lustració 39. Detall seient gràfic 2 cavitació. Font pròpia.



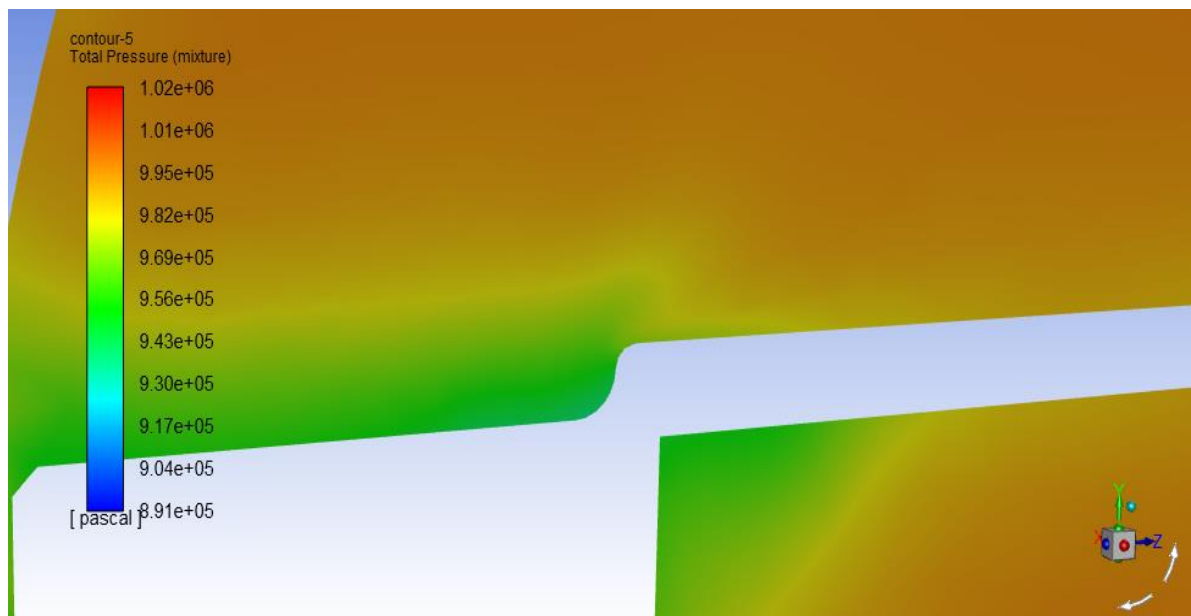
Il·lustració 41. Gràfic 3 cavitació. Font pròpia.



Il·lustració 40. Detall gràfic 3 cavitació. Font pròpia.



Il·lustració 42. Gràfic 4 cavitació. Font pròpia.



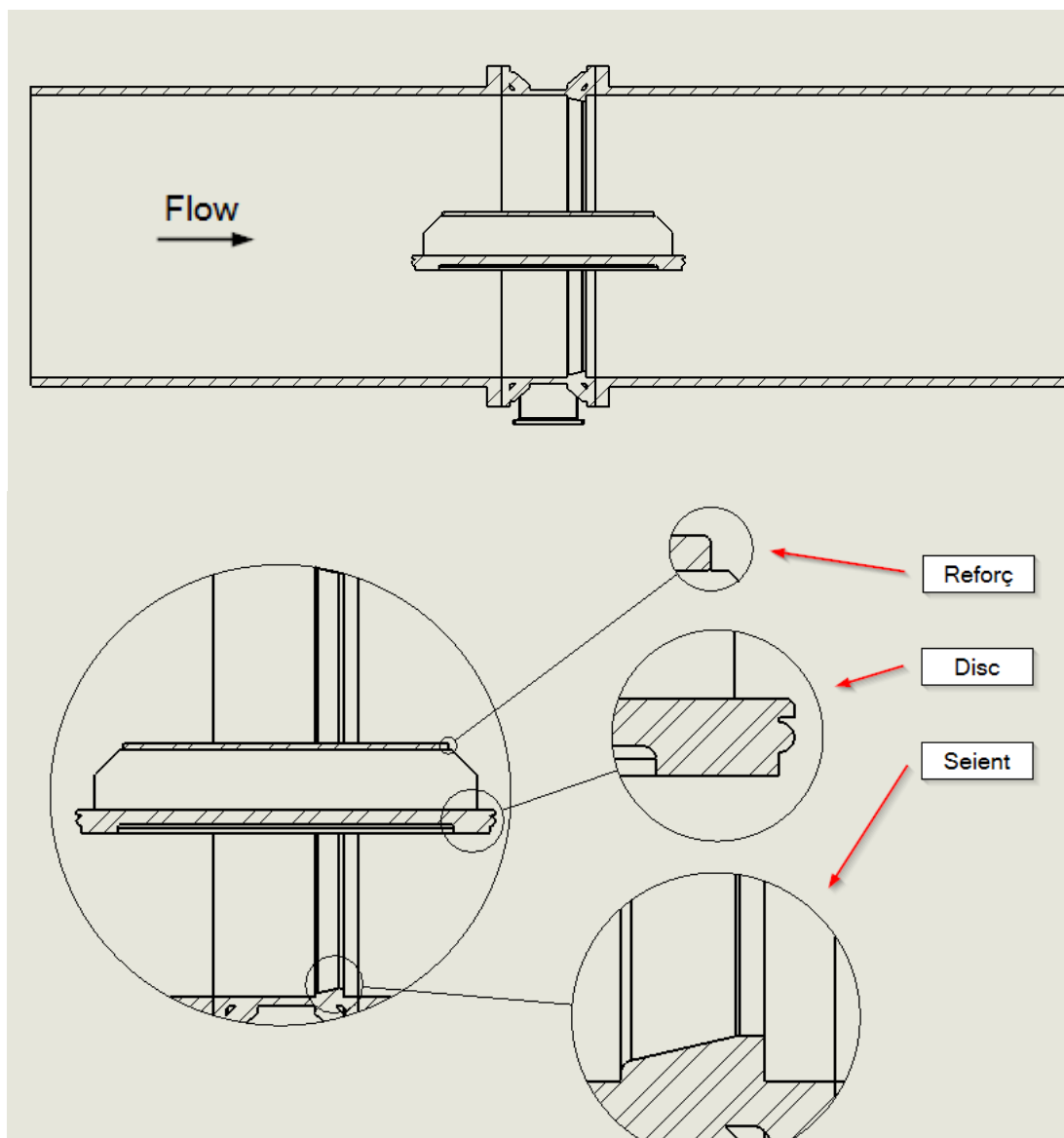
Il·lustració 43. Detall gràfic 4 cavitació. Font pròpia

Com es pot observar, el fenomen de la cavitació no es produeix, ja que la pressió no baixa fins al nombre de la pressió de vaporització assignada. Tot i això, cal millorar la geometria per tal que els punts més crítics millorin i, en cas que operés una altra pressió o un altre cabal, tampoc es produís la cavitació o, com a mínim, es minimitzés.

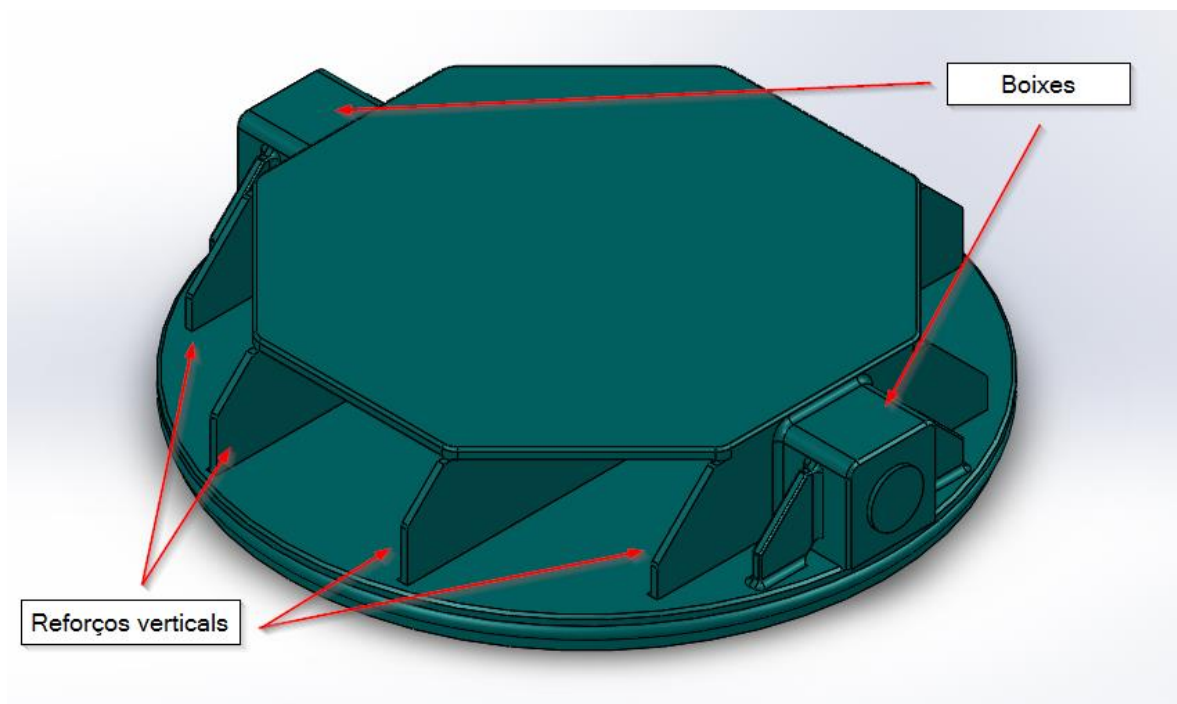
4.5. Millora hidrodinàmica

Un cop s'ha obtingut i analitzat els resultats de la simulació, el següent pas consisteix a millorar la geometria per tal que la vàlvula sigui més hidrodinàmica, amb la qual cosa es redueixi la pèrdua de càrrega ocorreguda i es minimitzi encara més el risc que es produeixi el fenomen de la cavitació per les nefastes conseqüències que això comportaria.

Partint de la geometria que s'ha simulat, cal observar els punts crítics:



Il·lustració 44. Localització punts crítics secció. Font pròpia.

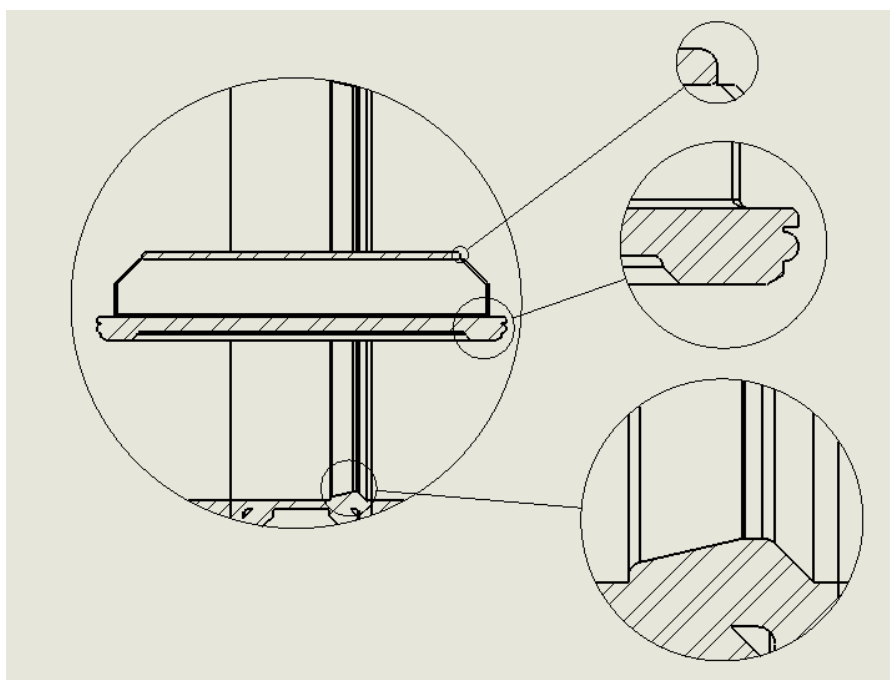


Il·lustració 45. Localització punts crítics. Font pròpia

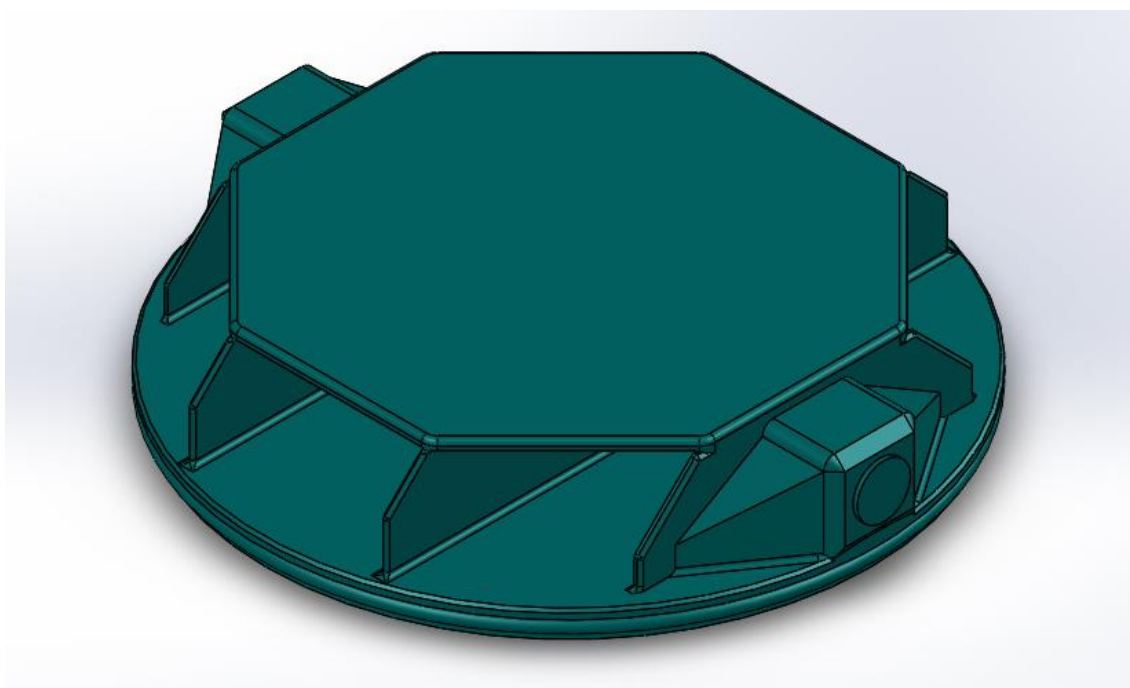
Un cop identificats els punts més crítics, es realitzen els canvis pertinents a cada punt, tot comentant com es podria dur a terme l'aplicació pràctica dels canvis esmentats:

- **Reforç:** S'ha accentuat lleugerament l'arrodoniment. El canvi es podria dur a terme amb el mateix procés amb el qual s'ha fet l'arrodoniment original.
- **Disc:** A la part inferior s'ha fet un xamfrà tant a la part interior com a l'exterior. El canvi es podria dur a terme amb un mecanitzat dels dos xamfrans.
- **Seient:** Aquest és l'únic punt que s'ha millorat del cos de la vàlvula. La millora ha consistit a afegir material al final del seient a 45° (tenint el sentit del flux com a referència) i en suavitzar els canvis de secció ja existents a partir d'arrodoniments. L'aportació de material es podria fer amb soldadura i la suavització amb un mecanitzat.
- **Boixes:** Aquests cossos són els que pateixen el canvi més brusc. S'ha realitzat diferents xamfrans i arrodoniments i, a més, s'ha afegit un cos geomètric a cada banda semblant a un prisma triangular. Per als xamfrans i arrodoniments n'hi hauria prou amb un mecanitzat i, referent als cossos afegits, es podrien soldar dues primes rectangulars que podrien conformar-se amb oxitall mateix per la poca exigència quant a toleràncies.
- **Reforços verticals:** S'ha fet arrodoniment a les cantonades i s'ha suavitzat els canvis de seccions. Es podria dur a terme amb mecanització i soldadura.

El resultat fa que la vàlvula a simple vista es vegi considerablement més hidrodinàmica amb canvis que aparentment són simples des del punt de vista de conformat.



Il·lustració 46. MA secció. Font pròpia.



Il·lustració 47. MA. Font pròpia.

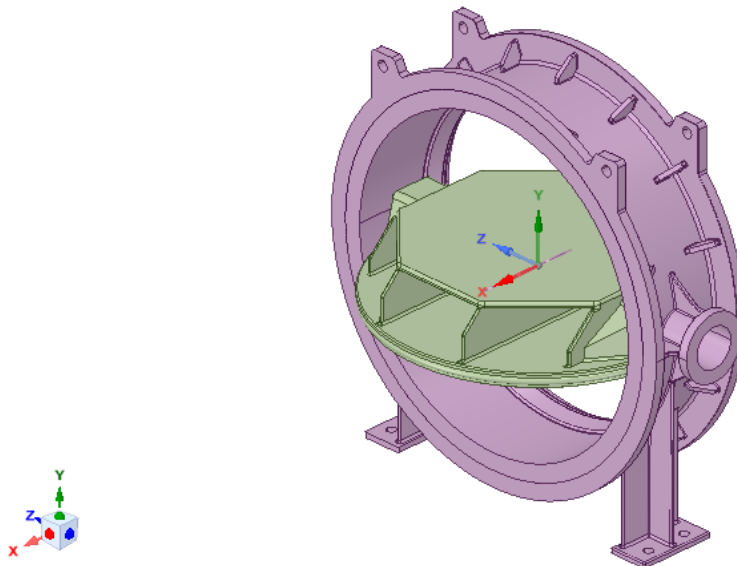
4.6. Model numèric amb la millora

Un cop la geometria ha estat millorada amb una teòrica millora hidrodinàmica, s'ha passat el següent pas. Per tal de comprovar que realment la millora influeix en els resultats i valorar en quin grau ho fa, s'ha seguit els passos del modelat numèric sense la millora.

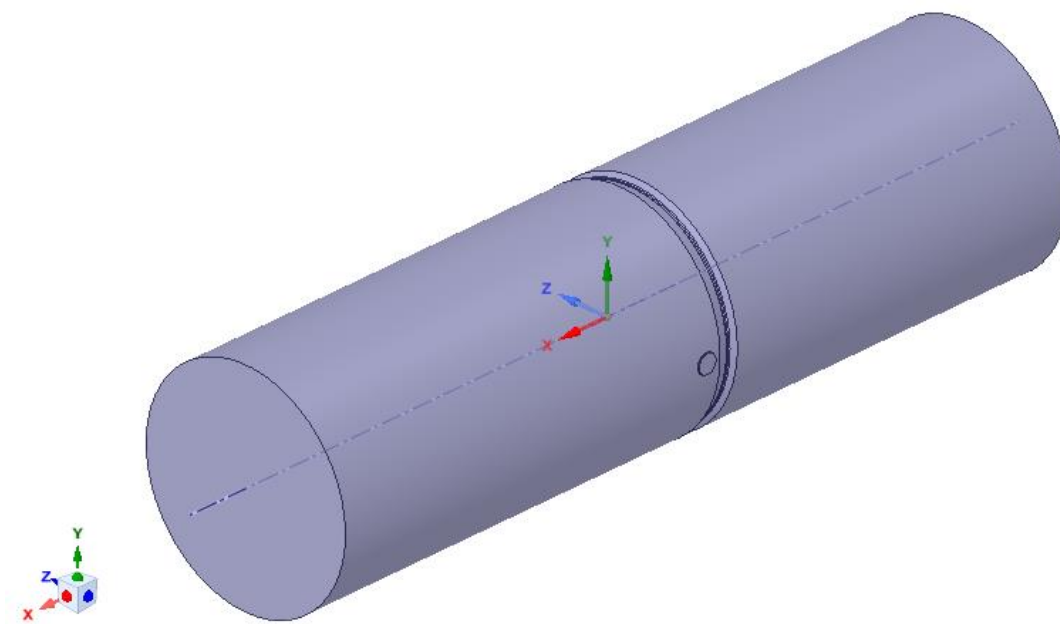
En aquest apartat, es destacarà les parts que han variat respecte al modelat anterior i, s'observarà els resultats amb la millora.

4.6.1. Geometria

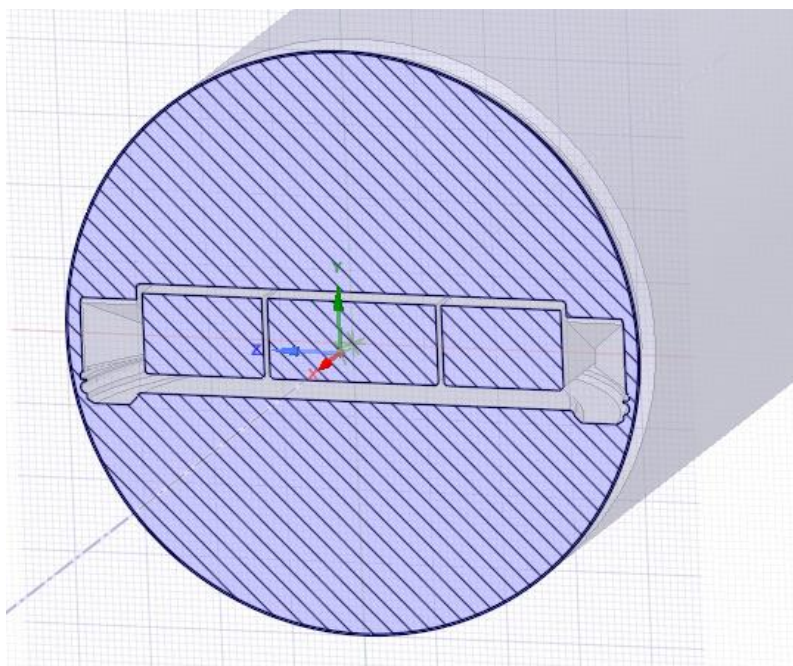
A l'hora de definir la geometria, s'ha seguit absolutament els mateixos passos que el modelat anterior amb el simple canvi de les millores que ja s'ha vist on i perquè s'han aplicat.



Il·lustració 48. Geometria MA. Font pròpia.



Il·lustració 49. Volum extret MA. Font pròpia.



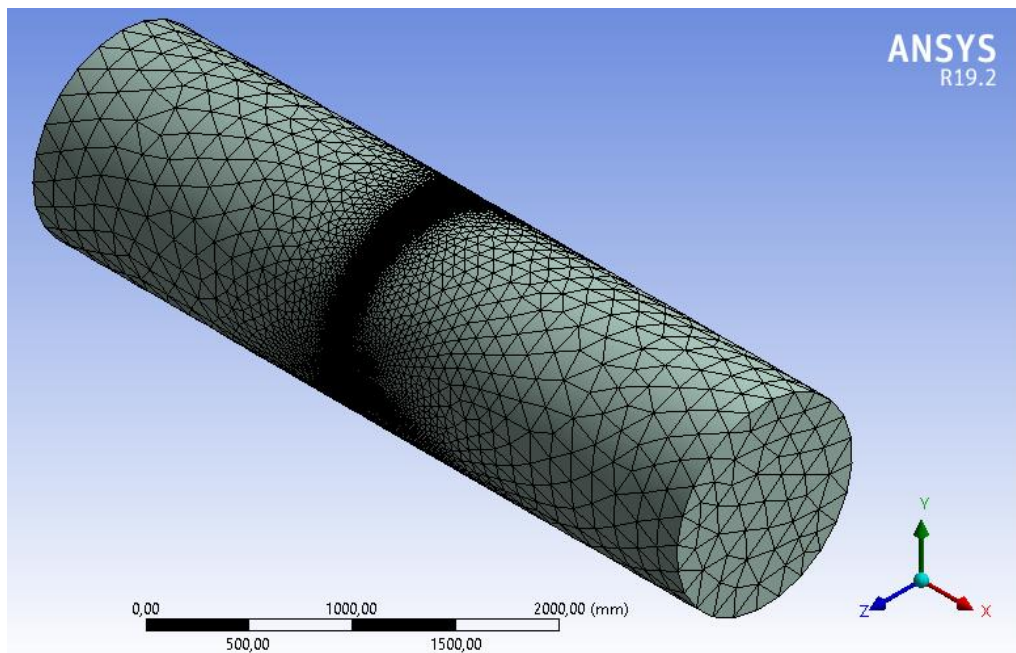
Il·lustració 50. Secció geometria MA. Font pròpia

4.6.2. Mallat

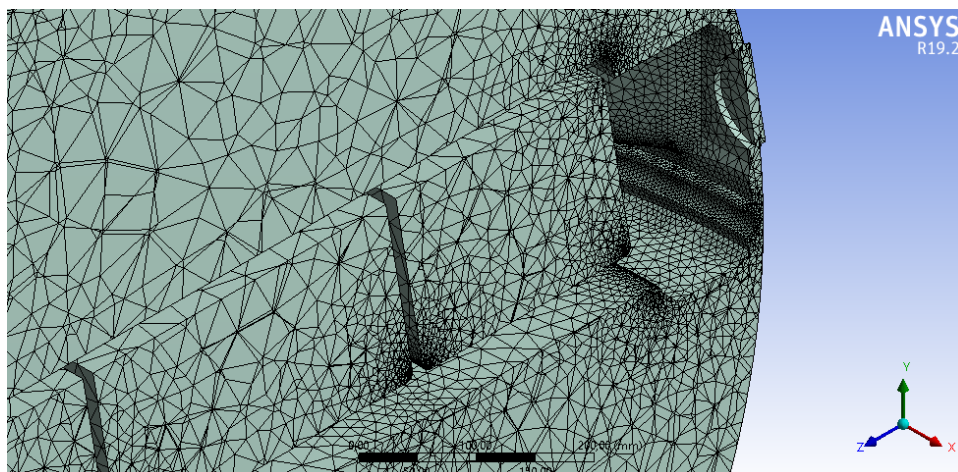
El mallat, igual que la geometria, s'ha efectuat de la mateixa manera que en el cas anterior, amb els mateixos entrebancs i solucions. La variació ha estat dels nodes i elements que s'obtenen, com es pot observar a la següent taula.

Nodes	710105
Elements	3772668

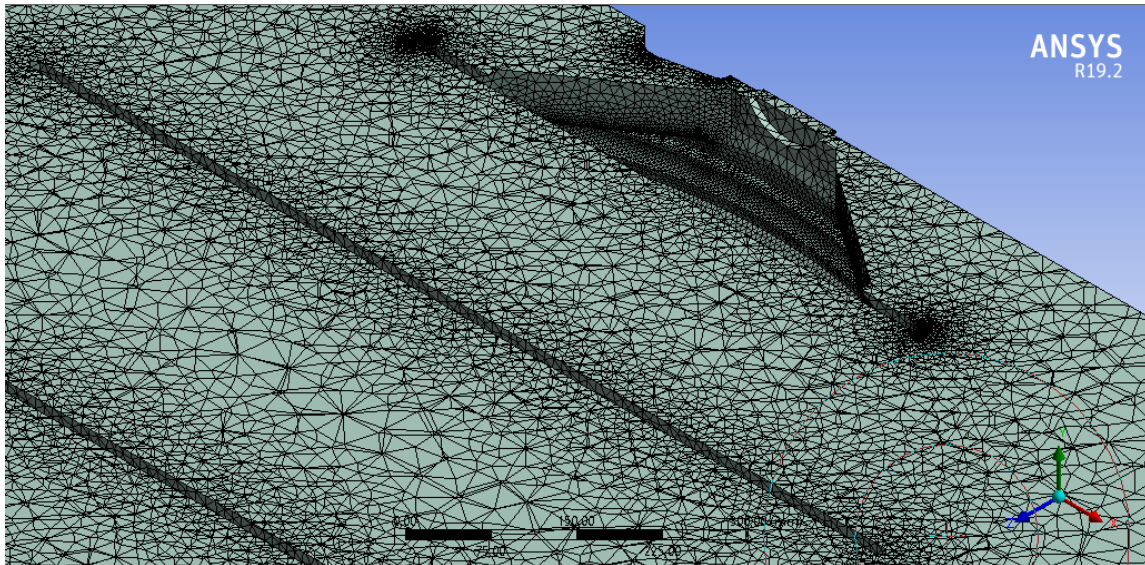
Taula 6. Característiques del mallat MA. Font pròpia.



Il·lustració 51. Mallat MA. Font pròpia.



Il·lustració 52. Secció mallat Ma. Font pròpia.



Il·lustració 53. Secció 2 mallat MA. Font propia.

Respecte a les superfícies, s'ha definit les mateixes que al cas anterior, sense cap variació.

4.6.3. Preparació de la simulació

La preparació de la simulació s'ha fet exactament amb els mateixos paràmetres, models, mètodes, condicions de contorn, material, paràmetres d'inicialització, velocitats i tots els altres paràmetres i variables que s'han establert al modelat anterior. No obstant això, a l'haver canviat les pressions obtingudes d'acord amb la velocitat, han variat les variables de pressió de la simulació del model de cavitació.

Aquestes han estat les pressions obtingudes, tenint en compte que la vàlvula opera a 10bar, en base a la velocitat de 8m/s a partir de les mateixes formules, càlculs i extrapolacions que s'ha utilitzat per al model anterior. Són les pressions utilitzades pel model de cavitació, per tal de reflectir la velocitat de 8m/s.

P_i (Pa)	P_f (Pa)	P_i està. (Pa)	P_f està. (Pa)
1000000	994550	968193	962478

Taula 7. Pressions extrapolades a 10bar MA. Font propia.

4.6.4. Resultats del model de pèrdua de càrrega

Un cop completada la simulació de la pèrdua de càrrega, s'observa els resultats obtinguts pel que fa a la relació entre la velocitat i la pèrdua de càrrega, a més de les pressions estàtiques i dinàmiques de la velocitat operativa.

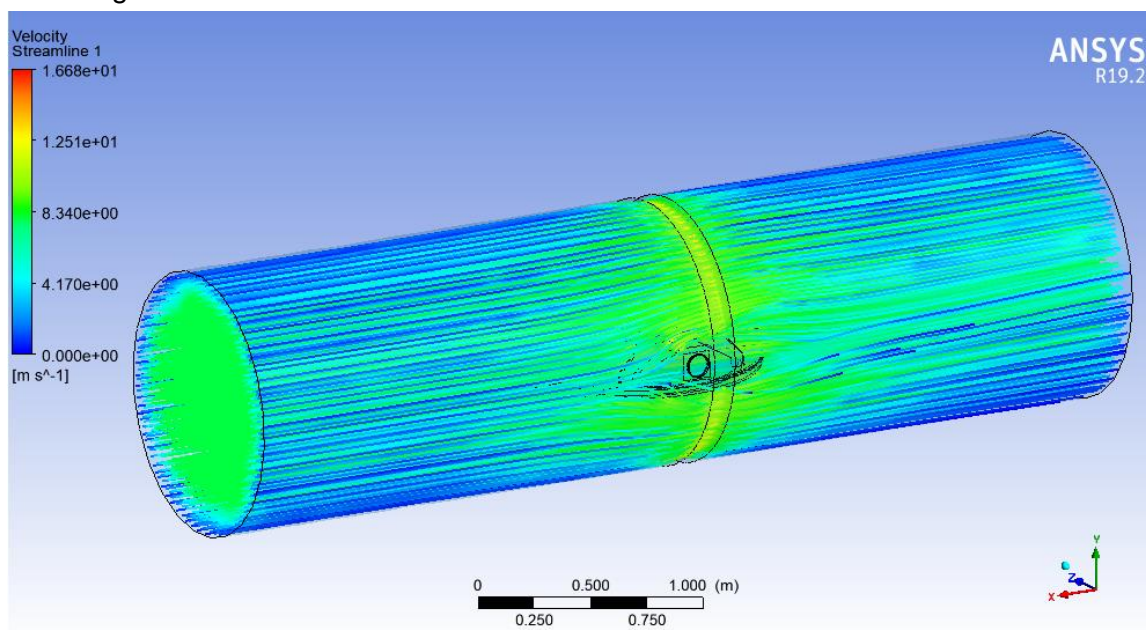
Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
8	41498	36048	5450

Taula 8. Pèrdua de càrrega MA. Font pròpia.

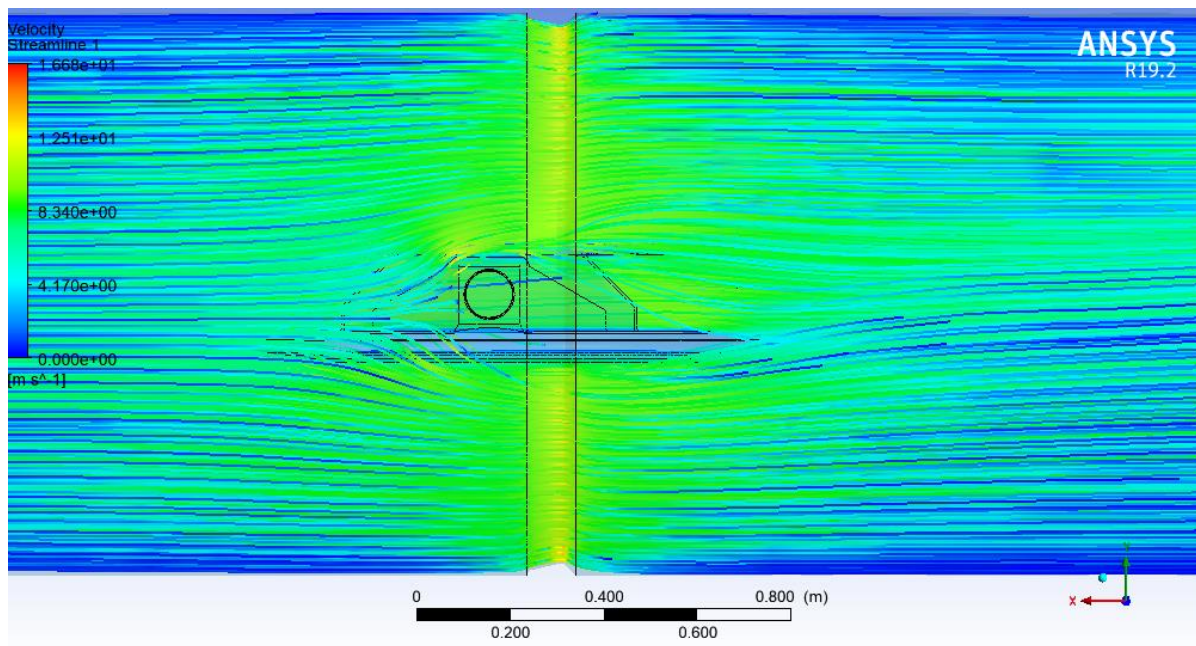
Pi està. (Pa)	Pf està. (Pa)	Pi dinà. (Pa)	Pf dinà. (Pa)
9691	3976	31807	32073

Taula 9. Pressions estàtiques i dinàmiques MA. Font pròpia.

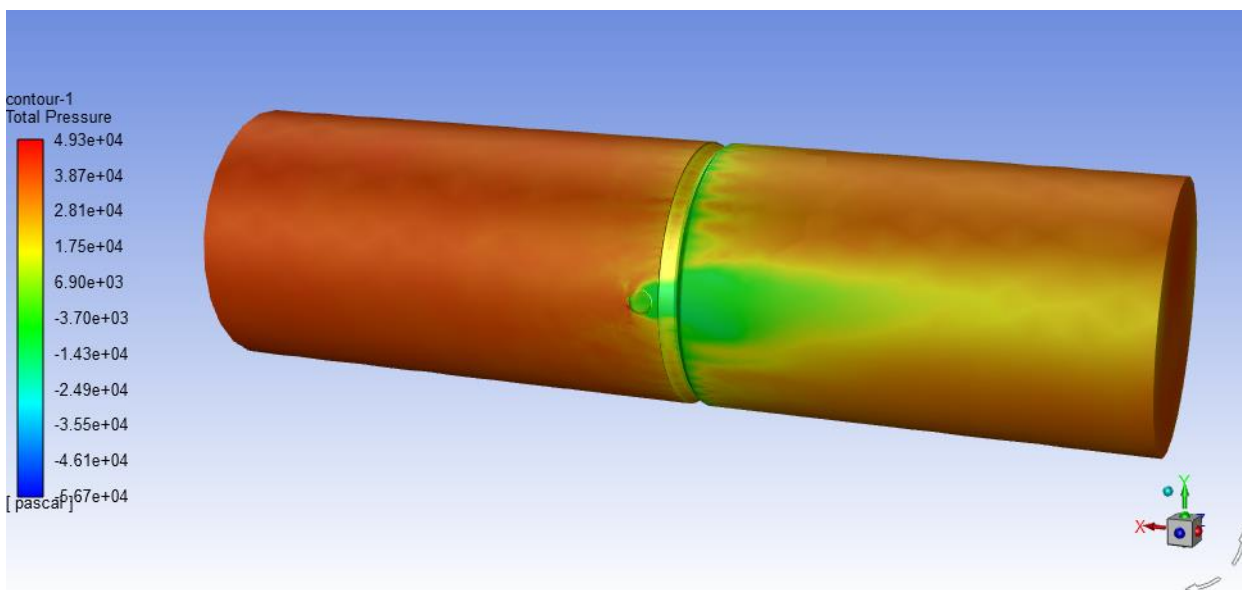
Com a fet destacable i contrari al model anterior, s'observa que en aquest cas la pressió dinàmica final és lleugerament més elevada que la inicial, fet que suposa que la velocitat és més gran al final.



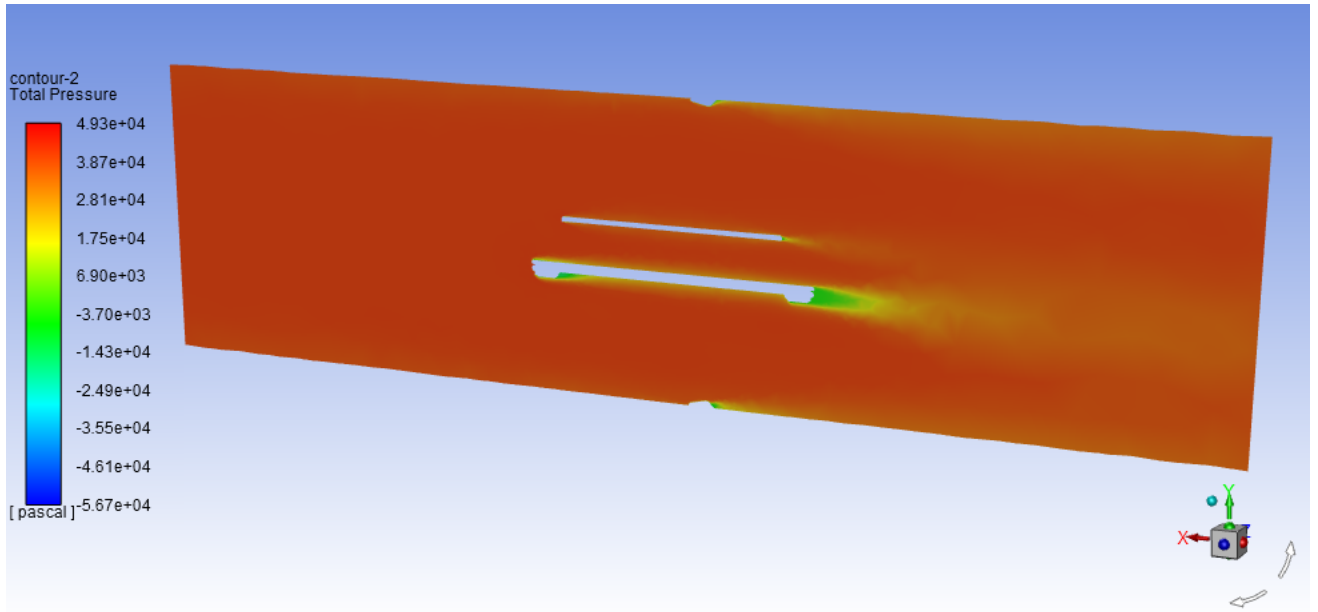
Il·lustració 54. Trajectoria velocitats MA. Font pròpia.



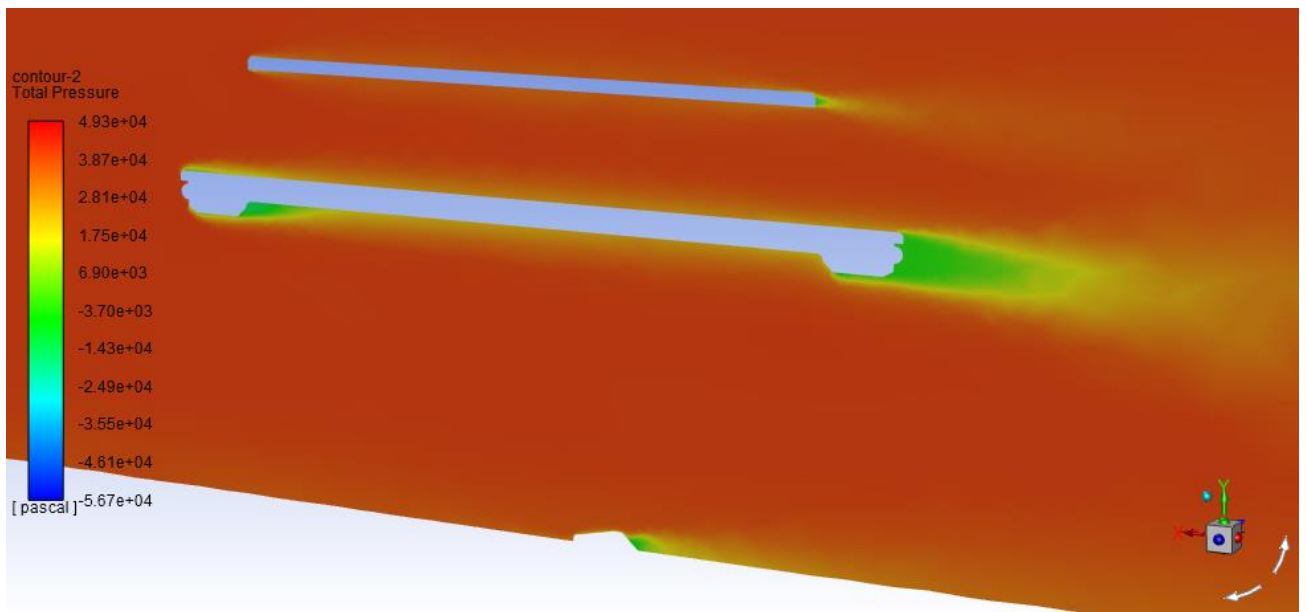
Il·lustració 56. Detall trajectòria velocitats MA. Font pròpia.



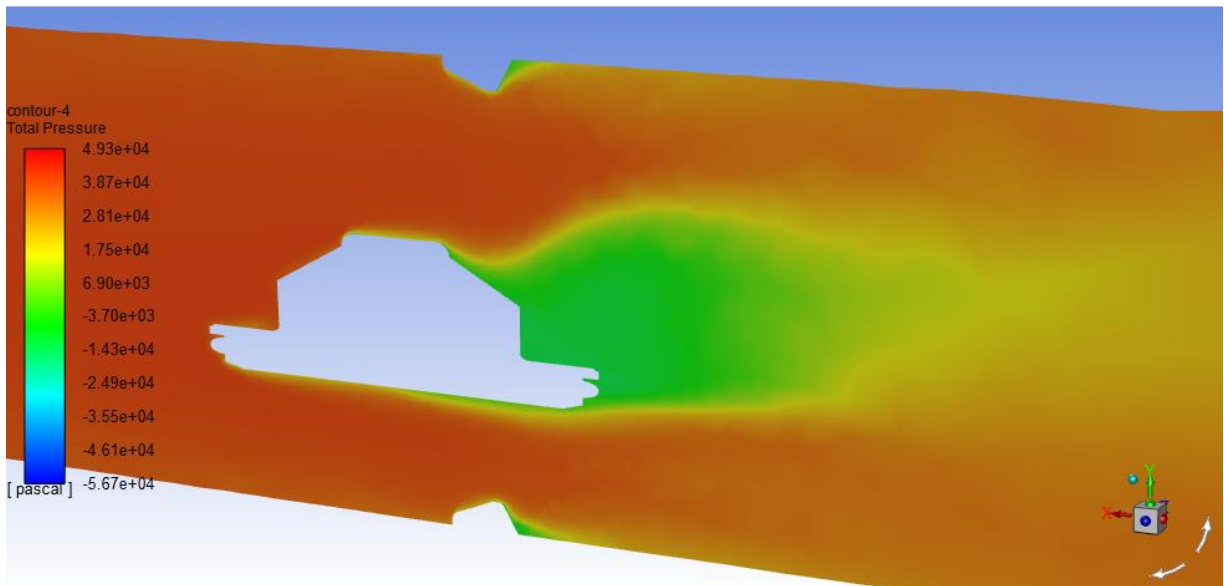
Il·lustració 55. Gràfic pressió MA. Font pròpia.



Il·lustració 57. Gràfic 2 pressió MA. Font pròpia.



Il·lustració 58. Detall gràfic 2 pressió MA. Font pròpia.



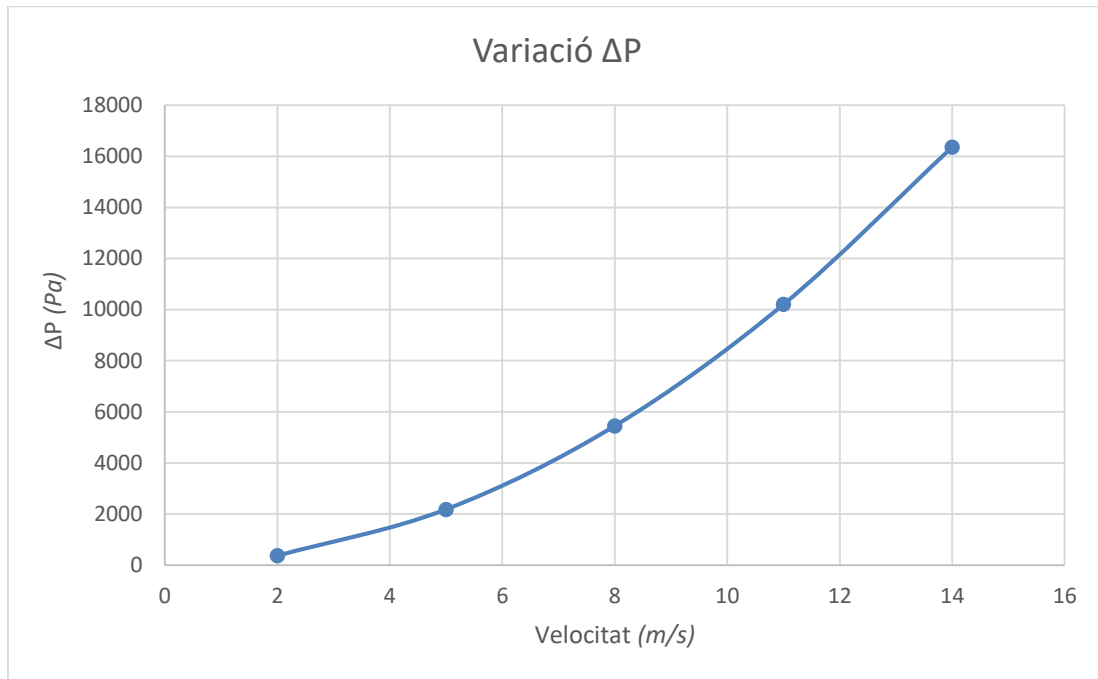
Il·lustració 59. Gràfic 3 pressió MA. Font pròpia.

Un cop analitzada la pèrdua de càrrega, s'ha fet la simulació amb la resta de velocitats comentades, per tal d'observar la variació de la pèrdua de càrrega en relació amb la velocitat.

Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
2	2639	2272	368
5	16320	14137	2183
8	41498	36048	5450
11	78630	68426	10204
14	127254	110891	16363

Taula 10. Pèrdua de càrrega segons diferents velocitats MA. Font pròpia.

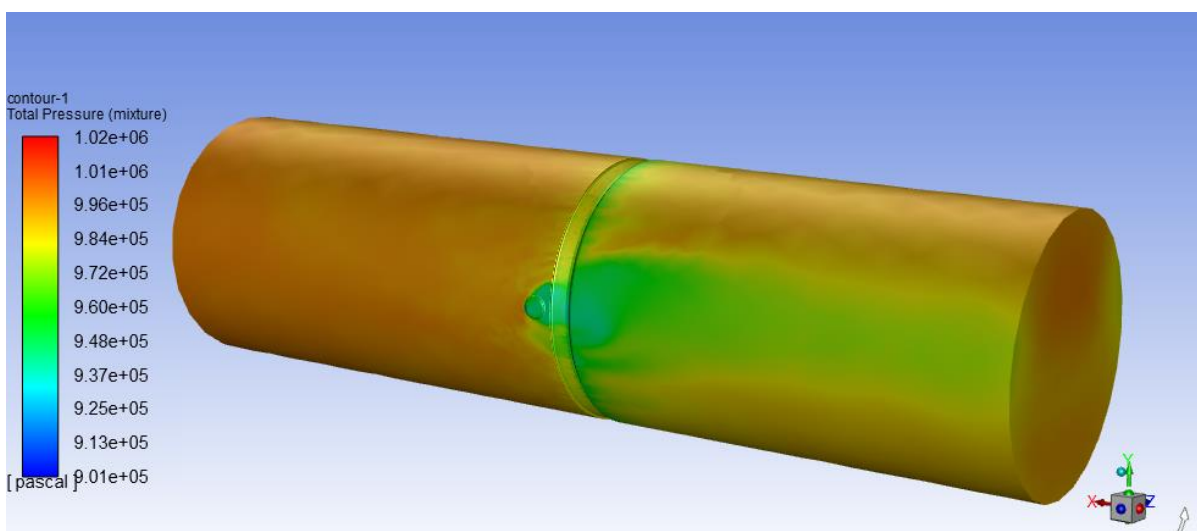
Observant el gràfic, s'aprecia clarament que la tendència és exponencial tal com passava amb l'anterior model.



Gràfic 2. Pèrdua de càrrega MA. Font pròpia.

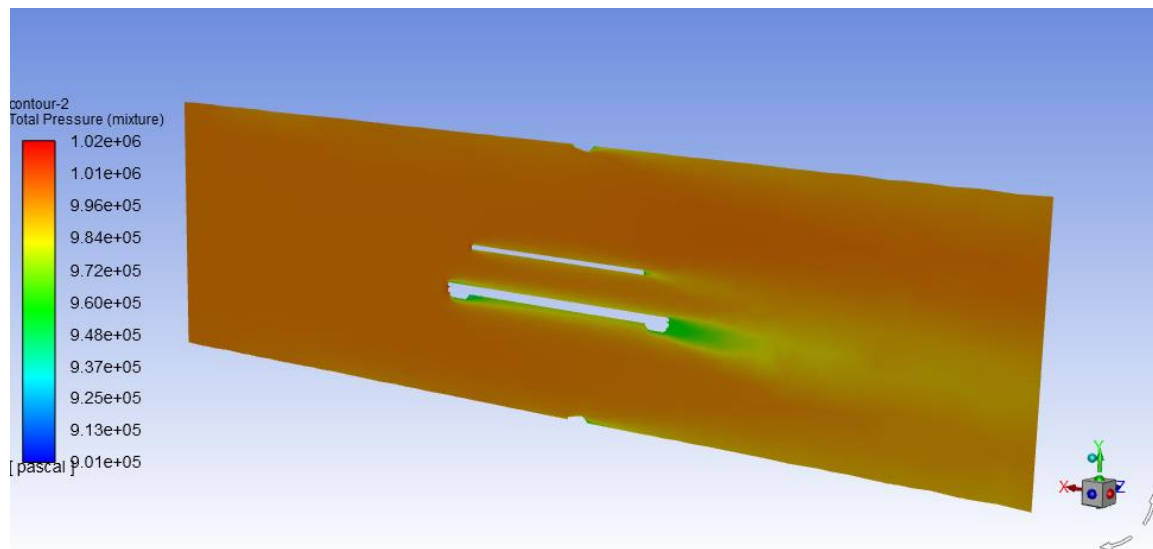
4.6.5. Resultats del model de cavitació

Amb la simulació de la cavitació finalitzada, s'observa el comportament del fluid amb les variacions de pressió produïdes a conseqüència de la geometria. En aquest model, així com en l'anterior, no s'arriba a la pressió de vaporització i, per tant, la cavitació no es produeix. Tot i això, és important parar atenció als punts on la pressió és més baixa, ja que aquests seran els punts amb més risc de patir el fenomen de la cavitació en l'hipotètic cas que la vàlvula treballés a una pressió diferent.

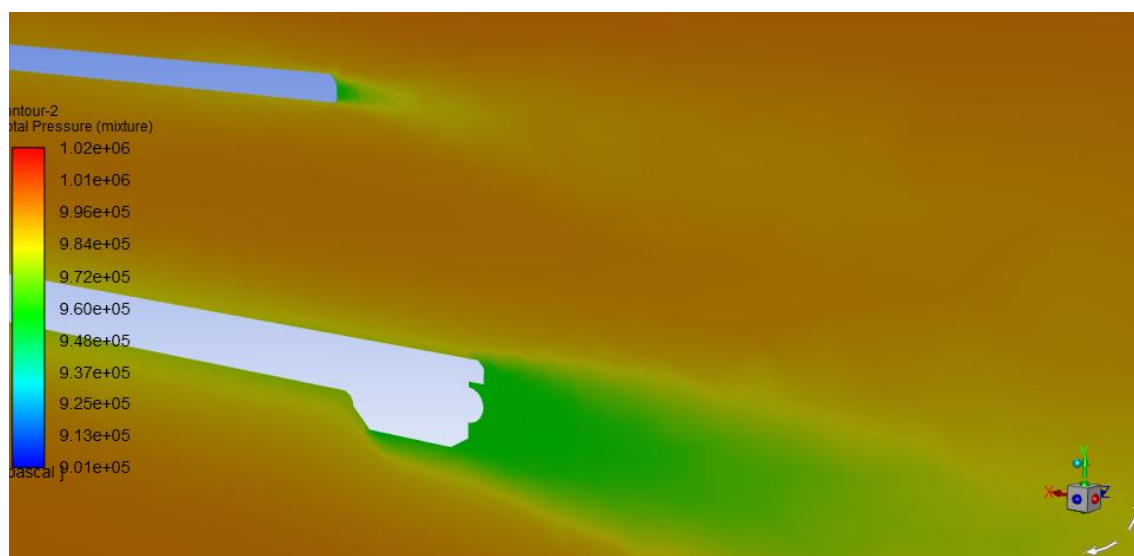


Il·lustració 60. Gràfic 1 cavitació MA. Font pròpia.

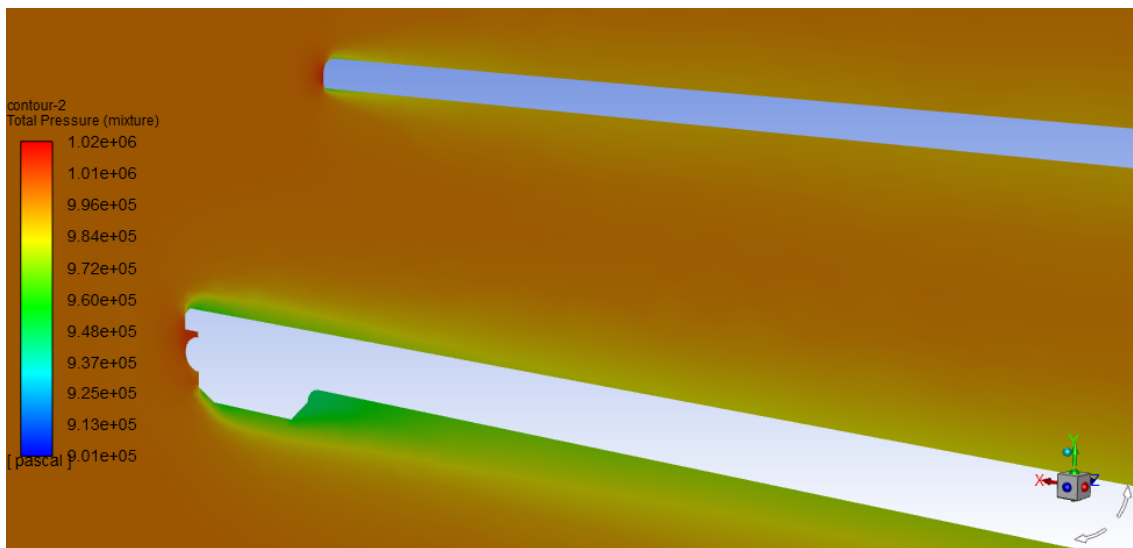
S'observa que la pressió mínima és lleugerament menys baixa situant-se als $9.01 \cdot 10^5 \text{Pa}$.



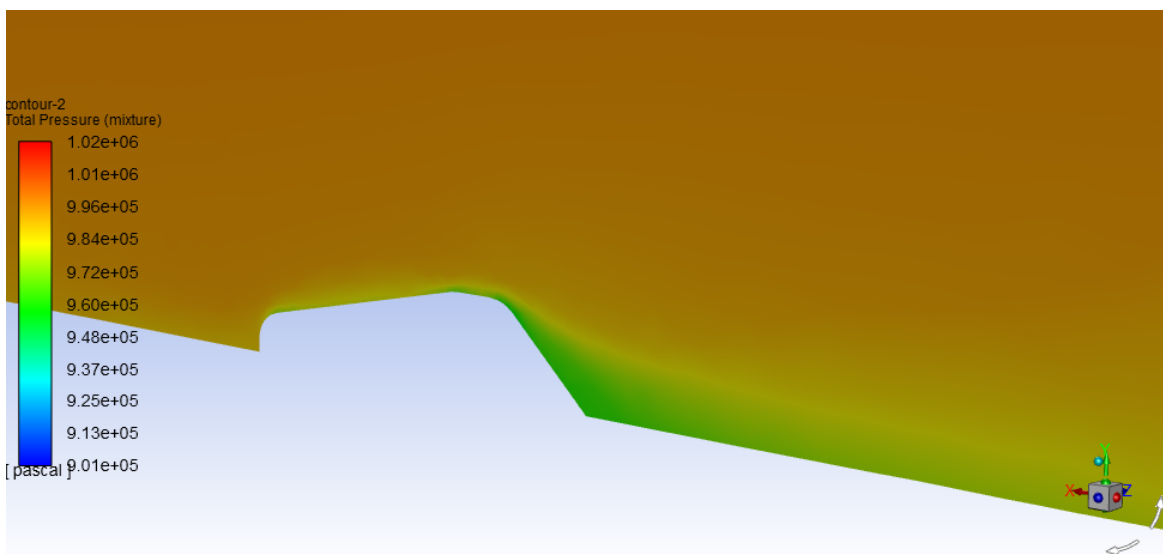
Il·lustració 61. Gràfic 2 cavitació MA. Font pròpia.



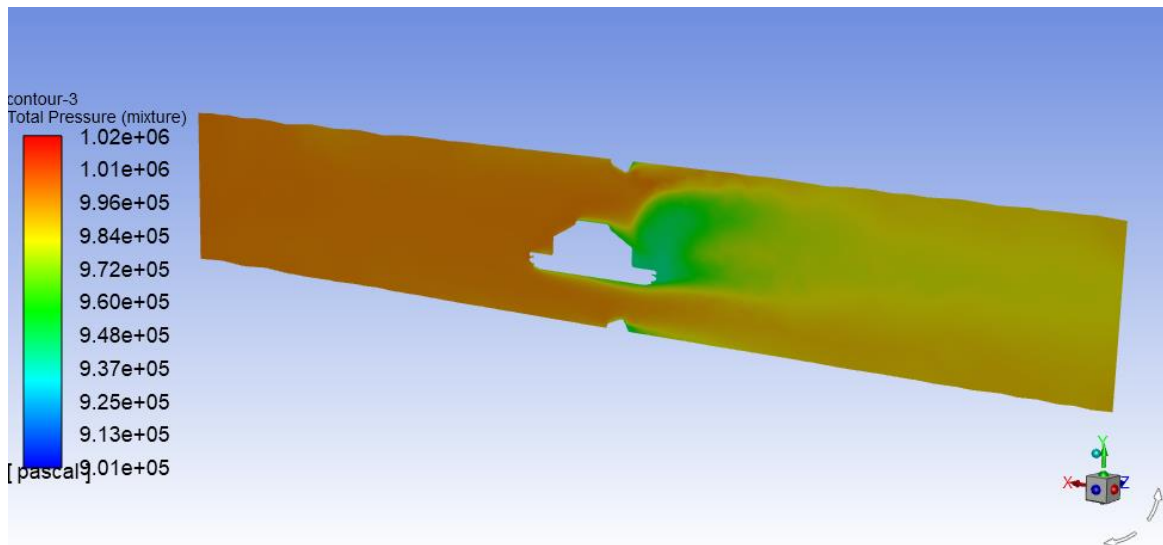
Il·lustració 62. Detall gràfic 2 cavitació MA. Font pròpia.



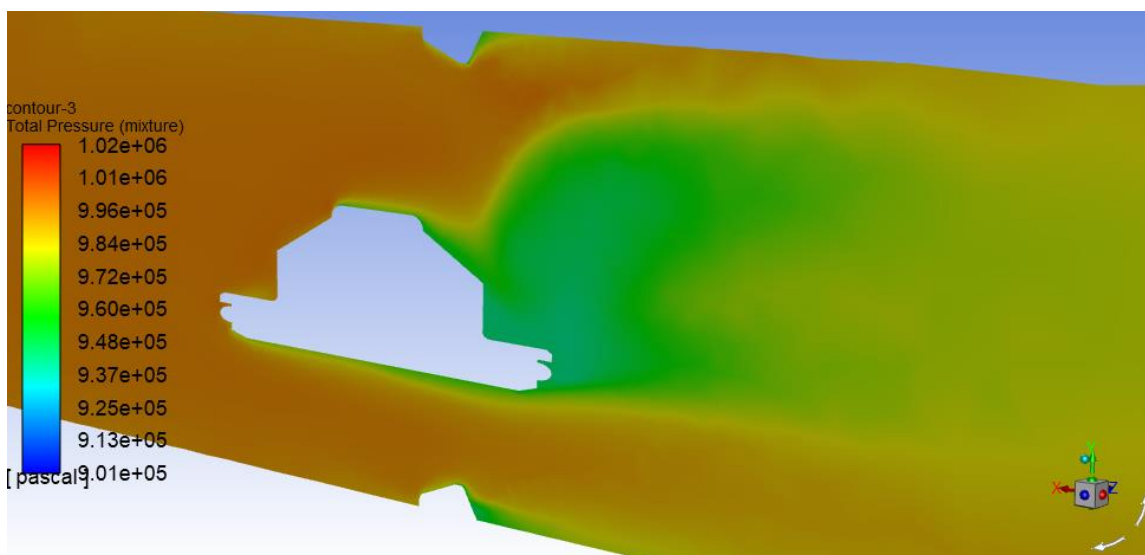
Il·lustració 63. Detall 2 gràfic 2 cavitació MA. Font pròpia.



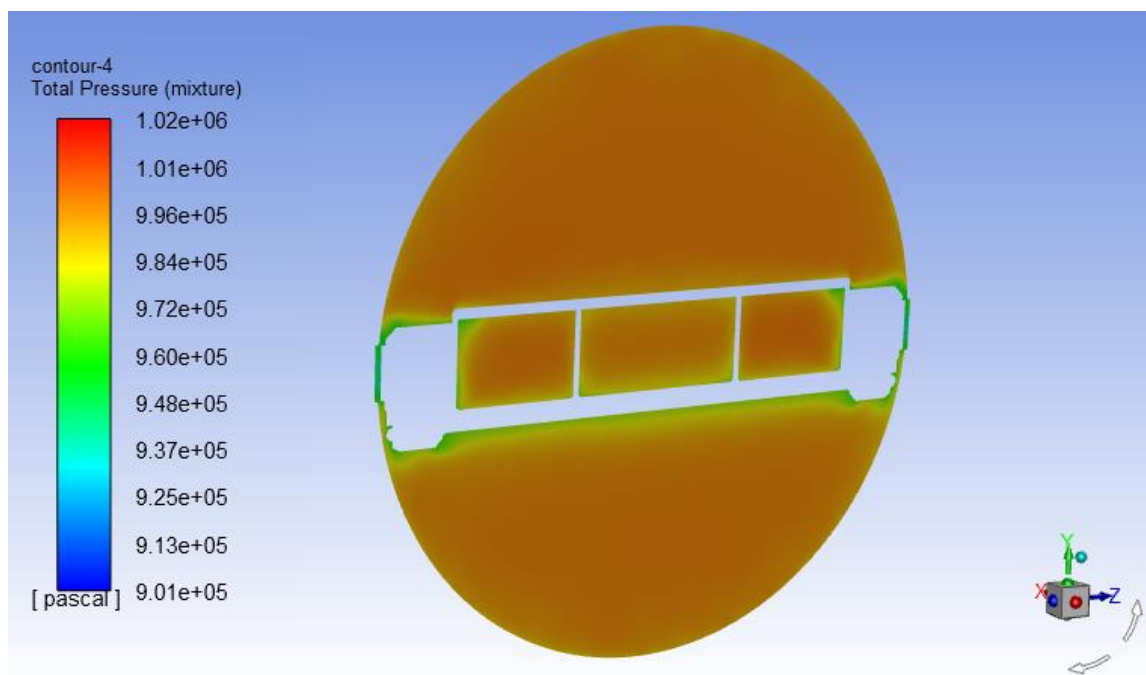
Il·lustració 64. Detall seient gràfic 2 cavitació MA. Font pròpia.



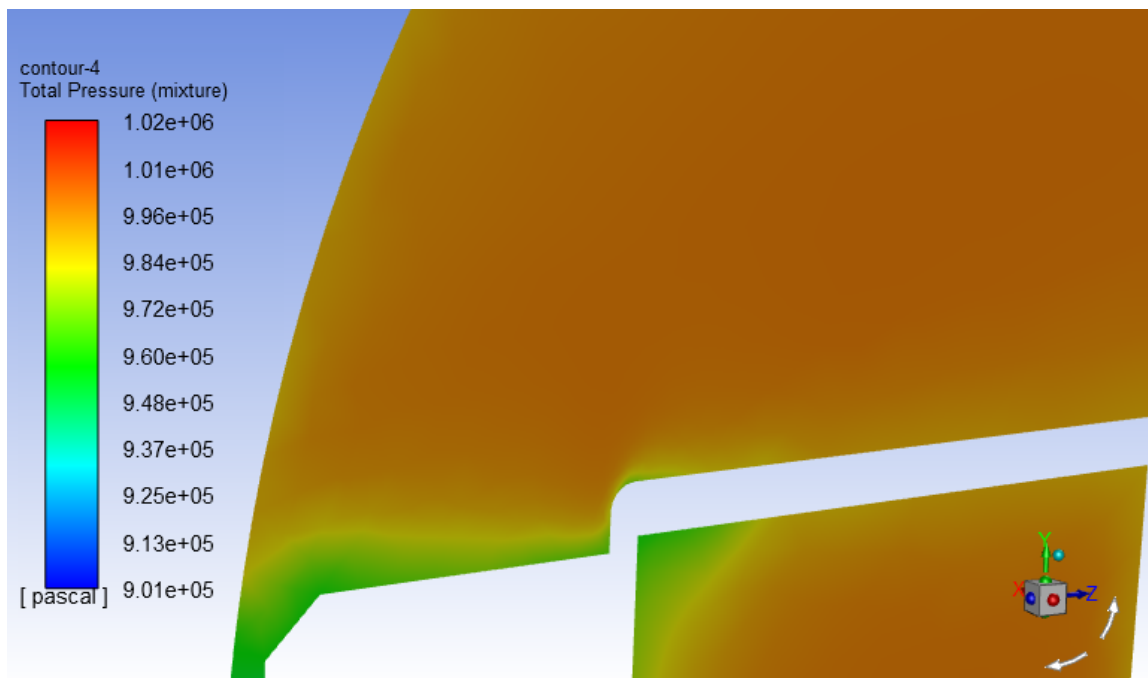
Il·lustració 65. Gràfic 3 cavitació MA. Font pròpia.



Il·lustració 66. Detall gràfic 3 cavitació MA. Font pròpia.



Il·lustració 67. Gràfic 4 cavitació MA. Font pròpia.



Il·lustració 68. Detall gràfic 4 cavitació. Font pròpia.

5. Anàlisi dels resultats

Es conclou que la millora aplicada a la geometria ha produït els resultats esperats, gràcies a la disminució de la pèrdua de càrrega i l'augmentat del valor mínim de pressió, que assoleix el sistema amb el model de cavitació.

Per al model de la pèrdua de càrrega, cal destacar que, a part de la important millora que s'ha vist reflectida quant a la pèrdua de càrrega, aconseguint uns resultats importantment més eficients, la millora ha suposat importants canvis com són el fet que la pressió dinàmica de sortida sigui més alta que la d'entrada per al segon modelat; fet que comporta una major velocitat al final del sistema en contraposició amb el primer model.

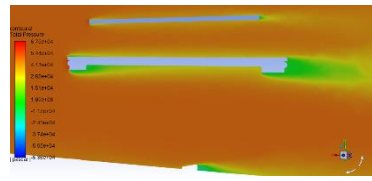
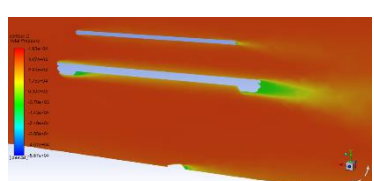
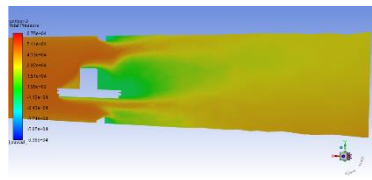
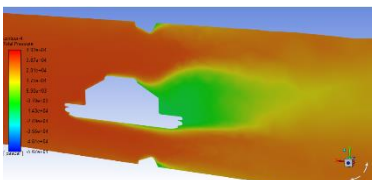
Model	Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
Original	8	49651	40353	9298
Millorat	8	41498	36048	5450

Taula 11. Comparativa pèrdua de càrrega. Font pròpia.

Model	Pi està. (Pa)	Pf està. (Pa)	Pi dinà. (Pa)	Pf dinà. (Pa)
Original	17978	8946	31673	31407
Millorat	9691	3976	31807	32073

Taula 12. Comparativa pressions estàtiques i dinàmiques. Font pròpia.

Com es pot observar en la següent taula resum, la millora produeix una significant optimització en la hidrodinàmica del sistema reduint les turbulències, fet que genera una major homogeneïtzació de l'estela del flux.

Model	Original	Millorat
Comportament del flux al reforç, disc i seient		
Comportament del flux a les boixes		

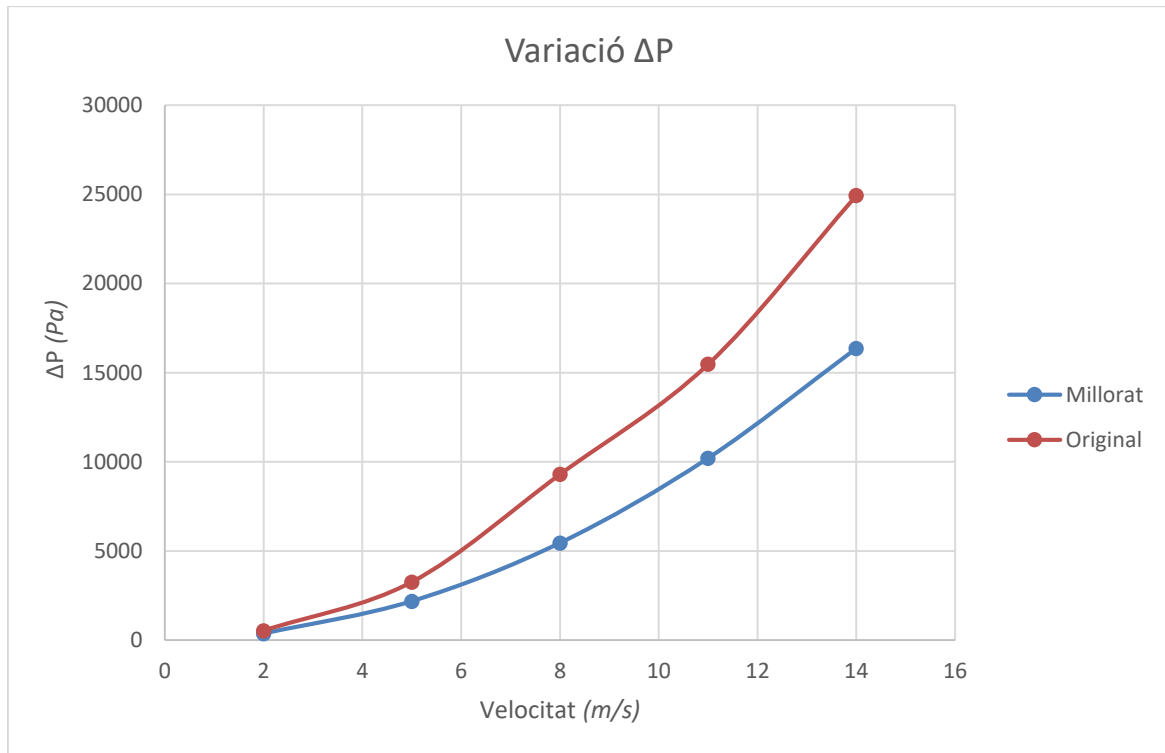
Taula 13. Comportament del flux. Font pròpia.

En quant a la variació de pèrdua de càrrega en relació amb les diferents velocitats emprades, s'observa que la millora ha donat uns resultats igual de satisfactoris que amb la velocitat d'operació fent considerablement més eficient la vàlvula, tal com es pot observar a la següent taula.

Model	Velocitat (m/s)	Pi (Pa)	Pf (Pa)	Pèrdua de càrrega (Pa)
Original	2	3021	2487	534
	5	18872	15610	3262
	8	49651	40353	9298
	11	91608	76132	15475
	14	148279	123340	24939
Millorada	2	2639	2272	368
	5	16320	14137	2183
	8	41498	36048	5450
	11	78630	68426	10204
	14	127254	110891	16363

Taula 14. Comparativa pèrdua de càrrega segons diferents velocitats. Font pròpia.

També amb el gràfic s'observa la tendència que seguiria la pèrdua de càrrega amb diferents velocitats. S'observa que la tendència exponencial de la vàlvula millorada és lleugerament més suau

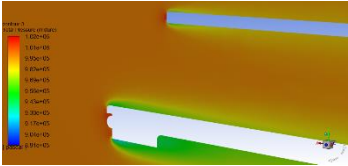
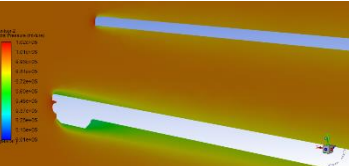
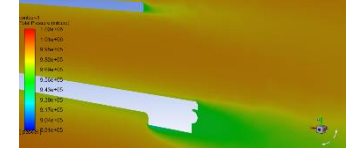
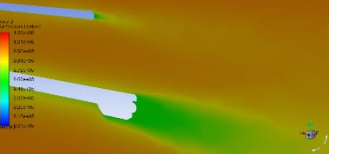
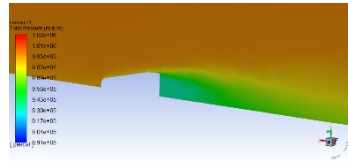
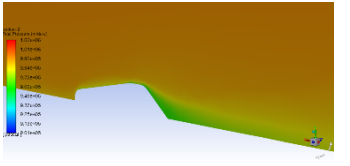
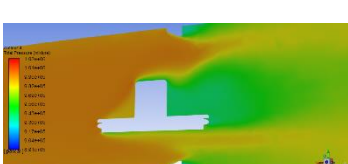
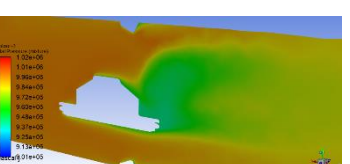
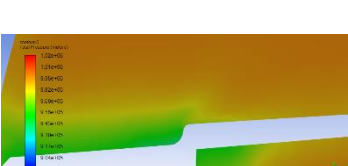
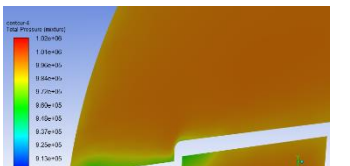


Gràfic 3. Comparativa pèrdua de càrrega. Font pròpia.

Per al model de cavitació i, després d'obtenir uns resultats amb la vàlvula original que, a priori, no donen indicis que sigui un problema, s'ha corroborat l'efecte positiu en aquesta amb la millora emprada.

La cavitació es manifesta quan la pressió descendeix fins a la pressió de vaporització i, tot i que en aquest cas no s'hi arriba, s'ha de considerar que operant a pressions més baixes s'hi podria arribar. Per tant, és important mirar de reduir el descens al qual pot arribar el sistema. Amb la millora aplicada, s'ha aconseguit reduir aquest descens significativament passant de $8,91 \cdot 10^5 \text{Pa}$ a $9,01 \cdot 10^5 \text{Pa}$.

Com es pot observar en la següent taula resum, els canvis també han generat una millora de les turbulències optimitzant una major homogeneïtzació de l'estela del flux i, com a conseqüència, reduint el risc de cavitació.

Model	Original	Millorat
Comportament del flux al reforç i disc al principi del recorregut		
Comportament del flux al reforç i disc al final del recorregut		
Comportament del fluid al seient		
Comportament del fluid a les boixes		
Comportament del fluid al reforç vertical		

Taula 15. Comportament flux cavitació. Font pròpia.

En resum, després de comparar les dues geometries, s'observa que la millora ha comportat una major eficiència de la vàlvula i, a més, un menor risc de la cavitació complint, així, amb l'objectiu d'aquesta.

6. Programació

L'inici del projecte va estar el 03/02/2020 i la finalització del mateix el 01/07/2020. A la següent taula s'especifica cadascuna de les activitats que conformen el projecte amb el seu corresponent temps de dedicació.

Activitat	Inici	Duració (dies)	Final
Determinació del problema	03/02/2020	6	10/02/2020
Redacció de la memòria	10/02/2020	142	01/07/2020
Definició del projecte	10/02/2020	2	12/02/2020
Definició de la geometria	12/02/2020	23	06/03/2020
Aprentatge CFD	23/02/2020	101	03/06/2020
Estudi del mallat	07/03/2020	25	01/04/2020
Definició casos a simular	02/04/2020	40	12/05/2020
Realització de les simulacions	05/04/2020	81	25/06/2020
Obtenció de resultats i anàlisi	04/05/2020	52	25/06/2020
Millora del model	04/06/2020	4	08/06/2020
Discussió dels resultats	26/06/2020	1	27/06/2020
Pressupost	26/06/2020	1	27/06/2020
Impacte ambiental	27/06/2020	1	28/06/2020
Conclusions	28/06/2020	1	29/06/2020

Taula 16. Programació. Font pròpia.

Com es pot observar a la taula, les activitats que han requerit una major dedicació han estat la redacció de la memòria, l'aprenentatge CFD i la realització de les simulacions.

7. Pressupost

El pressupost del treball es realitza assumint el cas hipotètic que el projecte el poses en marxa una empresa. Els costos es divideixen en costos directes i indirectes.

7.1. Costos directes

En ser un projecte basat, totalment, en un estudi computacional, a més de la redacció de la memòria, la generació de taules, la recerca, entre d'altres del mateix tipus, els costos estan majoritàriament relacionats a les hores invertides en aquesta anàlisi i les eines utilitzades per aquest. S'estima la inversió d'hores en 355, suposant una mitja d'hores de dedicació de 2h/dia.

Segons el conveni siderometal·lúrgic del 2019, el qual seria el que correspondria pel tipus de vàlvula, de la província de Barcelona, el sou d'un enginyer tècnic que faci aquest tipus de tasca és de 24412,98€ a l'any (1750h) que pertanyen al grup 3 del conveni esmentat. A més, se li ha de sumar un 30% aproximat al salari brut (resultaria 31736,87€), com a cost que ha d'assumir l'empresa per a la seguretat social i altres conceptes. Resultant en un cost/hora de 18,14€.

Els costos directes també contempen tot el material d'oficina emprat i, en especial, les llicències dels softwares utilitzats. Es considera el cost de l'ordinador utilitzat per tal de reflectir millor la relació entre temps de dedicació (que depenen de l'ordinador seria més o menys) i cost.

Concepte	Cost adquisició (€)	Cost (€/h)	Temps invertit (h)	Total (€)
Temps dedicació	-	18,14	355	6439,7
Material d'oficina	-	-	-	170
Ordinador	580	-	-	580
Llicència Solidworks	6600	-	-	6600
Llicència Ansys Workbench	30000	-	-	30000
Cost total				43789,7

Taula 17. Costos directes. Font pròpia.

7.2. Costos indirectes

Els costos indirectes són els que estan lligats a les despeses energètiques i d'Internet dels equips utilitzats.

Concepte	Consum (kW)	Preu unitari	Utilització	Total (€)
Consum elèctric	0,13	0,133€/kWh	355h	6,13795
Consum internet	-	35,95€/mes	4 mesos	143,8
Cost total				149,938

Taula 18. Costos indirectes. Font pròpia.

7.3. Costos totals del projecte

Una vegada calculats els costos directes i indirectes, es passa a calcular els costos totals. Per als costos totals, no només s'ha de tenir en compte els costos directes i indirectes ja calculats, sinó que també s'ha d'incloure els costos indirectes que no es poden imputar directament a les despeses, com són el cost del lloguer d'un local, el manteniment de les instal·lacions, els costos dels diferents departaments, entre d'altres. Aquest cost es representa amb un percentatge aplicat als costos totals acordat amb la suposada empresa que executés el projecte. A més, s'ha d'imputar un percentatge per al marge de beneficis.

Concepte	Percentatge (%)	Total (€)
Costos directes	-	43789,7
Costos indirectes	-	143,8
	Cost total	43933,5

Taula 19. Costos totals. Font pròpia.

Tenint en compte els costos no imputables i el marge de benefici esmentat, els costos serien els següents:

Concepte	Percentatge (%)	Total (€)
Costos imputables	-	43933,5
Costos no imputables	11	4832,685
Marge de benefici	6	2636,01
	Cost total	51402,195

Taula 20. Costos totals reals. Font pròpia.

Així doncs, el cost del projecte seria de 51402.2€. Cal destacar que la major part de les despeses provenen de la compra de les llicències, les quals s'haurien de reajustar si, com seria el cas més sensat, l'empresa en qüestió adquirís les llicències per diferents projectes amb la qual cosa s'hauria de computar tan sols el percentatge del preu de la llicència que pertanyés a aquest projecte.

8. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental en la societat és inevitable en tot projecte per senzill que aquest sigui. Per a la realització de l'estudi del projecte s'ha utilitzat en menor o major mesura certs recursos naturals. Tot i això, cal tenir en compte que aquest projecte en específic i les simulacions CAE en general han reduït considerablement la petjada ecològica produïda a causa de l'estalvi de la creació i utilització de prototips físic que, abans de disposa d'aquestes eines, es feien servir a tall de prova.

Desglossant el petit impacte que pot arribar a tenir aquest petit projecte, es fa referència al CO₂ generat pel consum elèctric per a l'elaboració del projecte.

Suposant que contractéssim l'energia amb Endesa i segons dades del 2019 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, el factor d'emissió és de **0,27kg(CO₂)/kWh**. Per tant, la petjada de carboni referida al consum elèctric resultaria així:

Concepte	Consum (kW)	F. emissió CO ₂ (Kg/kWh)	Ús (h)	Emissió CO ₂ (Kg)
Ordinador	0,13	0,27	355	12,4605
Lluminària i altres	0,1	0,27	355	9,585
			Total	22,0455

Taula 21. Impacte mediambiental. Font pròpia.

Aquest valor dona una bona base de l'impacte ecològic del projecte. No obstant això, existeix cert impacte ecològic indirecte que, si bé no es calcula en aquest projecte per la dificultat que comportaria, no s'ha d'obviar. Serien exemples la fabricació de l'ordinador, el material, els softwares, entre d'altres.

9. Conclusions

Primerament, cal destacar l'experiència personal que s'obté al realitzar aquest treball. El món del CFD és molt interessant i, cada cop, més indispensable i influent en el camp de l'enginyeria fluidodinàmica. Elaborant un treball en la línia en la que va dirigit aquest projecte, es brinda l'oportunitat d'aprofundir i/o aprendre la teoria i pràctica relacionada amb aquesta especialitat. No ha estat un projecte fàcil d'aprendre, però gràcies a la facilitat que hi ha avui en dia per trobar informació, la base agafada a la universitat i, l'ajuda del tutor, s'ha pogut construir uns resultats coherents amb els objectius inicials i, a més, ampliar el punt de vista referent a la mecànica de fluids.

En segon lloc i fent referència als aspectes tècnics, els resultats han estat satisfactoris. S'ha plantejat la simulació d'una geometria on simplement se li ha fet les millores pertinents per què el mallat fos acceptat per el *solver* i, un cop feta la simulació, se li ha fet les millores pensant en el resultat hidrodinàmic que s'obtindria. Els resultats més eficients que s'ha reflectit a la segona simulació han corroborat l'efectivitat de les millores aplicades a la geometria.

Ha estat molt interessant veure la relació entre la teoria i la pràctica al utilitzar els coneixements adquirits a la universitat i a les pràctiques professionals. Ha set curiós veure com els punts on, a cop d'ull, s'intuïa que es generaria una estela més turbulenta o hi hauria més risc de cavitació, han estat efectivament els punts on més s'han generat aquests factors.

Per últim, cal destacar la importància de disposar d'un bon *hardware* per suportar les exigències que requereix el *software* en sí mateix com per reduir tant com sigui possible els temps de simulació ja que la diferència pot ser no només d'hores, sinó que també de dies i, fins i tot, de setmanes. L'experiència a l'hora de preparar la simulació també es clau per preparar un bon model i, conseqüentment, tenir un resultats més propers a la realitat.

10. Bibliografia

- Enciclopèdia. *Segon principi de la termodinàmica* [En línia]. Gran enciclopèdia catalana, Maig 1989. [Consulta: 20 de febrer de 2020] Disponible a: <<https://www.enciclopedia.cat/ec-gec-0213342.xml>>
- Torres Agudo, Joaquín J. *Dinàmica de fluids*. [En línia]. Granada: Universidad de Granada. [Consulta: 17 de març de 2020] Disponible a: <<https://www.ugr.es/~jtorres/t7.pdf>>
- Universidad de Oviedo. *Capa límite* [En línia]. Oviedo: Universidad de Oviedo, Octubre 2018. [Consulta: 13 març 2020] Disponible a : <https://web.archive.org/web/20090521084229/http://www.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/asignaturas/mecanica_de_fluidos/07_08/MF07_Capalimite.pdf>
- Martín, T., i Serrano, A. *Primer Principio de la Termodinàmica*. [En línia]. Madrid: Universidad politècnica de Madrid (UPM), Octubre 2014. [Consulta: 7 de març 2020] Disponible a: <<http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo1p/primerp.html>>
- ANSYS, Inc, *ANSYS Help* [En línia] Canonsburg, Pensilvania, 2020. [Consulta: 4 d'Abril] Disponible a: <<https://ansyshelp.ansys.com/>>
- Martín, T., i Serrano, A. *Primer Principio de la Termodinàmica*. [En línia]. Madrid: Universidad politècnica de Madrid (UPM), Octubre 2014. [Consulta: 7 de març 2020] Disponible a: <<http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo1p/primerp.html>>
- Unió Patronal Metal·lúrgica. *XVII Conveni col·lectiu per a la industria siderometal·lúrgica de la província de Barcelona* [En línia] Barcelona, Juliol de 2018. [Consulta: 26 de Juny 2020] Disponible a: <https://upm.org/wp-content/uploads/2019/01/conveni_2018_2019.pdf>
- Unió Patronal Metal·lúrgica. *Taules Salaries 2019* [En línia] Barcelona, Juliol de 2018. [Consulta: 26 de Juny 2020] Disponible a: <https://upm.org/wp-content/uploads/2019/03/TAULES_2019.pdf>
- Ortega, J. *Àreas de aplicació de la MFC* [En línia] Màlaga, 2019. [Consulta: 24 d'Abril] Disponible a: <<http://www.fluidmal.uma.es/mfc/m5.html>>
- Oficina Española de Cambio Climático *Factores de emisión* [En línia] Versió 15. Madrid, juny de 2020 [Consulta: 27 de Juny 2020] Disponible a: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-479095.pdf>
- Gerhart, P.M. ; Gross, R. J. ; Hochstein, J. I. *Fundamentos de mecánica de fluidos*. 2a ed. Argentina: Adisson Wesley Iberoamericana, 1995. ISBN 0201601052.

Çengel, Yunus A.; Cimbala, John M. *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones* [en línia]. 4a ed. México, DF: McGraw-Hill, 2018 [Consulta: 10 de Març 2020]

Disponible a: <https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C__Rb1510226?lang=cat.>

ISBN 9781456260941.

White, F.M. *Mecánica de fluidos* [en línia]. 6ª. Madrid: McGraw-Hill, 2008 [Consulta: 25 de febrero de 2020]. Disponible a:

<https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C__Rb1510228?lang=cat.> ISBN

8448140761