



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Anàlisi de les pèrdues de càrrega localitzades en túnels hidràulics revestits amb dovelles

Projecte realitzat per:

PAU SILLERO SELLÉS

Dirigit per:

MANUEL GOMEZ VALENTIN

DANIEL MONTOBBIO COSTA

Màster en:

Enginyeria Geològica i de Mines

Barcelona, *Juny 2017*

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRAÏMENTS

En primer lloc, agrair als meus tutors de Treball Final de Màster, Dani i Manuel, la seva exigència, el constant suport, l'orientació i la confiança d'acompanyar-me durant la trajectòria del projecte.

En segon lloc, donar les gràcies a tots els professors de l'Escola de Camins i de la Facultat de Geologia amb qui he crescut com a persona i que han sabut transmetre'm els seus coneixements, dotant-me de criteri tècnic i enginyeril, durant el grau i el màster, sense oblidar la meva estada a França, on vaig complementar la meva formació i conviure amb gent d'arreu del món.

Agrair també a tots els companys de classe amb els que he caminat al llarg d'aquests 6 anys de grau i màster, compartint-hi sempre molts bons moments.

Finalment, als meus pares Josep i Maria, i al meu germà, agrair-los que m'hagin educat, estimat i donat bons consells al llarg de tota la vida. I en especial donar les gràcies a la Berta, que m'ha ajudat en tot moment i ha sabut treure el millor de mi.

Per a tot això i molt més, moltes gràcies.

ABSTRACT

The main focus of this study was to examine the head losses generated in hydraulic tunnels by the elements presents on rings and segments (longitudinal and circumferencial joints).

We used Comsol Multiphysics to compute different numerical analysis in 2D and 3D. The results allowed us to analyse the influence of each of our variables (ring's length, speed, tunnel diameter and joint width) into the head losses. The results confirm that the presence of geometrical elements on the segments produce until one order of magnitude of head losses more than the generated by wall friction. Furthermore, the most influential parameter was the circumferencial joints between rings.

With these values, we defined an equation to predict, with a high accuracy and low complexity, the head losses generated by ring's length and depending on our variables.

Finally, we applied this equation to a real case; showing that long-term economic benefits will be higher when the joints between rings are sealed.

Keywords: Head losses, circumferencial joints, sealed, hydraulic tunnel.

RESUM

Les pèrdues de càrrega en els túnels hidràulics han sigut objecte d'estudi en els darrers anys. Fins ara, però, aquests estudis s'han centrat en les pèrdues degudes a la fricció de l'aigua amb les parets, sense analitzar-ne altres elements presents en les dovelles. Donades aquestes circumstàncies, esdevé interessant estudiar l'afectació de les juntes i dels orificis per a l'erector en les pèrdues de pressió d'aigua en túnels hidràulics. Des que aquests es construeixen amb dovelles, els clients sempre han preferit no segellar-ne les juntes. Aquest treball pretén corroborar o desmentir la rendibilitat de realitzar aquesta acció fins ara no estudiada. Per fer-ho, es realitzaran diversos anàlisis numèrics en 2D i 3D amb Comsol Multiphysics, els resultats dels quals ens permetran analitzar com influeixen diverses variables (amplada de junta, velocitat, longitud de l'anell i diàmetre) en les pèrdues de pressió.

Inicialment hem realitzat un cas 2D axisimètric per tal d'obtenir el perfil de velocitats estacionàries que s'empraran per als models 3D. Seguidament, s'han realitzat diversos anàlisis en 2D amb una junta circumferencial per veure com aquesta influeix en les pèrdues de pressió. Per últim, hem analitzat un ventall de models en 3D per simular amb més exactitud i veracitat el comportament del fluid amb les parets del túnel.

Els resultats dels models 3D han confirmat que les pèrdues obtingudes amb aquests elements en les dovelles són d'un ordre de magnitud superior que les produïdes per fricció. Tanmateix, han demostrat que l'element de la dovella que causa més pèrdues de pressió és la junta circumferencial.

Amb els resultats obtinguts, hem pogut definir una equació que ens estima les pèrdues de càrrega per longitud d'anell segons les variables estudiades.

Finalment, hem aplicat aquesta equació per a un cas pràctic real; demostrant que els beneficis econòmics a llarg termini seran superiors si es segellen les juntes entre anells del túnel.

ACRÒNIMS

μ	→	Viscositat cinemàtica [m^2/s]
A	→	Amplada de junta [mm]
CFD	→	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinàmica Computacional de Fluids)
D	→	Diàmetre del túnel [m]
DF	→	Diferències Finites
EF	→	Elements Finites
L	→	Longitud de l'anell
mca	→	Metres de columna d'aigua
n	→	Coefficient de rugositat de Manning
P	→	Pressió [kPa], [cm], [mm]
P_0	→	Pressió inicial [kPa]
P_1	→	Pressió final [kPa]
P_r	→	Pressió de referència [kPa]
Q	→	Cabal / Flux [m^3/s]
r	→	Radi [m]
RANS	→	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
Re	→	Número de Reynolds [-]
TBM	→	<i>Tunnel Boring Machine</i> (Màquina Tuneladora)
UPC	→	Universitat Politècnica de Catalunya
v	→	Velocitat del flux [m/s]
VF	→	Volums Finites
k	→	Energia cinètica turbulent
ε	→	Relació d'energia de dissipació cinètica

ÍNDIX DE TAULES I FIGURES

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Cabals definits segons el diàmetre i la velocitat.	18
Taula 2: Combinacions realitzades per als casos base.....	19
Taula 3: Elements presents en els anells imparells i parells.....	23
Taula 4: Longitud de l'anell estudiada segons el diàmetre del túnel.....	26
Taula 5: Pèrdues de pressió segons la velocitat per a un $D=3.5\text{m}$	30
Taula 6: Pèrdues de càrrega modificant la pressió del problema.	31
Taula 7: Valors obtinguts dels casos base del model 2D amb diferents velocitats.	32
Taula 8: Valors de pèrdues de càrrega en Pa pels model 2D base i amb junta circumferencial.....	34
Taula 9: Paràmetres del cas número 42 del model 3D.....	35
Taula 10: Pèrdues de pressió generades per juntes circumferencials, juntes longitudinals i orificis.	45
Taula 11: Longitud optima vs modelitzada per a diferents diàmetres.	48
Taula 12: Diferències de pèrdues de càrrega de les mitjanes d'amplada de junta de 13mm i 26mm segons el diàmetre i la velocitat.....	50
Taula 13: Valors d'ajust entre les dades i el model, obtinguts mitjançant Eureka.....	54
Taula 14: Pèrdues de càrrega obtingudes amb la fórmula de Manning pel cas base i estimades mitjançant l'Equació 4 pel cas amb juntes.....	58
Taula 15: Potència, Energia i Beneficis anuals pel cas base i pel cas amb juntes.	59
Taula 16: Justificació de preus per a segellar una junta.....	59
Taula 17: Casos base del model 3D analitzats.	69
Taula 18: Casos analitzats amb els model 3D.	69

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Detalls dels elements per on circula el fluid. A la imatge superior tenim representats una junta circumferencial i un pern i a la imatge inferior, els orificis per a l'erector.....	3
--	---

Figura 2: Detalls de les diferents posicions de l'anell (en color negre està representada la dovella clau).....	4
Figura 3: Detalls d'un anell trapezoïdal.	5
Figura 4: A. Anell universal amb els plans de tall que el formen. B. Anell universal, a l'esquerra de la imatge tram en línia recta i a la dreta tram en corba.	6
Figura 5: Imatge en 3D d'un anell de dovelles.	7
Figura 6: Esquema dels diferents estats d'un flux d'aigua (Imatge extreta de la guia de Comsol Mutiphysics).....	8
Figura 7: Esquema dels diferents estats d'un flux d'aigua. Representació de les oscil·lacions en el temps (Imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).....	9
Figura 8: Esquema de al subdivisió de capes de la funció paret (Imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).	10
Figura 9: Esquema de la velocitat real del flux respecte la velocitat calculada, utilitzant la funció paret (Imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).....	11
Figura 10: Malla utilitzada en els nostres models 2D axisimètric.....	12
Figura 11: Diagrama de tasques realitzades en el treball per tal d'assolir els objectius.	15
Figura 12: Definició de les condicions de contorn en el model.	16
Figura 13: Geometria i mallat del model 2D axisimètric.	17
Figura 14: Geometria i malles del model 2D per a amplades de junta de 10mm i 30mm.	20
Figura 15: Esquema de les velocitats del model 2D axisimètric i 2D.....	21
Figura 16: Geometria del model 3D de diàmetre 3.5m i longitud d'anells d'1m.	22
Figura 17: Segment d'un model 3D amb 5 anells: 3 imparells (A) i 2 pars (B).....	22
Figura 18: Mallat general (part superior) i detallat (part inferior) del túnel de 30m.....	23
Figura 19: Esquema de les velocitats del model 2D axisimètric i 3D.....	24
Figura 20: Representació d'una junta circumferencial (esquerra) i una longitudinal (dreta i en color blau).	25
Figura 21: Representació d'un orifici curt (esquerre) i un de llarg (dreta).	25
Figura 22: Juntes longitudinals vistes en secció transversal. En color lila es mostren les 2 juntes de l'anell par i senyalades en verds les 3 juntes longitudinals de l'anell imparell.	26
Figura 23: Detalls de l'anell de Kargi.....	27

Figura 24: Velocitat (m/s) en l'eix respecte la longitud del túnel pel cas 2D axisimètric de diàmetre 3.5m. Velocitat d'entrada 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D). 29	
Figura 25: Perfil de velocitats inicials (A) i finals (B) pel cas de velocitat 2.9m i D=3.5m. 30	30
Figura 26: Pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del túnel pel cas base axisimètric 2D de diàmetre 3.5m. Velocitat d'entrada 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D). 31	31
Figura 27: Pèrdues de càrrega per a velocitats de 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D). En diferents colors s'observen les diferents amplades de juntes: blau pel cas de 10mm, verd per 20mm i vermell per 30mm. 33	33
Figura 28: Pèrdues de càrrega per a velocitats de 0.5m/s, 2.9m/s, 4.5m/s i 6m/s. 33	33
Figura 29: A: Velocitats al llarg del túnel. B: Perfil de velocitats cada 5m, des de l'inici (0m) fins al final (30m). 36	36
Figura 30: Velocitat en les parets del túnel. La imatge inferior mostra un zoom del túnel als 20m de llargada. 36	36
Figura 31: Velocitats en les parets i en els seus elements. 37	37
Figura 32: Velocitat longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m) i a alçada 0m. 38	38
Figura 33: Velocitat longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix i amb alçada variable (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m). 39	39
Figura 34: A. Isòbares obtingudes al llarg dels 30m de túnel (emmarcat observem un detall de 4 anells de dovelles). B. Valors de pèrdues de pressió a l'eix. 40	40
Figura 35: Talls transversals a la direcció del flux i perpendiculars a l'eix, D=3.5m. 41	41
Figura 36: Valors de pressions obtinguts cada 0.25m en direcció perpendicular al flux. 42	42
Figura 37: Valors de pressions longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix i amb alçada variable (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m). 43	43
Figura 38: Pèrdues de càrrega causades amb juntes circumferencials. 44	44
Figura 39: Pèrdues de càrrega originades per les juntes longitudinals. 44	44
Figura 40: Pèrdues de càrrega generades pels orificis. 44	44
Figura 41: Línies de flux pel model número 42. Els diferents colors representen les velocitats en m/s. El requadre emmarcat de color blau representa la trajectòria de les partícules oscil·lants mentre que el marc vermell, representa la trajectòria contínua de les partícules en l'eix. 45	45

Figura 42: Distribució de valors obtinguts per $D=3.5m$, $6m$ i $9m$, respecte l'amplada de la junta, les velocitats i la longitud de l'anell.	47
Figura 43: Comparació de les pèrdues de càrrega segons els diàmetres del túnel, $3.5m$ (color blau) i $6m$ (color taronja).	49
Figura 44: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les amplades de junta de $13mm$ (columnes blaves) i $26mm$ (línia taronja).....	50
Figura 45: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les diferents velocitats estudiades. En color groc velocitat $6m/s$, en gris $4.5m/s$, en taronja $2.9m/s$ i en blau $0.5m/s$	51
Figura 46: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les diferents longituds de l'anell pel cas de diàmetre $3.5m$ i amplada de junta $13mm$	52
Figura 47: Pèrdues de càrrega (mm) segons les diferents longituds dels anells. Color blau anell de $1m$ de longitud, taronja $1.2m$, gris $1.4m$ i groc $1.6m$	52
Figura 48: Ratio mig entre les pèrdues de càrrega generades pel cas base i el cas amb juntes circumferencials.	53
Figura 49: A. Gràfic que mostra com s'ajusta l'equació als nostres resultats. B. Gràfic de precisió vs complexitat (en vermell l'equació seleccionada).....	55
Figura 50: Gràfic on s'observen els resultats obtinguts amb els models 3D respecte els predits amb la fórmula.	55
Figura 51: Pèrdues de pressió estimades mitjançant la fórmula vs valors estimats mitjançant Comsol Multiphysics.	56
Figura 52: Pèrdues de pressió estimades mitjançant l'Equació 4 per a diàmetre $9m$. .	57
Figura 53: Gràfics velocitat (m/s) en l'eix respecte longitud per al cas 2D axisimètric de diàmetre $6m$. Velocitat d'entrada $0.5 m/s$ (A), $2.9m/s$ (B), $4.5m/s$ (C) i $6m/s$ (D). .	65
Figura 54: Gràfic pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del cas base axisimètric 2D de diàmetre $6m$. Velocitat d'entrada $0.5 m/s$ (A), $2.9m/s$ (B), $4.5m/s$ (C) i $6m/s$ (D).	66
Figura 55: Gràfics velocitat (m/s) en l'eix respecte longitud per al cas 2D axisimètric de diàmetre $9m$. Velocitat d'entrada $0.5 m/s$ (A), $2.9m/s$ (B), $4.5m/s$ (C) i $6m/s$ (D). .	67
Figura 56: Gràfic pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del cas base axisimètric 2D de diàmetre $9m$. Velocitat d'entrada $0.5 m/s$ (A), $2.9m/s$ (B), $4.5m/s$ (C) i $6m/s$ (D).	68
Figura 57: Gràfiques de velocitat per a $D=6m$ (A) i $D=9m$ (B).	72
Figura 58: Gràfiques de pèrdues de pressió per a $D=6m$ (A) i $D=9m$ (B).	73

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	1
1.1	STATE OF THE ART	2
1.1.1	Dinàmica de fluids computacional	2
1.1.2	Utilització de dovelles com a revestiment i sosteniment	2
1.1.3	Evolució de les dovelles prefabricades de formigó	4
1.2	Teoria del flux hidràulic	8
1.2.1	Model hidràulic turbulent	8
1.2.1.1	Introducció al model turbulent	8
1.2.2	Model Estàndard k- ϵ	12
1.3	MOTIVACIÓ	12
2	OBJECTIUS	14
3	METODOLOGIA	15
3.1	Definició del problema	16
3.2	Cmsol Multiphysics	17
3.3	Definició d'un model previ: 2D axisimètric	17
3.3.1	Geometria i mallat	17
3.3.2	Condicions de contorn i paràmetres	18
3.4	Cas Base	19
3.5	Definició del Model 2D	20
3.5.1	Geometria i mallat	20
3.5.2	Condicions de contorn i paràmetres	21
3.6	Definició del model 3D	22
3.6.1	Geometria i mallat	22
3.6.2	Condicions de contorn i paràmetres	24
3.7	Formulació	27
3.8	Aplicació d'un cas pràctic	27
4	RESULTATS	29
4.1	Resultats del model 2D axisimètric	29
4.2	Resultats del model 2D amb una junta circumferencial	32
4.2.1	Cas base del model 2D	32
4.2.2	Model 2D amb junta circumferencial	32
4.3	Resultats del model 3D	35
4.3.1	Velocitats	35
4.3.2	Pressió	40

4.4	Resultats Globals del model 3D	47
4.5	Formulació	54
4.6	Aplicació a un cas pràctic.....	58
5	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	60
5.1	Discussió dels resultats.....	60
5.2	Recomanacions futures	61
6	CONCLUSIONS	62
7	BIBLIOGRAFIA I PÀGINES WEB CONSULTADES.....	63
7.1	BIBLIOGRAFIA.....	63
7.2	PÀGINES WEB CONSULTADES	64
8	ANNEXES	65
	A.1 Taules de resultats dels models 2D axisimètrics	65
	A.2 Taules de resultats dels models 3D.....	69
	A.3 Gràfics de velocitats 3D per a D=6m i 9m	72
	A.3 Gràfics de pressions 3D per a D=6m i 9m	73

1 INTRODUCCIÓ

Els túnels hidràulics s'excaven típicament mitjançant tuneladores (TBM, *Tunnel Boring Machine*) o per mètodes de perforació i voladura. Ambdós mètodes presenten un impacte diferenciat en la rugositat final del túnel. En túnels excavats a partir d'una TBM s'instal·la un revestiment final constituït per diferents segments prefabricats de formigó armat, formant un anell, amb una rugositat molt inferior ($n=0.013$, Sánchez-Juny 2005) a la dels túnels excavats amb perforació i voladura (o altres mètodes segons si el terreny és sòl o roca). Alguns d'aquests últims poden ser revestits amb formigó encofrat ($n=0.015$) o amb formigó projectat ($n=0.019$) (Sánchez-Juny 2005, Coon 1998).

La rugositat del formigó afecta directament a la velocitat del flux que hi circula, reduint-ne la velocitat causada per la fricció de les partícules. A més a més de la rugositat, el flux es troba també amb altres irregularitats geomètriques com són les juntes entre segments i els diferents elements d'aquests anells com els orificis per a l'erector, entre d'altres. Aquests elements, juntament amb la rugositat, generen una pèrdua de càrrega notable al llarg dels kilòmetres d'un túnel (Bishwakarma 2012). Habitualment, aquestes irregularitats geomètriques no se solen omplir de formigó, cosa que augmenta les pertorbacions del flux degut a que les parets no són uniformement llises. Tot i no existir cap estudi que expliqui i justifiqui aquesta acció d'omplir o no aquests elements, són els clients qui prenen aquesta decisió (generalment tots ells opten per no omplir-los).

La predicció d'aquestes pèrdues de càrrega en túnels hidràulics és un problema complex i força desconegut. Hi ha molts factors que hi influeixen, especialment la rugositat de les parets, les irregularitats geomètriques i el diàmetre del túnel. Les inestabilitats i les turbulències del flux hi juguen un paper fonamental, per la qual cosa, l'ús de la dinàmica de fluids computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) és un requeriment en el disseny de túnels hidràulics i hidroelèctrics, degut a la dificultat i l'elevat cost de l'experimentació a escala real (Najafi 2012). Actualment, les anàlisis CFD es basen en les equacions de Navier-Stokes amb mitjanes de Reynolds (RANS, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation*).

En la primera part d'aquest treball es realitza un estudi 2D axisimètric d'un flux estacionari, amb la finalitat de determinar les condicions de contorn (velocitat i pressió) que seran utilitzades pel model 3D.

A continuació, es crea un model 2D amb una junta circumferencial amb l'objectiu de determinar si influeix en la pèrdua de càrrega.

Per tal de demostrar la influència que tenen aquestes juntes en les pèrdues de càrrega, en la segona part del treball es realitzen una sèrie de models 3D de 30m de longitud cadascun. Un cop obtinguts els resultats, s'analitzen i es comparen entre ells.

Finalment, es formula una equació que estima la pèrdua de càrrega en funció dels diferents paràmetres estudiats. I s'aplica aquesta fórmula a un cas pràctic real.

1.1 STATE OF THE ART

1.1.1 DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL

La dinàmica de fluids computacional es basa en l'anàlisi, amb l'ajut de simulacions mitjançant ordinador, de sistemes relacionats amb el flux de fluids, la transferència de calor, i fenòmens com ara les reaccions químiques. Les seves aplicacions s'estenen a múltiples camps.

La dinàmica de fluids computacional està fonamentada en les equacions de Navier-Stokes, de balanç d'energia i de massa. Aquestes equacions diferencials es resolen en volums de control, petits volums en què es divideix la zona d'interès i que tots junts formen la geometria del flux, en forma de malla. Aquesta malla és un factor determinant per obtenir uns resultats acurats i, per tant, caldrà estudiar-la en detall (veure capítols 3.3.1, 3.5.1 i 3.6.1). Un cop definides les condicions de contorn del problema, es resolen les equacions de balanç de flux i energia. El procés es realitza iterant fins a obtenir un resultat amb un error satisfactori.

Els actuals codis comercials de CFD es basen en la manera de discretitzar l'espai, ja sigui per elements finits (EF), diferències finites (DF) o volums finits (VF). Les diferències finites tenen l'inconvenient de què només permeten realitzar malles estructurades i, per tant, no poden ser aplicades a geometries complexes. És per aquest motiu que actualment els VF i EF són els mètodes més utilitzats, ja que permeten treballar tant amb malles estructurades com des-estructurades. En el nostre cas, el software que hem emprat (Comsol Multiphysics) utilitza generalment elements finits, però pot utilitzar EF, DF i VF segons el mòdul que s'utilitzi.

1.1.2 UTILITZACIÓ DE DOVELLES COM A REVESTIMENT I SOSTENIMENT

La utilització de dovelles en túnels excavats mitjançant TBM és necessària pel revestiment i sosteniment del túnel. Això és degut als següents factors (Pescara 2010):

- Necessitat d'un recolzament immediat (principalment per a una excavació en un terreny inestable).
- Necessitat de controlar els moviments induïts per l'excavació del túnel en superfície.
- Evitar el drenatge de les aigües subterrànies i, per tant, construir túnels que siguin resistents i impermeables al aigua.
- Proporcionar un recolzament per a què la màquina tuneladora pugui avançar.
- Evitar la instal·lació d'un revestiment secundari.

Els segments prefabricats de formigó armat que formen els anells presenten una sèrie d'elements característics (veure Figura 1). Aquests són els orificis per a l'erector, les juntes i els pern.

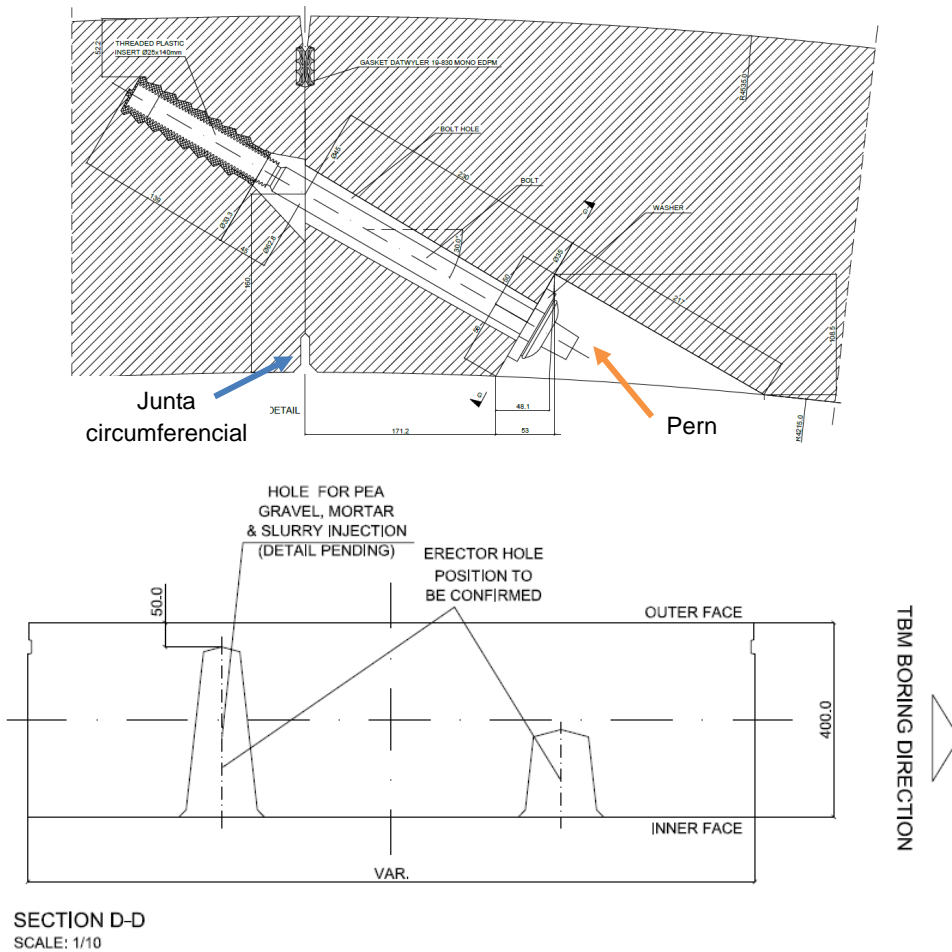


Figura 1: Detalls dels elements per on circula el fluid. A la imatge superior tenim representats una junta circumferencial i un pern i a la imatge inferior, els orificis per a l'erector.

Actualment, els anells de dovelles més utilitzats són del tipus universal. Aquests se solen anomenar com $x+1$, on x és el número de dovelles a col·locar i el $+1$ és la dovella clau. Aquesta última sol ser més petita i es col·loca sempre al final. Els anells no tenen cares paral·leles sinó que tenen una certa conicitat que permet que, segons on es situï la dovella clau, es pugui traçar una corba per anar variant la direcció del recorregut del túnel. En la següent Figura 2 es mostra un exemple de les múltiples posicions que pot tenir un anell, en aquest cas 19 posicions.

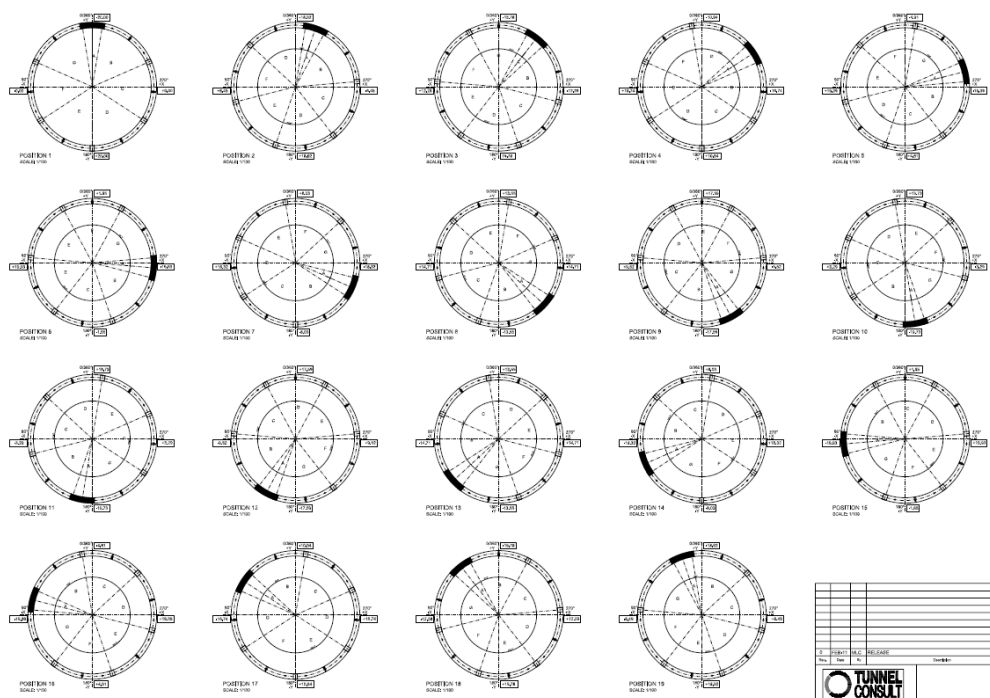


Figura 2: Detalls de les diferents posicions de l'anell (en color negre està representada la dovella clau).

1.1.3 EVOLUCIÓ DE LES DOVELLES PREFABRICADES DE FORMIGÓ

Des de la dècada dels anys 1960, els revestiments de formigó s'han utilitzat en molts túnels de petit diàmetre arreu d'Europa. Aquests eren dissenyats per ser construïts a mà, i per tant l'amplada de la dovella era d'uns 600mm, ja que quedava molt limitada pel pes. Aquestes dovelles formaven generalment el revestiment primari, atès que posteriorment es construïa un revestiment secundari que consistia en panells de formigó o emplenament *in-situ* (Skelhorn, McNally 2009).

Amb el desenvolupament de les màquines tuneladores (TBM), es va introduir el concepte d'erectors mecànics, que van eliminar les restriccions del pes de la dovella. Aquesta idea va permetre crear el disseny d'un anell únic i no per capes, que era suficient com a revestiment final. A més, es va poder augmentar l'amplada dels anells fins arribar a 1m d'amplada.

Fins aleshores, els anells de dovelles es construïen mitjançant connexions cargolades. En alguns casos on el terreny era estable, es va començar a utilitzar un mètode diferent. Aquest nou mètode introduïa l'última de les dovelles a muntar en forma de falca (dovella clau) fent que no fossin necessaris els cargols.

D'altra banda seguia existint el problema de la impermeabilització del túnel, ja que aconseguir un segellat complet entre dovelles era molt complicat. El que es feia era col·locar una corda impregnada de quitrà entre cada dovella per segellar temporalment la junta i així retenir la lletada per reomplir l'espai anular. Les unions entre els segments es segellaven un cop finalitzat el túnel -amb morter o similar- cosa que retardava molt el temps de finalització del projecte. Amb el pas del temps, es va anar substituint la corda per juntes hidròfiles permanents que s'instal·laven en les ranures de les dovelles fetes

per a aquest propòsit. Tot i el bon resultat d'aquests nous mètodes, encara se seguia complementant amb el segellat posterior mitjançant morters (Skelhorn, McNally. 2009).

Anells trapezoïdals:

A principis de la dècada dels 80, els dissenyadors i contractistes van començar a experimentar amb dovelles trapezoïdals (Figura 3). Aquest canvi va ser motivat per la necessitat de millorar l'estanquitat i també per la substitució de les juntes hidròfiles per juntes de goma. La utilització d'aquestes noves juntes feia necessari lliscar i col·locar cada dovella en el seu lloc definitiu abans de què les juntes entressin en contacte. Això no era possible amb les dovelles paral·leles, en les que era imprescindible comprimir les juntes radials per alinear els orificis dels pern. Conseqüentment, amb les dovelles trapezoïdals, les juntes no entraven en contacte fins que els orificis pels pern de les dovelles s'encaixaven (Skelhorn, McNally 2009).

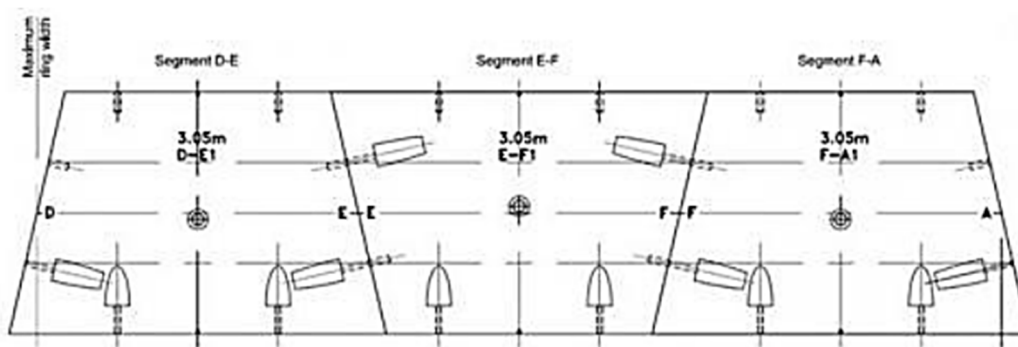


Figura 3: Detalls d'un anell trapezoïdal.

L'anell trapezoïdal inicial estava format per 6 dovelles idèntiques que es consideraven com a tres claus i tres contraclaus. Un inconvenient d'aquest tipus de dovelles es produïa a l'hora de muntar l'anell. Començant per la dovella de contraclau, la seqüència de construcció necessitava la col·locació de la dovella clau a tots dos costats de la primera dovella muntada, abans d'instal·lar les altres dues dovelles de contraclau.

Com a resultat dels diferents estudis i projectes duts a terme en els últims anys, aquest sistema va anar evolucionant i va culminar amb l'anell universal més utilitzat en l'actualitat.

Conicitat de l'anell:

Un dels principals problemes de qualsevol anell de dovelles es manifestava a l'hora de traçar les corbes. Amb un anell no cònic era necessari comprimir les juntes transversals, el que permetia traçar les corbes en el túnel, però aquest fet generava problemes de qualitat en la construcció de l'anell. Quan un anell paral·lel es comprimia en un dels seus costats, l'anell perdia el seu pla. En els anells de dovelles, això provocava un canvi geomètric i l'anell perdia la seva circularitat, la qual cosa feia més difícil el muntatge dels anells posteriors (Skelhorn, McNally 2009).

Per contrarestar-ho, es van dur a terme diferents estudis i comprovacions dels revestiments, durant i després de la construcció. L'anell cònic va ser desenvolupat utilitzant un anell de sèrie amb una sola dovella clau, juntament amb la introducció de variacions en l'amplada de l'anell (conicitat). La variació de l'amplada era gradual i

oscil·lava entre 10mm i 20mm. Així doncs, una anell de longitud 1m amb una variació gradual de 20mm passava a tenir una llargada d'entre 990mm i 1010mm. Amb aquesta millora el túnel podia ser dirigit col·locant l'anell en la direcció desitjada i mantenint al mateix temps els plans dels anells.

En un anell cònic, la geometria de cada dovella era diferent, per tant, era necessari l'ús de diferents motlles per a cada dovella, cosa que dificultava molt el procés de fabricació.

Anell Universal:

L'anell universal és l'anell de dovella cònic que ha aconseguit resoldre molts dels problemes esmentats anteriorment. Aquest anell es basa en dos segments clau trapezoïdals (clau i contraclau) i un nombre de segments laterals romboides (normalment entre 4 i 6) per a què l'anell quedi complet.

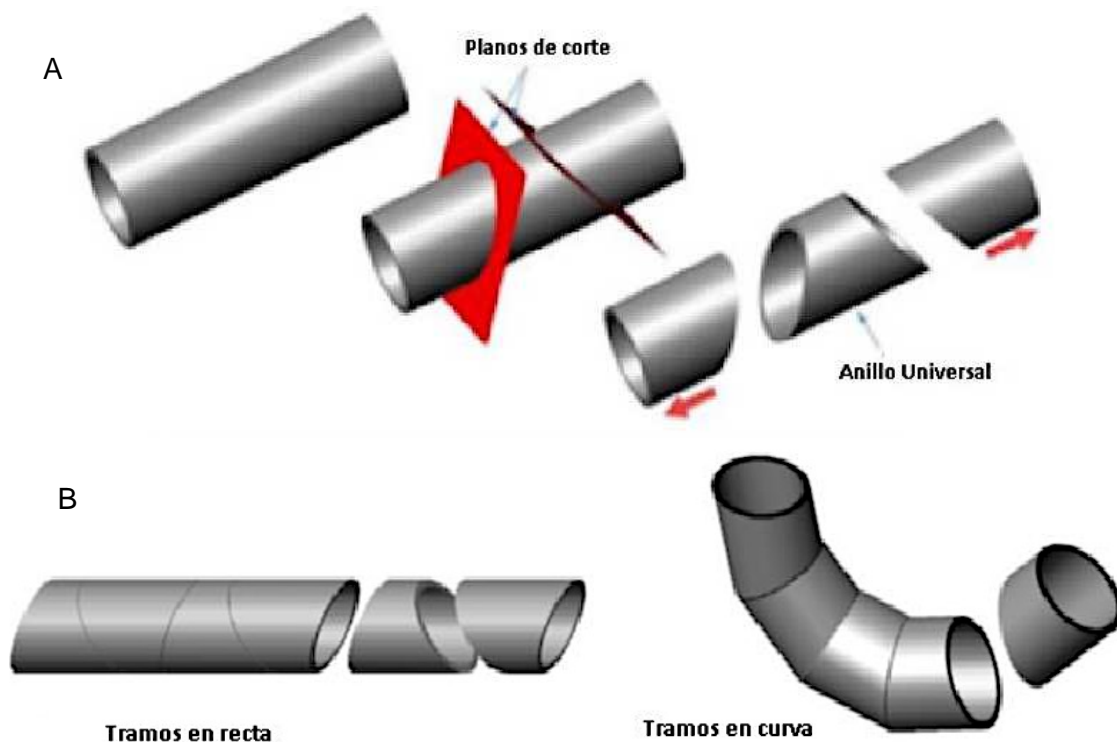


Figura 4: A. Anell universal amb els plans de tall que el formen. B. Anell universal, a l'esquerra de la imatge tram en línia recta i a la dreta tram en corba.

La configuració habitual consisteix en què la clau i la contraclau es col·loquin una contra l'altre en l'anell (separades 180°). El muntatge de l'anell comença amb la col·locació de la dovella contraclau, segueix amb la distribució de dos o tres dovelles romboides a cada costat, segons el disseny, i acaba amb la col·locació de la dovella clau.

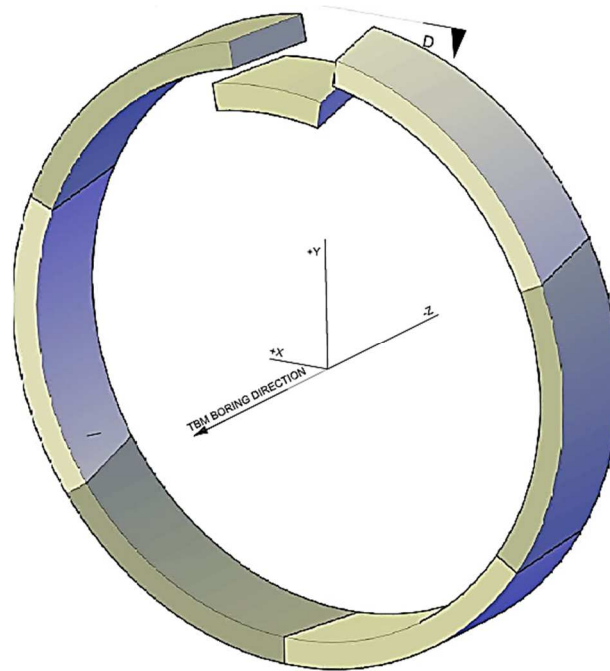


Figura 5: Imatge en 3D d'un anell de dovelles.

L'anell universal presenta un gran avantatge: el procés de construcció s'inicia sempre amb la mateixa dovella (la contraclau) per a tots els anells. Depenent de l'orientació requerida per la forma cònica de l'anell, aquesta dovella pot ser col·locada en qualsevol punt al voltant de l'anell. Gràcies a això ha estat possible reduir les dimensions de la dovella clau i millorar la facilitat de muntatge (Skelhorn, McNally 2009). Altres avenços, com l'ús del sistema de juntes dobles i de juntes hidròfiles en àrees d'abundants aigües subterrànies, també han contribuït a millorar la qualitat final del túnel.

1.2 Teoria del flux hidràulic

1.2.1 MODEL HIDRÀULIC TURBULENT

Un flux es caracteritza per un moviment en làmina lliure o per un moviment a pressió.

- Moviments en làmina lliure:

Un flux en làmina lliure en una secció tancada es caracteritza per l'existència d'una superfície lliure d'interfície entre l'atmosfera i el líquid en el qual el moviment s'estableix per efecte de la gravetat sobre el líquid (Sánchez-Juny 2005).

- Moviments a pressió:

El funcionament a pressió es pot descriure per contraposició al concepte de làmina lliure. És a dir, un flux a pressió es dona a secció plena i el flux s'estableix, entre dues seccions, per la diferència de pressió entre elles (Sánchez-Juny 2005).

Els túnels hidràulics poden presentar un flux en làmina lliure o a pressió. Però en el nostre cas ens basarem únicament en els moviments a pressió.

1.2.1.1 INTRODUCCIÓ AL MODEL TURBULENT

Considerem el flux d'un fluid circulant per sobre d'una placa plana, com es mostra en la Figura 6. La velocitat, inicialment uniforme, té un fregament amb la placa en la part inferior i el flux amb condicions laminars comença a desenvolupar-s'hi. El flux en aquestes condicions laminars és molt previsible. Però, al cap d'una certa distància, el fluid comença a produir unes oscil·lacions caòtiques; aquest règim és anomenat règim de transició. Passat aquest interval, el fluid passa a tenir un comportament completament turbulent.

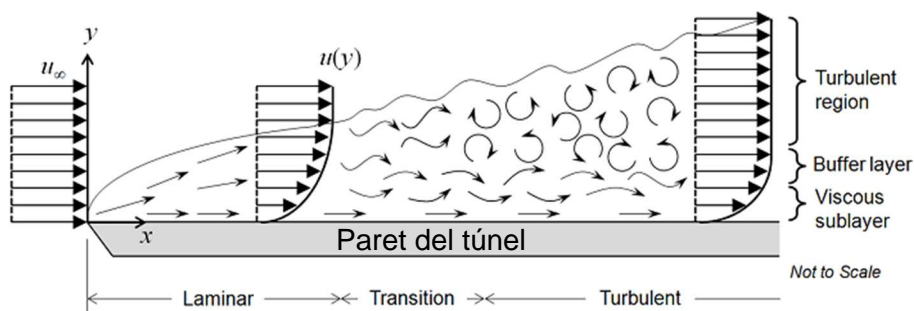


Figura 6: Esquema dels diferents estats d'un flux d'aigua (Imatge extreta de la guia de Consol Mutiphysics).

La transició entre aquestes tres regions (laminar-transició-turbulent) es pot definir a partir del número de Reynolds (Re).

Equació 1:

$$Re = \frac{Dv}{\mu}$$

On, D és el diàmetre del túnel (m), v és la velocitat del flux (m/s) i μ és la viscositat cinemàtica del fluid (m^2/s).

Així doncs, depenent del número de Reynolds es pot caracteritzar un fluid com a:

- Laminar, si $Re \leq 2100$
- Transitori, si $2100 < Re < 4000$
- Turbulent, si $Re \geq 4000$

En tots els nostres models assumim que el fluid és Newtonià, això significa que si se sotmet el fluid a un cert esforç tallant, dóna com a resultat un gradient de velocitats proporcional a la viscositat dinàmica del fluid. Aquesta hipòtesi és certa (o s'hi acostava molt), per un gran ventall de fluids amb importància enginyeril, com són l'aigua o l'aire. La densitat pot variar respecte de la pressió, i considerem que el fluid és incompressible. En el règim laminar, el flux del fluid es pot estimar utilitzant les equacions de Navier-Stokes, que prediuen la seva velocitat i pressió. També podem assumir que els camps de velocitats no varien en el temps i obtenir una bona previsió del comportament del fluid.

Un cop el fluid es troba entre el règim anomenat de transició i el turbulent, les oscil·lacions caòtiques apareixen en el fluid, i ja no es pot assumir que el flux és invariànt en el temps. En aquest cas, és necessari resoldre el problema en el domini del temps i la malla a utilitzar ha de ser suficientment fina.

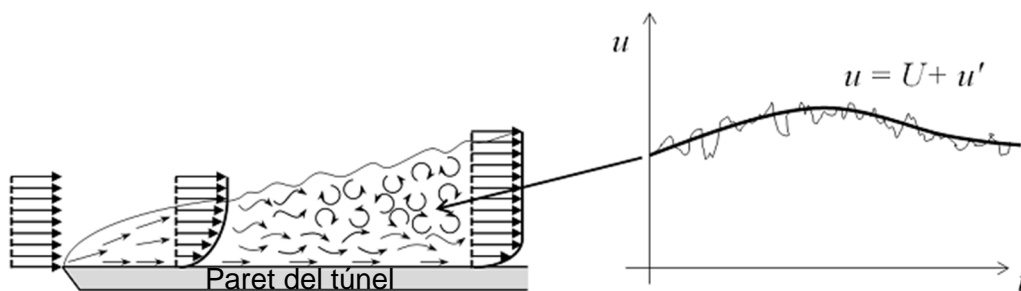


Figura 7: Esquema dels diferents estats d'un flux d'aigua. Representació de les oscil·lacions en el temps (imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).

A mesura que el número de Reynolds augmenta, el flux mostra uns petits remolins, i, les oscil·lacions es tornen tant petites que és impossible de resoldre-les des del punt de vista computacional mitjançant les equacions de Navier-Stokes.

En aquest règim de flux turbulent, podem utilitzar la formulació anomenada *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), que es basa en l'observació de què el flux del fluid (u), en el temps conté petites i locals oscil·lacions (u') que poden ser estudiades en forma d. Com a conseqüència, s'afegeixen incògnites addicionals en el sistema de equacions i s'introdueixen aproximacions per a les velocitats en les parets.

Funció paret:

El flux turbulent a prop d'una paret es pot dividir en 4 regions o estats. En la paret la velocitat del fluid és zero, i en una fina capa situada per sobre d'aquesta, la velocitat del flux és lineal respecte la distància de la paret. Aquesta regió s'anomena subcapa viscosa (*viscous sublayer*) o subcapa laminar. Més allunyada de la paret, trobem la regió anomenada *buffer layer* o capa tampó. En aquesta regió, el flux comença a tenir un comportament del tipus transitori-turbulent (ocasionalment en alguns indrets el flux ja és completament turbulent), i la velocitat mitjana del flux està relacionada amb el logaritme de la distància a la paret. Aquesta regió és coneguda com la *log-law region*. Si ens situem encara més lluny de la paret, el flux passa a tenir un comportament lliure (*free-stream region*).

La capa viscosa i la capa tampó són molt fines, i si la distància al final de la capa tampó és δ , llavors la regió *log-law* s'estén fins a uns 100δ més enllà del mur.

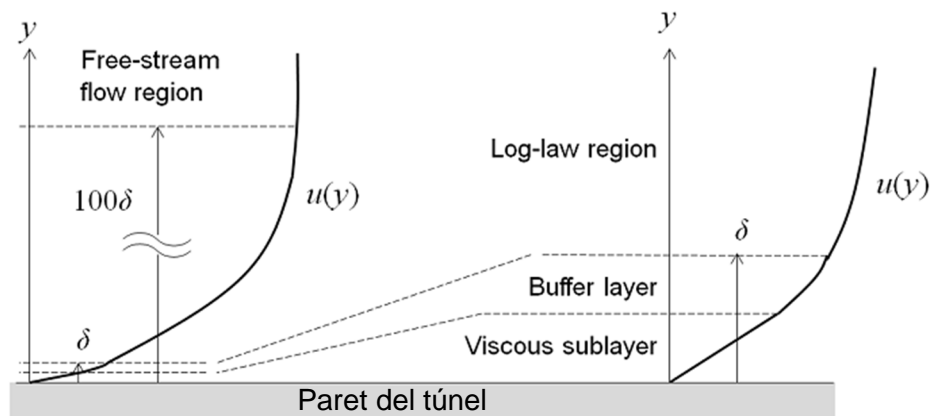


Figura 8: Esquema de la subdivisió de capes de la funció paret (imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).

És possible utilitzar el model RANS per calcular el flux en tots aquests 4 estats. Tot i així, pot ser avantatjós utilitzar una aproximació en aquesta regió, degut al poc gruix de la capa tampó.

Les funcions de paret ignoren el camp de velocitat en la regió tampó i analíticament calculen una velocitat de fluid diferent a zero en la paret. Utilitzant aquesta formulació de la funció paret, s'assumeix una solució analítica pel fluid en la capa viscosa, i per tant els models resultants tindran un cost computacional menor.

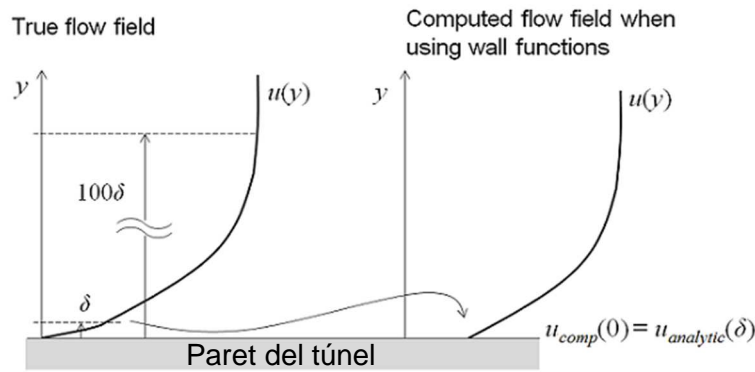


Figura 9: Esquema de la velocitat real del flux respecte la velocitat calculada, utilitzant la funció paret (Imatge extreta de la guia de Comsol Multiphysics).

Com que el nostre problema necessita d'aquestes funcions de paret, haurem de considerar-lo com a turbulent.

El model que hem escollit és el model turbulent $k - \varepsilon$. Aquest resol per a dues variables k i ε on k és l'energia cinètica turbulent i ε és la relació d'energia de dissipació cinètica. Les funcions de paret, és a dir, de rugositat, també són utilitzades en aquest model. Aquest model $k - \varepsilon$ és molt usat en aplicacions industrials, degut a la seva bona convergència i a la poca memòria que necessita. A més, també és adequat per resoldre problemes amb geometries complicades, com és el nostre cas.

Cal destacar que per a qualsevol problema amb flux hidràulic, ja sigui laminar o turbulent, el cost computacional és molt elevat. Per obtenir resultats precisos calen mallats relativament fins, i en aquest fet s'hi suma l'existència de moltes més variables que cal resoldre. Per aquest motiu els programes solen tardar varies hores o dies per a desenvolupar models en tres dimensions. Així doncs, un dels nostres objectius és utilitzar una mida de malla el més fina possible, que permeti un cost computacional assequible i sense perdre cap detall de les característiques i comportament del fluid.

En el nostre cas, com veurem en els següents capítols, els canvis de velocitats del fluid són molt reduïts en la direcció tangencial a la paret, però canvien molt més ràpidament en la direcció normal. Per això, a l'hora de definir la malla, utilitzarem un mallat anomenat de contorn. El que fa aquest mallat és introduir-nos petits rectangles en 2D o petits prismes triangulars en 3D en els contorns més pròxims a les parets (Figura 10). Això ens permet calcular amb precisió, la velocitat del flux en la direcció normal al contorn, reduint el nombre de punts de càlcul en la direcció tangencial al contorn.

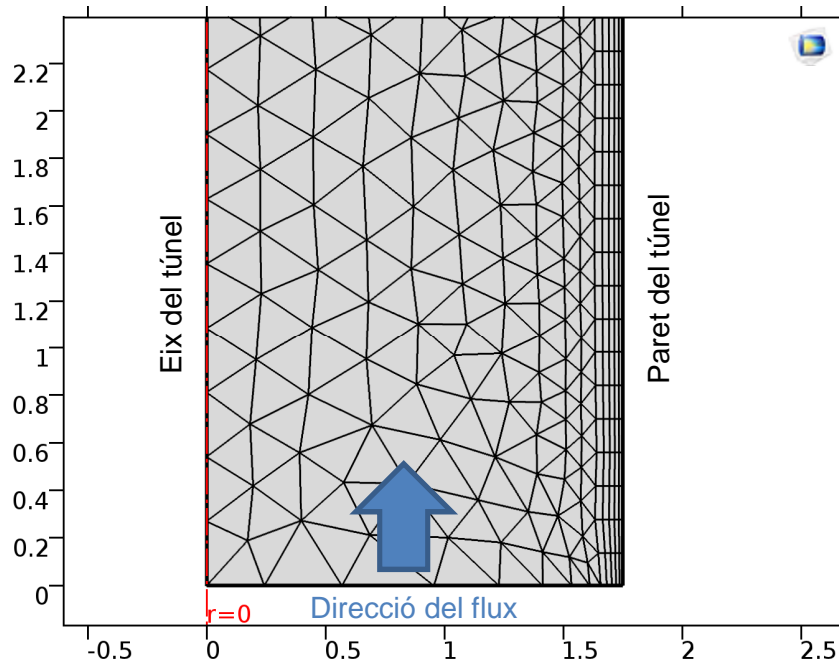


Figura 10: Malla utilitzada en els nostres models 2D axisimètric.

1.2.2 MODEL ESTÀNDARD K- ϵ

El model estàndard k- ϵ (Launder i Spalding 1972) és un model que permet determinar la velocitat turbulenta i les escales de longitud de manera independent utilitzant únicament dues equacions separades: la de transport per l'energia cinètica turbulenta (k) i la de dissipació de l'energia cinètica turbulenta (ϵ).

Aquest és el model turbulent semi-empíric que ha estat més utilitzat en els últims anys per realitzar càlculs de fluxos en enginyeria. La robustesa, el reduït temps de càlcul i l'exactitud per a una àmplia gamma de fluxos turbulents, n'explica el seu ampli i estès ús.

El model k- ϵ i tots els altres models RANS estan basats en la hipòtesis de viscositat de remolí isotròpica de Boussinesq, que presenta dificultats en fluxos amb remolins i fluxos amb grans variacions dels esforços tallants que afecten l'estructura de la turbulència.

1.3 MOTIVACIÓ

Degut a l'augment de la demanda energètica mundial amb baix impacte mediambiental i a l'abastiment d'aigua per a la població, són cada vegada més necessàries infraestructures de túnels hidràulics i hidroelèctrics.

Gràcies a l'automatització en els processos d'excavació i construcció de túnels, actualment aquestes obres subterrànies són cada vegada més freqüents arreu del món.

Així doncs, les pèrdues de càrrega en els túnels hidràulics han estat objecte d'estudi en els darrers anys. Fins ara, però, aquests estudis s'han centrat en les pèrdues degudes a la fricció de l'aigua amb les parets sense analitzar-ne altres elements presents en les dovelles. En l'actualitat, les juntes entre dovelles es segellen o no depenent del projecte, però sense cap fonament.

Donades aquestes circumstàncies, esdevé interessant estudiar l'afectació de les juntes i els orificis per a l'erector, en les pèrdues de pressió d'aigua en túnels hidràulics revestits amb dovelles.

2 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest Treball Final de Màster és entendre i explicar les pèrdues de càrrega generades en túnels hidràulics degudes a les juntes longitudinals i circumferencials entre segments i als orificis per a l'erector.

En relació a l'objectiu principal i com a conseqüència dels processos aplicats durant el treball, es deriven els següents objectius concrets:

- Crear un model 2D axisimètric inicial.
- Realitzar un model 2D amb una junta circumferencial.
- Crear un model 3D sense cap element (anomenat cas base).
- Crear un model 3D amb la geometria de les dovelles (incloent juntes longitudinals, circumferencials i orificis per a l'erector).
- Analitzar i interpretar els resultats obtinguts.
- Formular una equació per estimar les pèrdues de càrrega en funció de l'amplada de les juntes, longitud de l'anell, diàmetre del túnel i velocitat del flux.
- Aplicar la formulació en un cas pràctic real.

Per dur a terme tots aquests objectius s'han utilitzat els següents *softwares* informàtics: Comsol Multiphysics, Eureka i Excel.

3 METODOLOGIA

La metodologia utilitzada en aquest treball es basa en:

- 3.1. Definició del **problema**.
- 3.2. Introducció a **Comsol Multiphysics** (mòdul CFD).
- 3.3. Definició d'un **model previ 2D axisimètric** per tal d'obtenir un perfil de velocitats estacionàries.
- 3.4. Modelització d'un **cas base** per obtenir les pèrdues generades per fricció de les parets amb el fluid.
- 3.5. Definició d'un **model 2D amb una junta circumferencial** per veure l'afectació que té en la pèrdua de càrrega.
- 3.6. Creació d'un **model 3D** amb diferents elements (junts circumferencials i longitudinals i orificis per a l'erector).
- 3.7. Procediment d'**anàlisi de resultats**.
- 3.8. **Formulació**.
- 3.9. Aplicació d'un **cas pràctic** real.

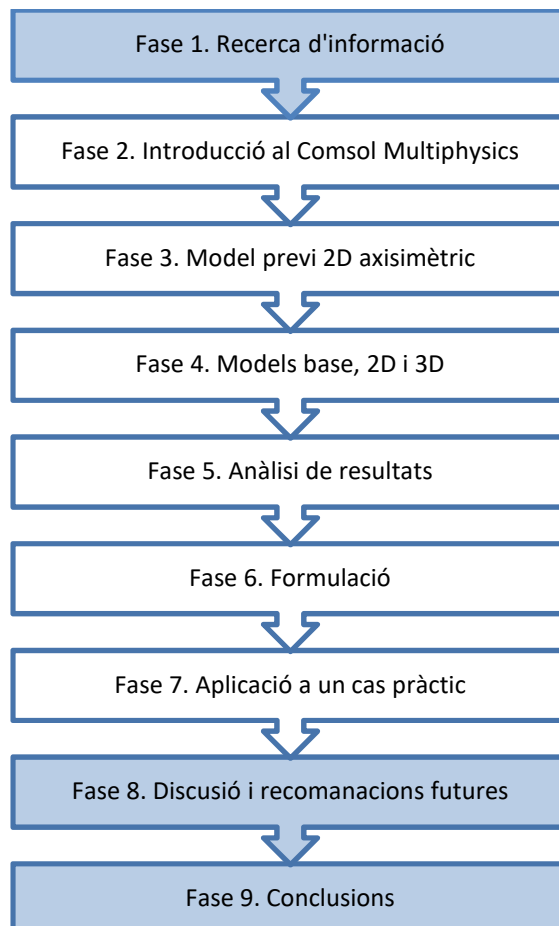


Figura 11: Diagrama de tasques realitzades en el treball per tal d'assolir els objectius.

3.1 Definició del problema

El problema plantejat en aquest treball es mostra en la Figura 12. Consta d'una columna d'aigua de 60m i un túnel per on es canalitza. Les condicions de contorn imposades es mostren de color verd per a la velocitat i taronja per a la pressió. El diàmetre i la longitud del túnel seran variables.

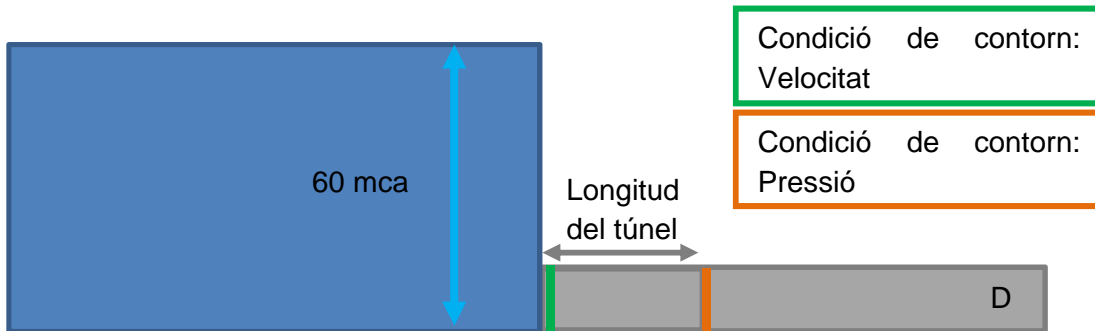


Figura 12: Definició de les condicions de contorn en el model.

El nostre model es va definir mitjançant dues condicions de contorn que són la velocitat i la pressió.

- La **velocitat** (v) a l'entrada del túnel. Es van analitzar 4 velocitats diferents:
 - $v = 0.5\text{m/s}$
 - $v = 2.9\text{m/s}$
 - $v = 4.5\text{m/s}$
 - $v = 6\text{m/s}$
- La **pressió** (P) de sortida es va fixar en 6 bars (equivalents a 6×10^5 Pa o 60mca, tal i com es veu en la Figura 12).

Els paràmetres es van considerar constants/fixes són:

- Paràmetres característics del fluid: el fluid amb el que es van analitzar els diferents casos va ser l'aigua, considerant-la com a fluid incompressible i a temperatura de referència 293.15K.
- Fricció: la fricció de les parets es va definir com 0.025mm (Sánchez-Juny 2005), equivalent a un $n=0.013$. Aquest valor de fricció tant baix és degut a què les dovelles són elaborades en fàbriques, tenen les dosificacions de formigó, temps de curat i vibracions adients, i passen uns controls de qualitat molt exigents per poder assolir les toleràncies exigides.
- Pendent: en el nostre estudi es va considerar un pendent nul, de manera que el nostre model va ser completament pla/horitzontal, sense cap grau d'inclinació.

3.2 Cmsol Multiphysics

Cmsol Multiphysics és un software d'anàlisi i resolució a partir d'elements finits per a diferents aplicacions físiques i d'enginyeria, especialment per a fenòmens acoblats (multi físics). Aquest programa disposa de diferents mòduls específics, i en aquest treball es va emprar el mòdul CFD. Aquest serveix per realitzar simulacions avançades de fluids, com poden ser modelitzar fluxos turbulents i laminars en una o múltiples fases. La versió del software amb la que vàrem realitzar els models va ser la 5.2a.

3.3 Definició d'un model previ: 2D axisimètric

En aquest estudi vam realitzar un model 2D axisimètric per a cada cas estudiat. Aquest model ens va permetre obtenir un perfil de velocitats estacionàries que vam utilitzar com a *input* per als nostres models 2D i 3D. D'aquesta manera, preteníem optimitzar els nostres models, reduint les seves dimensions i el temps de càlcul.

3.3.1 GEOMETRIA I MALLAT

La geometria del model era un rectangle de longitud 250 m i d'amplada 1.75m, 3m o 4.5m (que corresponia al radi del túnel, equivalent a diàmetre 3.5m, 6m o 9m, respectivament).

La longitud de 250m es va considerar suficient per tal d'arribar a la velocitat estacionària, com es podrà veure en el capítol de resultats.

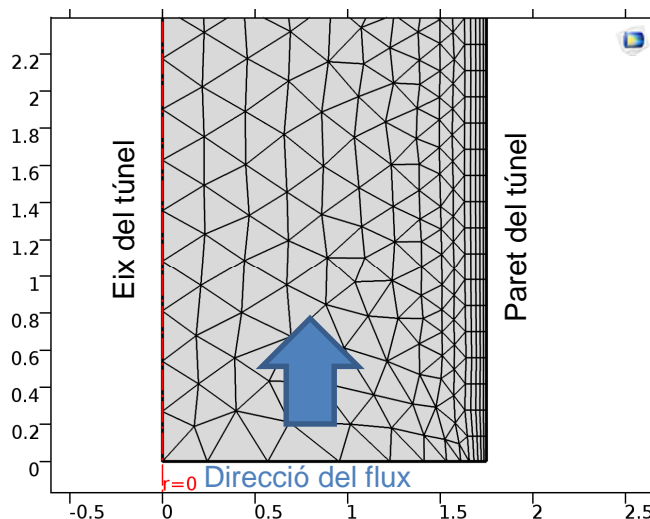


Figura 13: Geometria i malla del model 2D axisimètric.

La malla utilitzada va ser desestructurada (des de l'eix i fins a la proximitat del contorn de la paret), però en les proximitats a la paret la vam definir de manera estructurada (contorn) amb l'objectiu de detectar millor els fenòmens de rugositat de la paret.

3.3.2 CONDICIONS DE CONTORN I PARÀMETRES

Les condicions de contorn va ser les descrites en el capítol 3.1.

Alguns paràmetres del model 2D axisimètric es van anar variant de la següent manera:

- Diàmetre: el diàmetre del túnel va ser de 3.5m, 6m o 9m.
- Velocitat: la velocitat d'entrada va ser de 0.5m/s, 2.9m/s, 4.5m/s o 6m/s.

Per tal de mantenir les velocitats d'entrada dels models constants a l'hora de variar el diàmetre, vam haver de modificar els cabals d'entrada segons va convenir, obtenint els cabals d'entrada que es mostren en la Taula 1.

Taula 1: Cabals definits segons el diàmetre i la velocitat.

		Diàmetre (m)		
		3.5	6.0	9.0
Velocitat (m/s)		Cabal (m ³ /s)		
		0.5	4.8	14.1
2.9	28.0	82.0	185.0	
4.5	43.3	127.2	286.1	
6.0	57.7	169.5	382.0	

Un total de 12 models 2D axisimètrics van ser calculats i interpretats en l'apartat de resultats (4.1).

També vàrem estudiar com afectava la variació de la pressió en les pèrdues de càrrega. Per fer-ho vam analitzar aquest efecte amb una sola velocitat (2.9m/s) i diàmetre (3.5m), però variant la pressió d'estudi en 2, 6 i 10bars.

3.4 Cas Base

Per tal de diferenciar entre les pèrdues de càrrega degudes a la fricció i les generades per les juntes i els orificis per a l'educte, va ser necessari dissenyar un model anomenat **cas base**. Aquest cas base no presentava cap element, és a dir, era un rectangle (en el model 2D) i un mig cilindre (en el 3D). Per tant, la circulació de l'aigua només estava afectada per la rugositat de la paret (fricció). Cal destacar que es va generar un cas base per a cada una de les condicions estudiades en els models 2D i 3D obtenint un total de 12 casos base (Taula 2).

Taula 2: Combinacions realitzades per als casos base.

		Velocitat (m/s)			
		0.5	2.9	4.5	6.0
Diàmetre (m)	3.5	✓	✓	✓	✓
	6.0	✓	✓	✓	✓
	9.0	✓	✓	✓	✓
Casos base totals		12			

3.5 Definició del Model 2D

El següent model calculat va ser un model 2D reduït amb una sola junta circumferencial. Aquest es va fer per veure l'afectació de les pèrdues de càrrega produïdes per la junta.

3.5.1 GEOMETRIA I MALLAT

El model era un rectangle de dimensions 0.2m de longitud i d'amplada 1.75m (radi del túnel). Les mides de la junta eren: llargada 52mm i amplada de 10mm, 20mm o 30mm. A continuació, a mode d'exemple, es mostren unes imatges de la geometria pel cas més petit (10mm d'amplada de junta) i el més gran (30mm d'amplada de junta) juntament amb les seves respectives malles. Cal destacar que la part més propera a la junta es va refinar més, tal i com es mostra en la Figura 14.

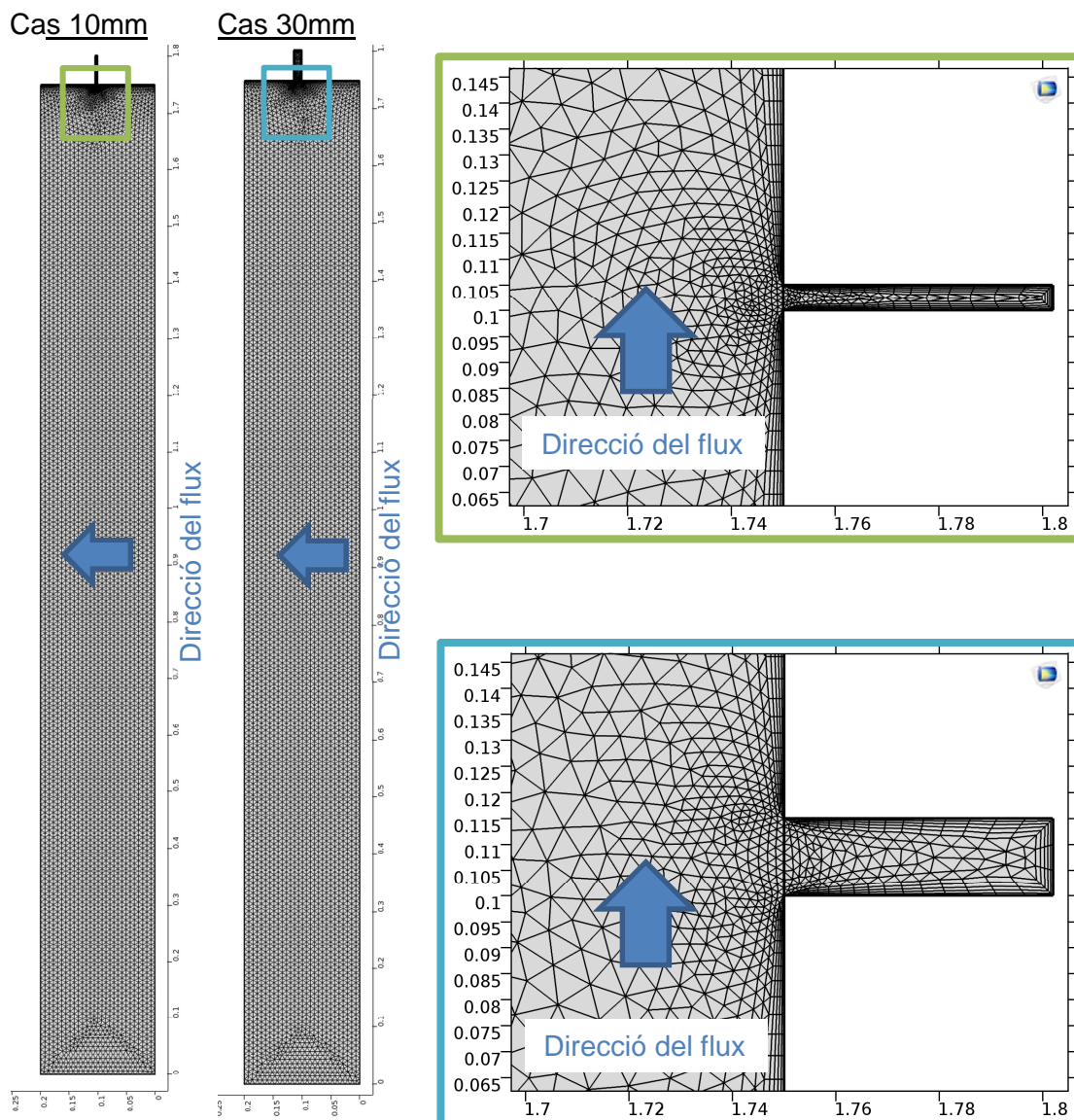


Figura 14: Geometria i malles del model 2D per a amplades de junta de 10mm i 30mm.

3.5.2 CONDICIONS DE CONTORN I PARÀMETRES

Les condicions de contorn i paràmetres utilitzats van ser les mateixes descrites prèviament en l'apartat 3.1, exceptuant:

- El diàmetre, que en aquest model 2D va ser considerat un paràmetre fix ($D=3\text{m}$ equivalent a radi de $r=1.75\text{m}$).
- L'amplada de les juntes, amb valors de 10mm, 20mm o 30mm.
- Les velocitats van ser considerades com els *outputs* del model 2D axisimètric corresponent, per a cada velocitat calculada (veure esquema de la Figura 15).

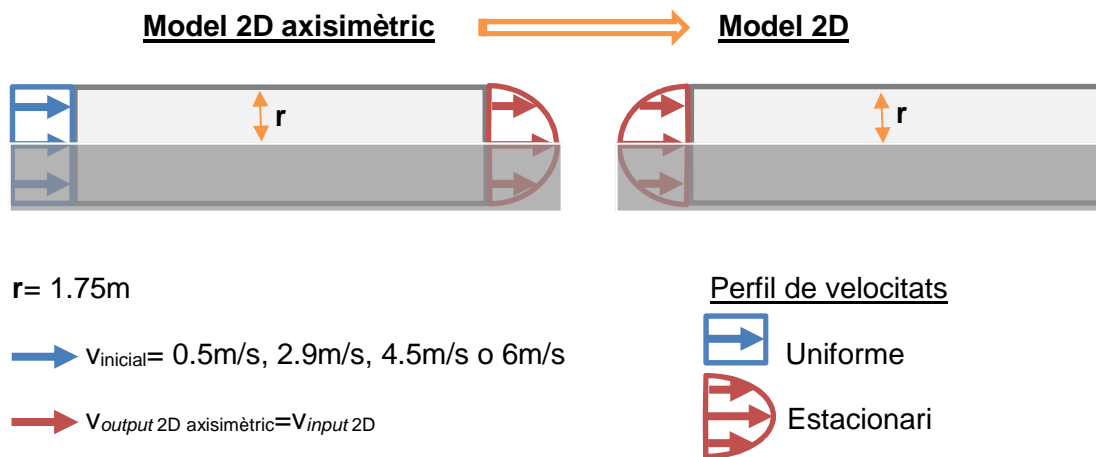


Figura 15: Esquema de les velocitats del model 2D axisimètric i 2D.

3.6 Definició del model 3D

3.6.1 GEOMETRIA I MALLAT

El model 3D es va representar com a mig cilindre de longitud 30m i diàmetre $D=3.5\text{m}$, 6m o 9m, per tal de reduir-ne el temps de càlcul (veure Figura 16). Per tant, vam considerar la simetria del túnel.

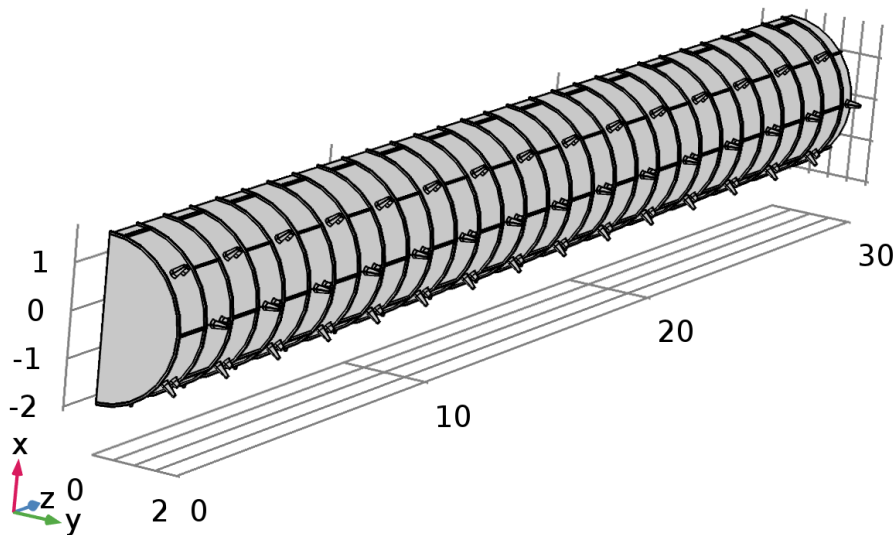


Figura 16: Geometria del model 3D de diàmetre 3.5m i longitud d'anells d'1m.

Tal i com es veu en la Figura 16 aquest model 3D presentava diferents elements:

- Anells formats per dovelles:
 - o Anells imparells: formats per 2 dovelles senceres i 2 dovelles parcials.
 - o Anells parells: formats per 1 dovella sencera i 2 dovelles parcials.

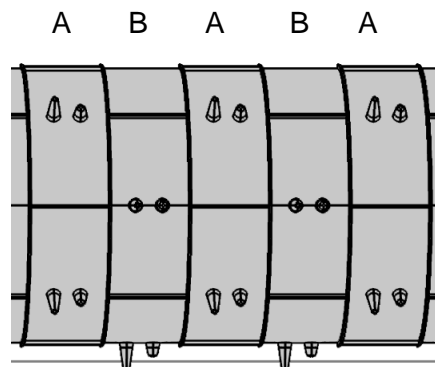


Figura 17: Segment d'un model 3D amb 5 anells: 3 imparells (A) i 2 parells (B).

- Juntes:
 - o Juntes circumferencials entre anells
 - o Juntes longitudinals entre dovelles

- Orificis per a l'erector:
 - o Orifici llarg: 1 per dovella
 - o Orifici curt: 1 per dovella

Taula 3: Elements presents en els anells imparells i parells.

	Número de dovelles			Número de juntes	Número d'orificis per a l'erector	
	Senceres	Mitges	Parcials	Longitudinals	Llargs	Curts
Anells Imparells	2	0	2	3	2	2
Anells Parells	1	1	1	2	1.5	1.5

Considerant dovelles mitges aquelles que presentaven la meitat de cada orifici i parcials totes les que no són ni senceres ni mitges.

La malla escollida pel model 3D va ser optimitzada pel càlcul hidràulic. La mida màxima de l'element va ser definida en 0.177m, i la mida mínima en 0.003m. En la següent imatge es mostra la geometria del mallat general i una imatge en detall per ensenyar com es van refinar les zones pròximes amb geometria més complexa, com són els orificis, les juntes i el contorn de la paret.

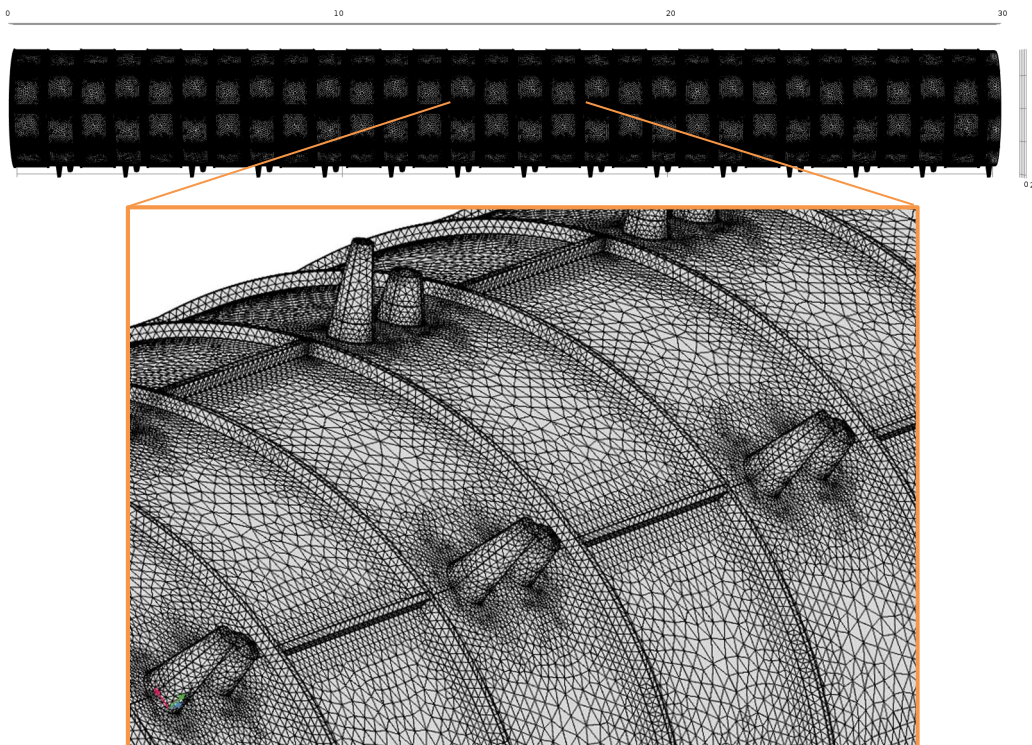


Figura 18: Mallat general (part superior) i detallat (part inferior) del túnel de 30m.

3.6.2 CONDICIONS DE CONTORN I PARÀMETRES

Per dur-ho a terme, vam utilitzar les mateixes condicions de contorn prèviament descrites en l'apartat 3.1, exceptuant les velocitats que van ser considerades com els *outputs* del model 2D axisimètric corresponent per a cada velocitat i diàmetre estudiat (veure esquema de la Figura 19).

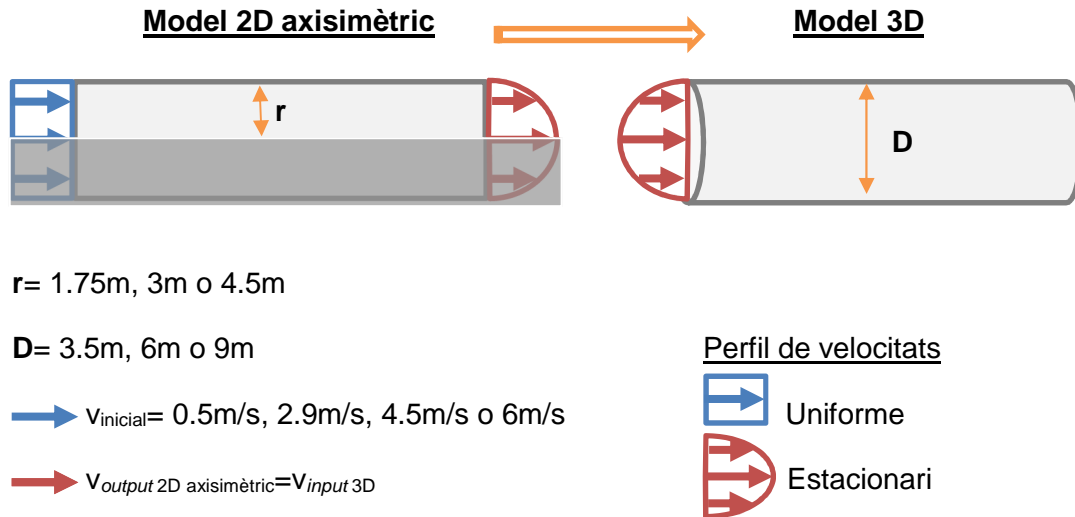


Figura 19: Esquema de les velocitats del model 2D axisimètric i 3D.

Tanmateix, vam utilitzar els mateixos paràmetres prèviament explicats en l'apartat 3.1, exceptuant les dimensions dels nous elements.

Cal distingir per un costat, que alguns paràmetres del model 3D van ser considerats constants:

- Dimensions de les juntes circumferencials i longitudinals. Cada anell presentava diferent nombre de juntes longitudinals, segons si era parell o imparell, i una junta circumferencial a cada costat.

Les dimensions de la junta circumferencial depenien de l'amplada de la junta (si és de 13mm o 26mm) i el diàmetre del túnel. En canvi l'alçada/profunditat de la junta era sempre fix en 52mm.

Per contra, les dimensions de la junta longitudinal no només depenien de l'amplada de la junta, sinó que en aquest cas també depenien de la longitud de l'anell. L'alçada/profunditat de la junta sempre era constant a 52mm.

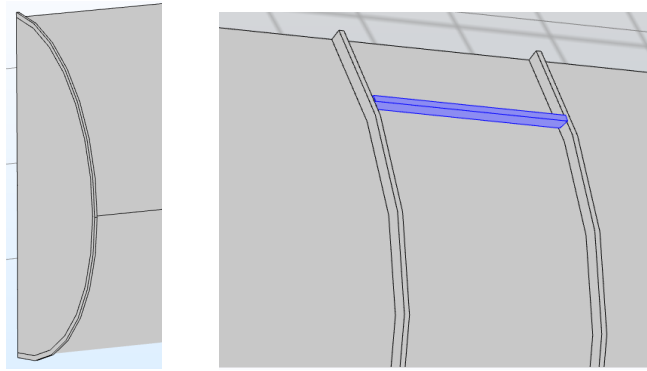


Figura 20: Representació d'una junta circumferencial (esquerra) i una longitudinal (dreta i en color blau).

- Dimensions dels orificis per a l'erector. Cada anell presenta 2 tipus d'orificis: llargs i curts. Les dimensions de cada un d'ells es defineixen en la Figura 21.

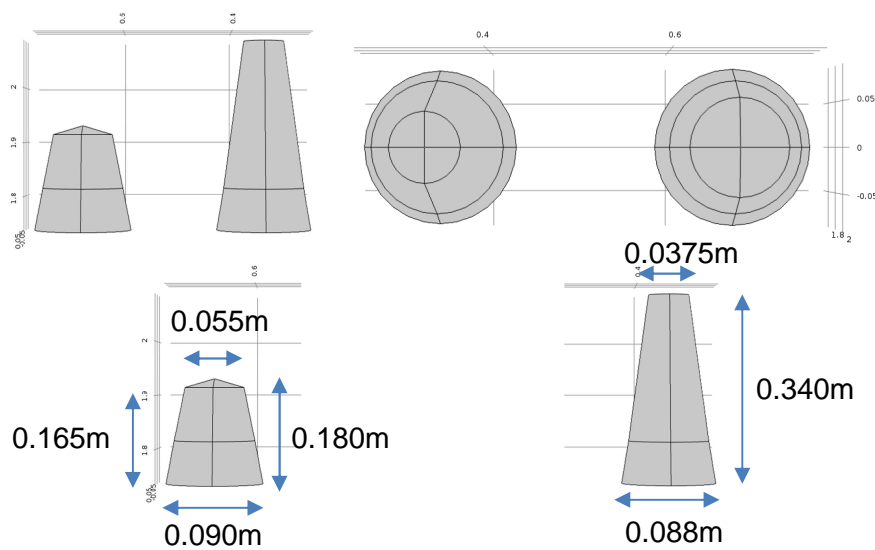


Figura 21: Representació d'un orifici curt (esquerre) i un de llarg (dreta).

- Posició dels anells. Hi ha dues posicions dels anells: una amb el punt mig de la dovella clau a 0° , i una altra amb una rotació de 40° respecte l'anterior.

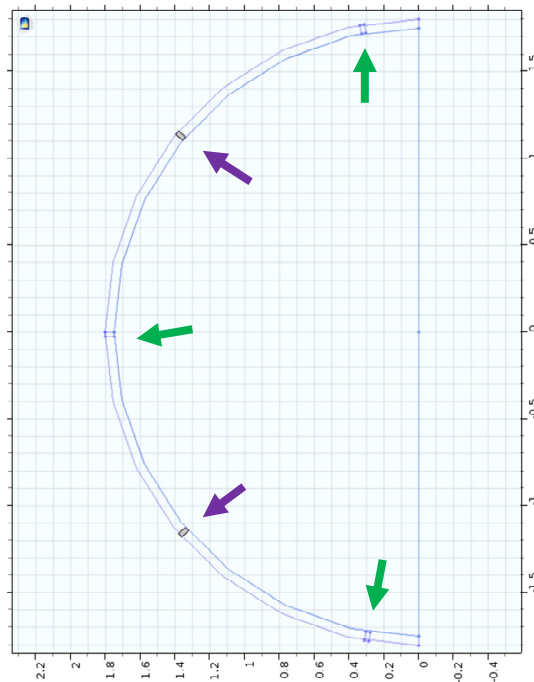


Figura 22: Juntes longitudinals vistes en secció transversal. En color lila es mostren les 2 juntes de l'anell par i senyalades en verds les 3 juntes longitudinals de l'anell impari.

Mentre que d'altra banda, n'hi ha d'altres de variables:

- Longitud de l'anell. La longitud dels anells era de 1m, 1.2m, 1.4m, 1.6m o 1.8m. En la Taula 4 s'observen els estudis realitzats.

Taula 4: Longitud de l'anell estudiada segons el diàmetre del túnel.

		Longitud de l'anell (m)				
		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
Diàmetre (m)	3.5	✓	✓	✓	✗	✗
	6.0	✗	✓	✓	✓	✗
	9.0	✗	✗	✓	✓	✓

Les cel·les vermelles i marcades amb una creu corresponen a situacions no factibles i per tant, no són objecte d'aquest estudi. Per exemple, un túnel de diàmetre 3.5m mai tindrà una longitud d'anell de 1.8m ja que generaria molts problemes a l'erector per poder-lo col·locar. De la mateixa manera, un túnel de diàmetre 9m mai tindrà una longitud d'anell d'1m ja que aquest fet allargaria molt el temps de construcció del túnel.

- Amplada de les juntes. L'amplada de les juntes era de 13mm o 26mm.

Un total de 72 models 3D van ser calculats i analitzats. Els valors obtinguts es mostren i s'estudien en els apartats de resultats (4.3).

3.7 Formulació

La formulació es va obtenir a partir d'un programa anomenat Eureka. Aquest és un software que determina equacions matemàtiques basades en el conjunt de dades que se li proporcionen.

Aquest programa ens va donar com a *outputs* diverses equacions amb diferents graus de precisió, segons la complexitat d'aquestes. La nostra tasca va ser triar d'aquest ventall d'equacions la que s'adaptés millor als nostres valors, però sense que aquesta fos extremament complexa.

3.8 Aplicació d'un cas pràctic

El model que vam analitzar en aquest treball final de màster va ser inspirat en el projecte hidroelèctric de Kargi. Aquest era un projecte de 11.7km de longitud realitzat amb una tuneladora de doble escut TBM, situat a la ciutat de Kargi, a Turquia. El cabal d'aigua previst en el projecte era de $167\text{m}^3/\text{s}$. La màquina tenia un diàmetre d'excavació de 9880 mm, diàmetre intern de 8700mm i diàmetre extern de 9500mm. L'anell era universal 5+1 de longitud 1.5m.

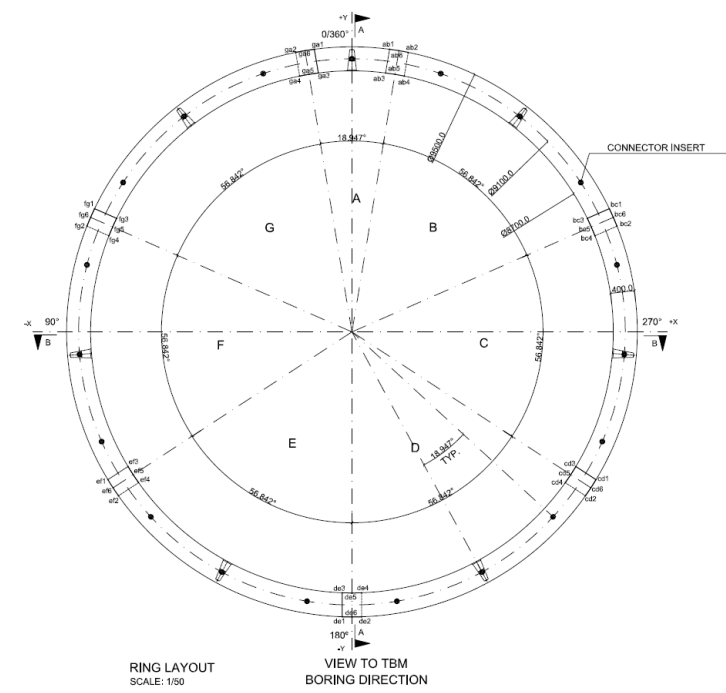


Figura 23: Detalls de l'anell de Kargi.

El salt hidràulic d'aquest cas real és de 80m d'aigua.

Amb les dades descrites d'aquest cas real, vam analitzar dues hipòtesis:

- Cas base: pèrdues de càrrega per fricció del túnel, avaluades a partir de la fórmula de Manning.

- Cas juntes: pèrdues de càrrega per fricció i juntes en les dovelles estimades a partir de l'Equació 4, deduïda a partir dels resultats obtinguts en els models 3D.

Manning:

Les equacions de Manning (1890) es solen utilitzar en canals, però també es poden utilitzar en canonades i túnels de secció circular i amb secció plena. Un dels inconvenients d'aquesta fórmula és que tan sols té en compte un coeficient de rugositat (n) obtingut empíricament i no té en compte les variacions de la viscositat amb la temperatura. En el nostre treball el coeficient de rugositat (n) és de 0.013 (formigó llis).

Equació 2:

$$h = 10.3 * n^2 * \left(\frac{Q^2}{D^{5.33}} \right) * L$$

On, (h) són les pèrdues de càrrega lineals, (n) és el coeficient de rugositat, (Q) el cabal en m^3/s , (D) és el diàmetre en m i (L) la longitud del túnel en m.

Les pèrdues de pressió generades per la presència de juntes en els anells van ser estimades a partir de la fórmula obtinguda amb els resultats (Equació 4).

Un cop calculades les pèrdues de pressions i conegut el cas real que volíem estudiar, es va determinar la potència i la energia restant que podia generar la central hidroelèctrica. Per fer-ho vàrem emprar la fórmula de la potència hidràulica definida a continuació:

Equació 3:

$$W_{neta} = Q\gamma\Delta H$$

On, el pes específic del fluid (γ) és en N/m^3 , el cabal (Q) en m^3/s i l'energia (ΔH) en mca, aleshores la potència es dona en watts (W).

ΔH era la diferència entre la càrrega d'aigua en el punt inicial del túnel i la final. El rendiment de la maquinària hidroelèctrica era considerat del 75%.

Un cop obtinguda la potència, es multiplicava per les hores anuals de funcionament, per tal d'obtenir l'energia anual que podia produir aquella central hidroelèctrica. En aquest cas vam considerar un funcionament del 95% de les hores anuals (8322 hores).

Seguidament, es multiplicà l'energia estimada pel preu del kWh (0.15€/kWh). Això ens permetia estimar els guanys que s'obtidrien anualment. Aquest mateix procediment es va emprar tant per a l'energia generada en el cas base, com en el cas amb juntes. Un cop obtinguts els resultats, es va estudiar la diferència de preu que tenien, per veure si era rentable o no econòmicament segellar les juntes.

Finalment es proposà una justificació de preus per analitzar el cost total que suposaria segellar les juntes al llarg del túnel.

4 RESULTATS

4.1 Resultats del model 2D axisimètric

Els resultats obtinguts pel model 2D axisimètric es descriuen a continuació.

Les velocitats obtingudes en l'eix ens mostren un augment d'entre el 8% i el 10%, en tan sols 100m recorreguts respecte la velocitat d'entrada. Observem que a partir dels 100m la velocitat ja es pot considerar estacionària per a $D=3.5\text{m}$, tot i les oscil·lacions observades. Aquestes oscil·lacions són degudes a les turbulències generades en aquest model. Per a $D=6\text{m}$ i 9m es necessita més distància per arribar a la velocitat estacionària. Els resultats per a diàmetres 6m i 9m es mostren en els ANNEXES.

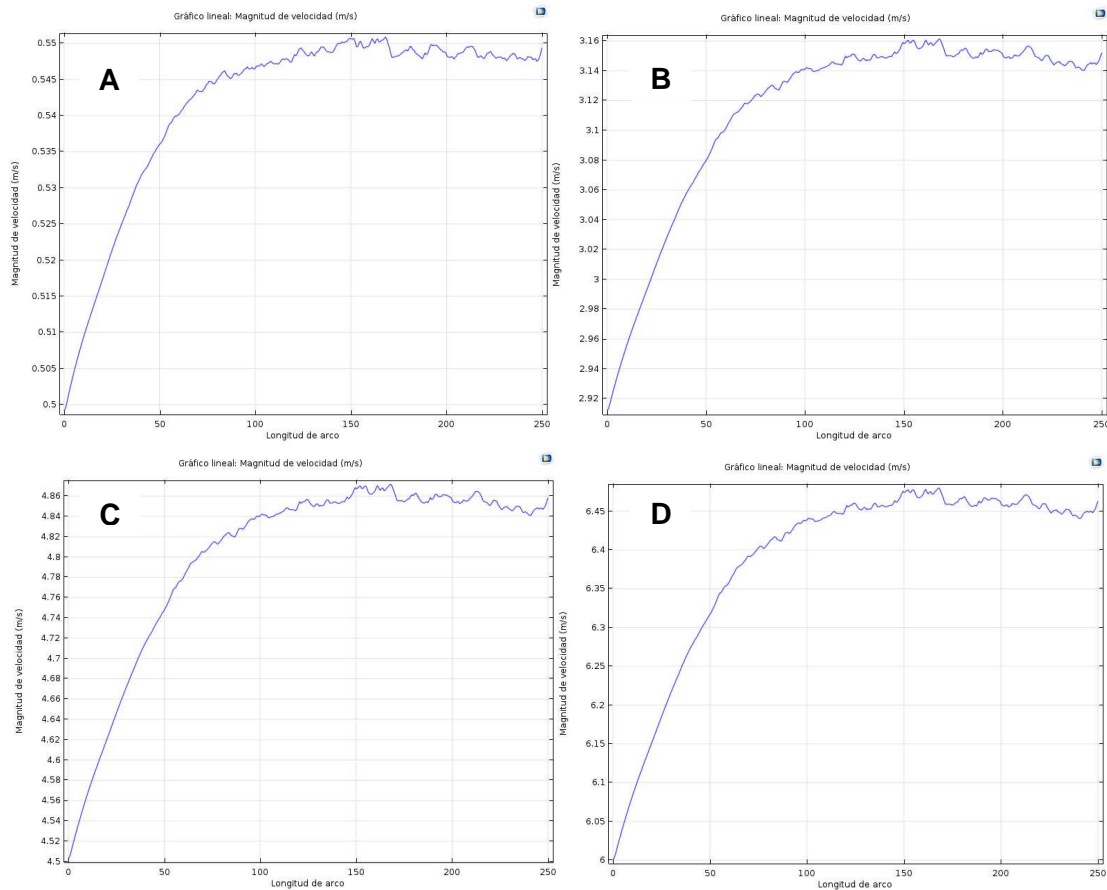


Figura 24: Velocitat (m/s) en l'eix respecte la longitud del túnel pel cas 2D axisimètric de diàmetre 3.5m . Velocitat d'entrada 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

Cal destacar que els valors obtinguts de velocitats estacionàries van ser els utilitzats com a *input* per als models 2D i 3D. En la Figura 25, es mostren dos talls transversals (a 0 i a 250m del túnel) amb els respectius perfils de velocitats.

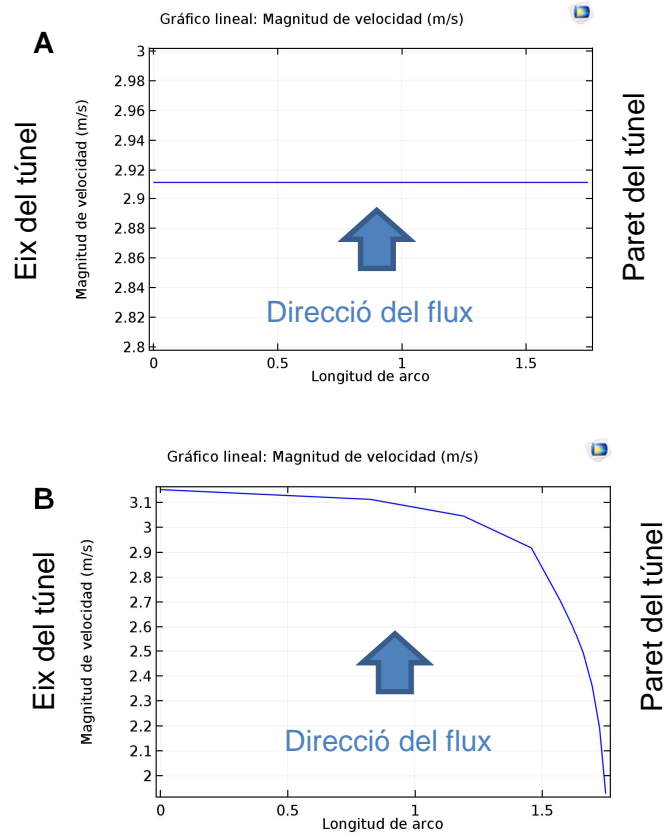


Figura 25: Perfil de velocitats inicials (A) i finals (B) pel cas de velocitat 2.9m i D=3.5m.

Pel que fa als resultats obtinguts respecte les pressions, pels 4 casos amb diàmetre 3.5m, observem una tendència lineal molt clara. Obtenim uns valors de pèrdues de càrrega majors a mesura que la velocitat va augmentant, com s'observa en la següent Taula 5 i Figura 26.

Taula 5: Pèrdues de pressió segons la velocitat per a un D=3.5m.

	Velocitat (m/s)			
	0.5	2.9	4.5	6
Pèrdues (Pa)	0.0009	0.022	0.05	0.08

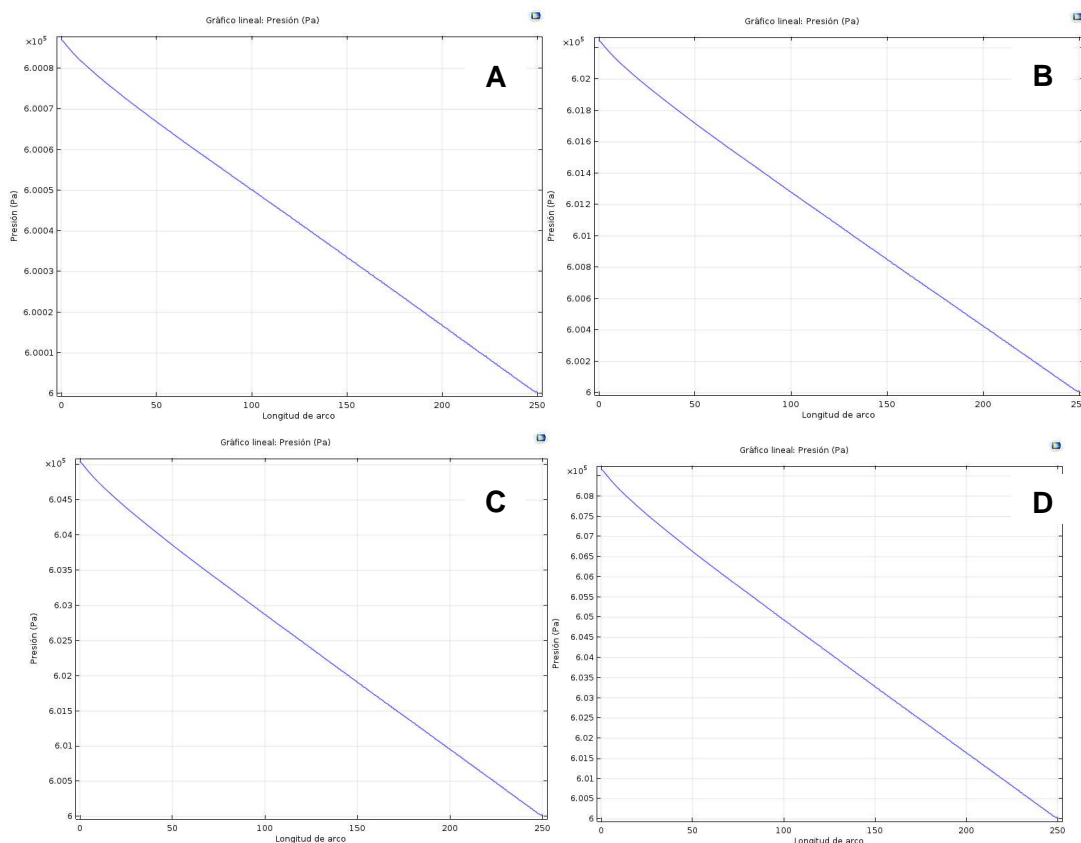


Figura 26: Pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del túnel pel cas base axisimètric 2D de diàmetre 3.5m. Velocitat d'entrada 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

Aquests resultats indiquen clarament que, com més velocitat tingui el nostre model 2D, més pèrdues es generaran. De la mateixa manera, hem pogut observar que per a diàmetres grans, es necessita més recorregut de túnel per arribar a velocitats estacionàries.

Els resultats obtinguts a diferents pressions, ens mostren que aquest paràmetre no influeix en les pèrdues de càrrega, ja que la diferència de pèrdues es manté sempre constant en 0.02 bars en els 250m de túnel (Taula 6).

Taula 6: Pèrdues de càrrega modificant la pressió del problema.

		Pressió (bars)		
		2.0	6.0	10.0
Pressió (bars)	Inicial	2.00	6.00	10.00
	Final	2.02	6.02	10.02
	Pèrdues	0.02	0.02	0.02

4.2 Resultats del model 2D amb una junta circumferencial

4.2.1 CAS BASE DEL MODEL 2D

Els valors obtinguts del cas base (sense junta longitudinal) en el model 2D amb diàmetre 3.5m, i amb les 4 diferents velocitats estudiades es mostren en la Taula 7.

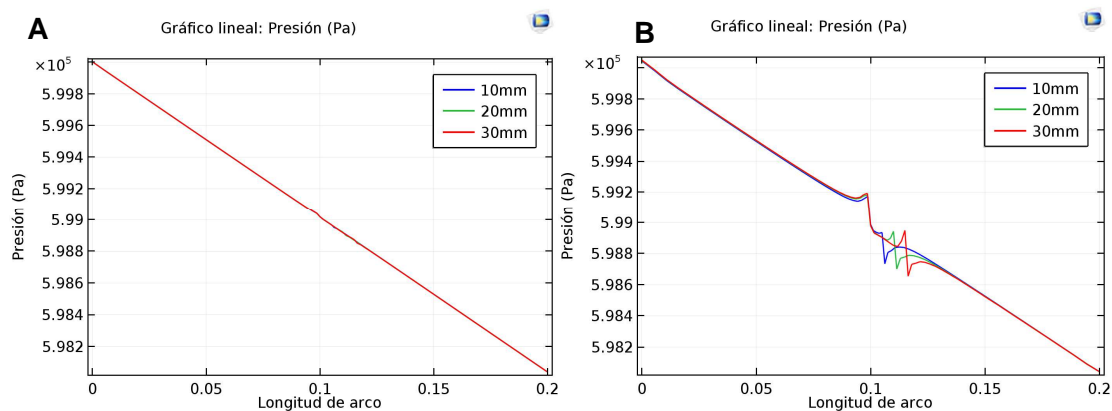
Taula 7: Valors obtinguts dels casos base del model 2D amb diferents velocitats.

Cas Base de D=3.5m	Velocitat a l'eix del túnel (m/s)		Pèrdues de càrrega a l'eix del túnel	
	<i>Input</i> 2D axisimètric	<i>Input</i> del 2D	(Pa)	(cm)
A	0.5	0.55	1962.6	20.01
B	2.9	3.15	1993.6	20.33
C	4.5	4.86	2027.0	20.67
D	6	6.45	2067.7	21.09

Observem que aquestes pèrdues de pressió són degudes a la rugositat de la paret. A més, aquest paràmetre de pressió ve determinat per la velocitat, per tant, a l'incrementar la velocitat, les pèrdues per fricció són cada cop majors. Per a velocitats de 0.5m/s obtenim 20.01cm de pèrdues de càrrega, mentre que per a velocitats de 6m/s les pèrdues són de 21.09cm en tan sols 30m de longitud.

4.2.2 MODEL 2D AMB JUNTA CIRCUMFERENCIAL

Els valors obtinguts pels models 2D amb una junta longitudinal es mostren en la Figura 27 per a velocitats de 0.5m/s, 2.9m/s, 4.5m/s i 6m/s. Els resultats ens indiquen que a velocitats baixes les pèrdues de càrrega degudes a la fricció i a la interacció entre l'aigua i la junta són molt petites, mentre que a l'augmentar la velocitat, aquestes pèrdues s'accentuen progressivament.



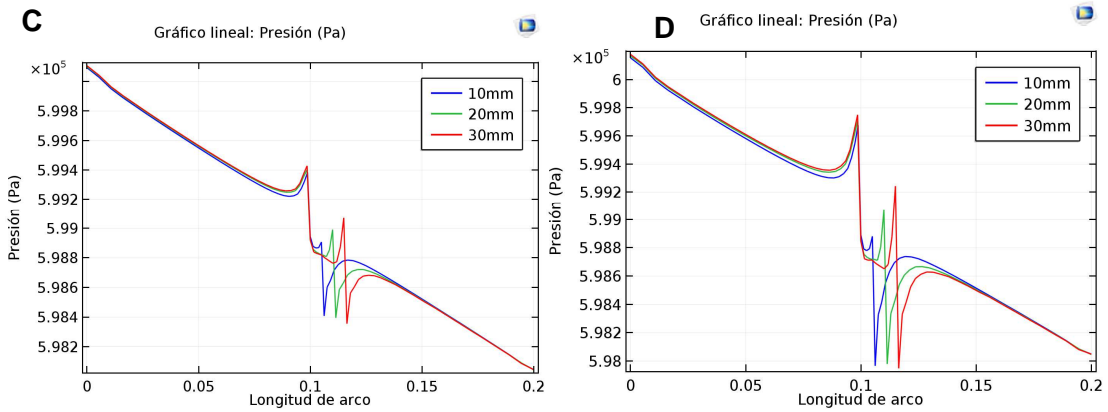


Figura 27: Pèrdues de càrrega per a velocitats de 0.5m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D). En diferents colors s'observen les diferents amplades de juntes: blau pel cas de 10mm, verd per 20mm i vermell per 30mm.

Així doncs, com més ample sigui la junta, més volum d'aigua hi queda estancada i, en conseqüència, les pèrdues de càrrega són cada cop majors. La gràfica (Figura 28) mostra les pèrdues de càrrega obtingudes a diferents velocitats (marcades en línies discontinues de diferents colors) i diverses amplades de junta, on es veu clarament la tendència descrita.

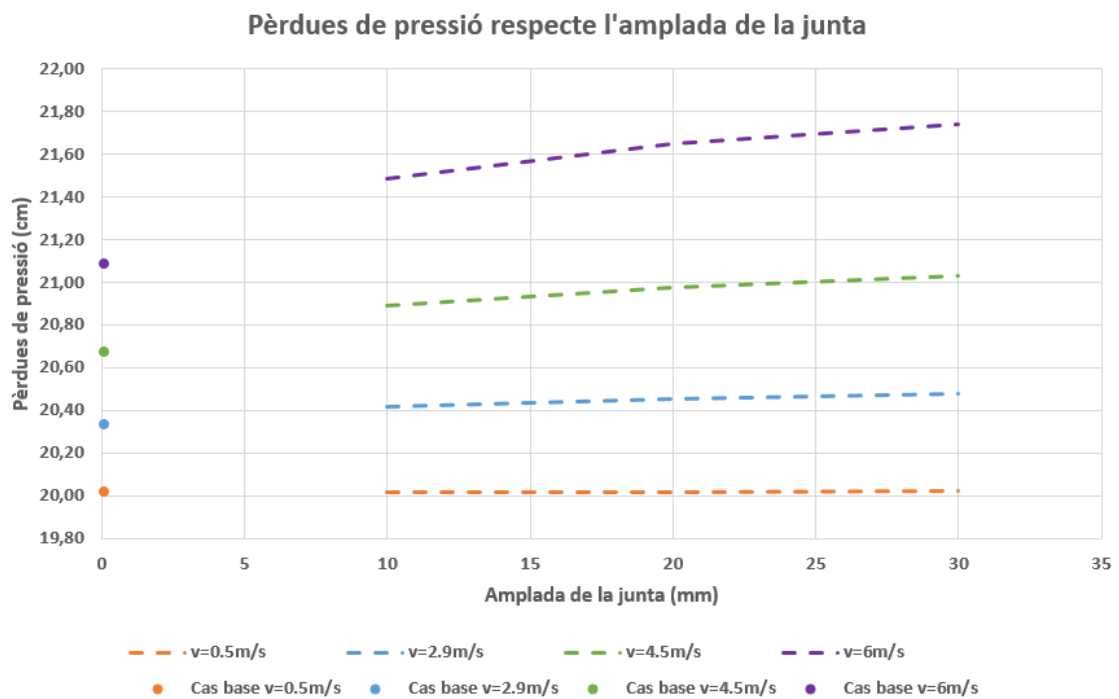


Figura 28: Pèrdues de càrrega per a velocitats de 0.5m/s, 2.9m/s, 4.5m/s i 6m/s.

Altrament aquesta figura també mostra pèrdues corresponents als casos base per a cada una de les quatre velocitats (representades amb punts). S'evidencia que a més velocitat aquesta pèrdua s'incrementa, com s'ha explicat en l'apartat anterior.

Numèricament, si comparem les pèrdues del cas base respecte de les dels casos amb junta, veiem com la pèrdua de pressió s'incrementa amb la velocitat, sent de 0.003cm pel cas de $v=0.5\text{m/s}$ i de 0.4cm en el cas de $v=6\text{ m/s}$, veure Taula 8.

Si a més d'això, ens fixem en la pèrdua de pressió deguda a la velocitat i a l'amplada de junta, veiem que per a velocitats baixes, aquestes no es veuen gaire afectades per l'amplada de junta. En canvi, per a velocitats altes ($v=6\text{m/s}$), la diferència de pressions entre amplades de 10mm i de 30mm és major, essent de 0.25cm (0.65cm-0.4cm).

Taula 8: Valors de pèrdues de càrrega en Pa pels model 2D base i amb junta circumferencial.

		Velocitat <i>input</i> 2D axisimètric (m/s)			
		0.5	2.9	4.5	6
	Cas Base	20.013	20.33	20.67	21.09
Amplada de junta (mm)	10	20.016	20.42	20.89	21.49
	20	20.017	20.45	20.98	21.65
	30	20.019	20.48	21.03	21.74
Diferència entre el cas base i l'amplada de junta corresponent					
Amplada de junta (mm)	10	0.003	0.09	0.22	0.40
	20	0.004	0.12	0.31	0.56
	30	0.005	0.15	0.36	0.65

Per tant, podem dir que la presència d'una junta circumferencial influeix en la pèrdua de càrrega en el model 2D, i que endemés, aquesta es veu incrementada a mesura que augmenta l'amplada de la junta i/o la velocitat.

4.3 Resultats del model 3D

Un total de 84 casos (12 dels quals base) han estat calculats en el model 3D. Les taules amb els resultats de cadascun d'ells es mostren en els ANNEXES. A continuació i a mode d'exemple, es descriuran els resultats d'un únic cas d'un model 3D i, seguidament es farà la comparació amb tots els resultats obtinguts de la resta de casos.

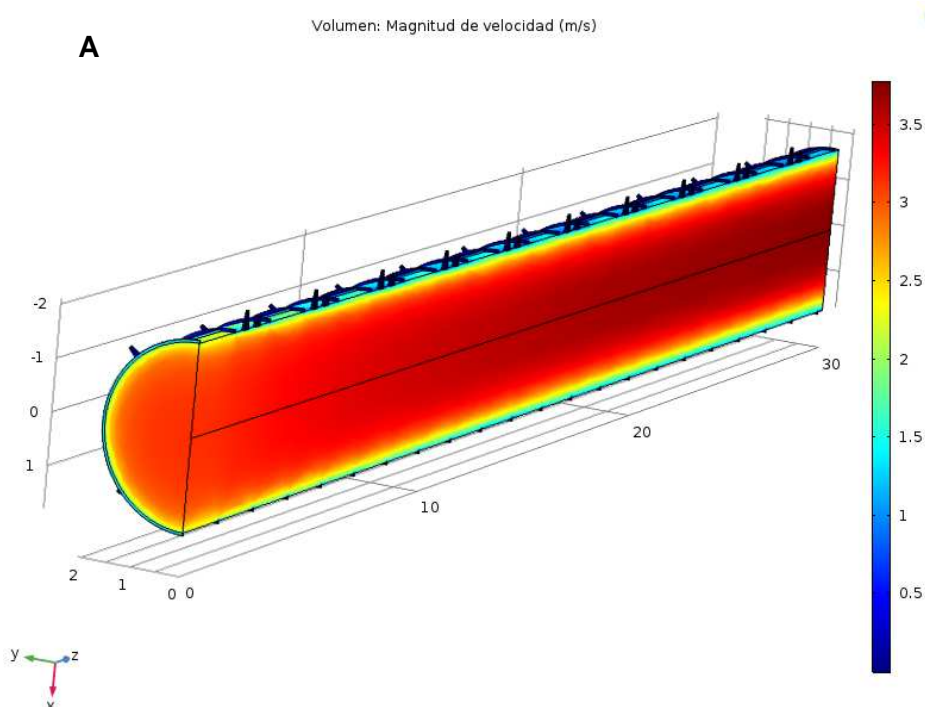
El cas que explicarem serà el cas número 42 (veure Taula 18 dels ANNEXES). A continuació es recorden alguns dels paràmetres més importants (veure Taula 9).

Taula 9: Paràmetres del cas número 42 del model 3D.

Cas	Velocitat a l'eix (m/s)		Diàmetre (m)	Longitud de l'anell (m)	Amplada de junta (mm)
	<i>Input</i> 2D axisimètric	<i>Output</i> del 2D axisimètric i <i>input</i> del 3D			
42	2.9	3.15	3.5	1.4	26

4.3.1 VELOCITATS

Les velocitats obtingudes al llarg dels 30 m de túnel es presenten en la Figura 29 A. En ella veiem un valor màxim de 3.15m/s a l'eix just a l'inici del túnel (0m). I, aigües avall del model, les velocitats van incrementant fins a arribar a una velocitat màxima de 3.75m/s a l'eix al final del túnel (30m).



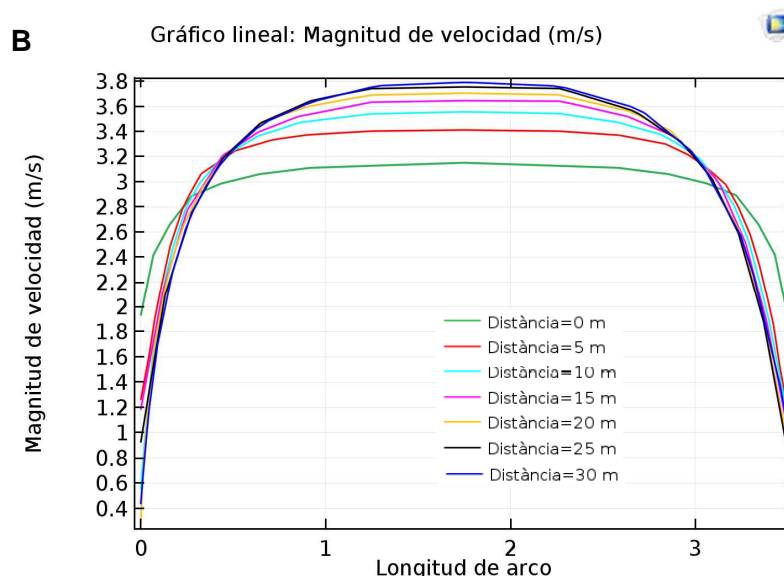


Figura 29: **A:** Velocitats al llarg del túnel. **B:** Perfil de velocitats cada 5m, des de l'inici (0m) fins al final (30m).

Tal i com mostra la Figura 29A, observem un augment de la velocitat en el centre del túnel a mesura que el fluid circula en ell. També es veu com inicialment (distància 0m, línia verda Figura 29B), les velocitats més pròximes a les parets del túnel són d'uns 2m/s aproximadament (valors deguts a la fricció del cas base). Per contra als 25-30m del túnel, la velocitat en les parets es redueix fins a 0.4m/s (línies negra i blava fosca Figura 29B), degut a la presència de juntes i orificis. Aquesta disminució de la velocitat en les parets també es veu reflectida en la Figura 30, on es fa palès que en els primers 10 m de túnel es produeix el canvi més bruscat de velocitat en les parets (ja que passa de 2m/s a 0.5m/s). En canvi, dels 10m als 30m, la velocitat en els contorns es manté més o menys constant amb valors inferiors a 1m/s.

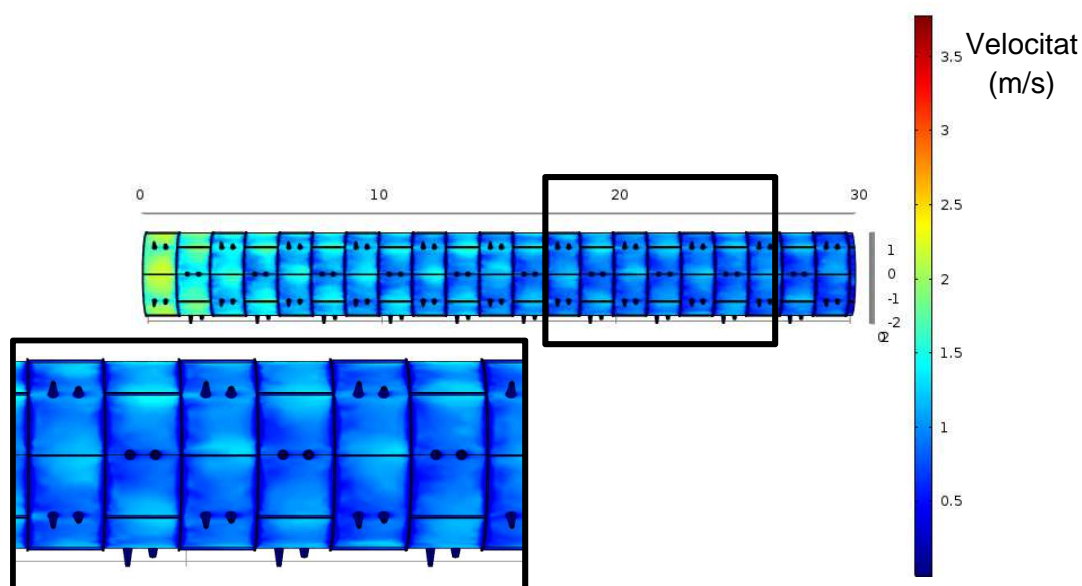


Figura 30: Velocitat en les parets del túnel. La imatge inferior mostra un zoom del túnel als 20m de llargada.

En la Figura 30, observem com en les parets les velocitats són molt petites. És més, si ens fixem en les juntes i en els inserts, aquestes velocitats encara són més inferiors.

Seguidament, ens centrarem en les velocitats dins dels inserts i de les juntes longitudinals i circumferencials.

La Figura 31 mostra una imatge dels últims 10m del túnel, on es detallen les velocitats en aquests elements. Cal destacar que hem modificat l'escala de velocitats on ara la velocitat màxima representada és de 0.5m/s (és a dir, en to grana s'han representat les velocitats iguals o superiors a 0.5m/s).

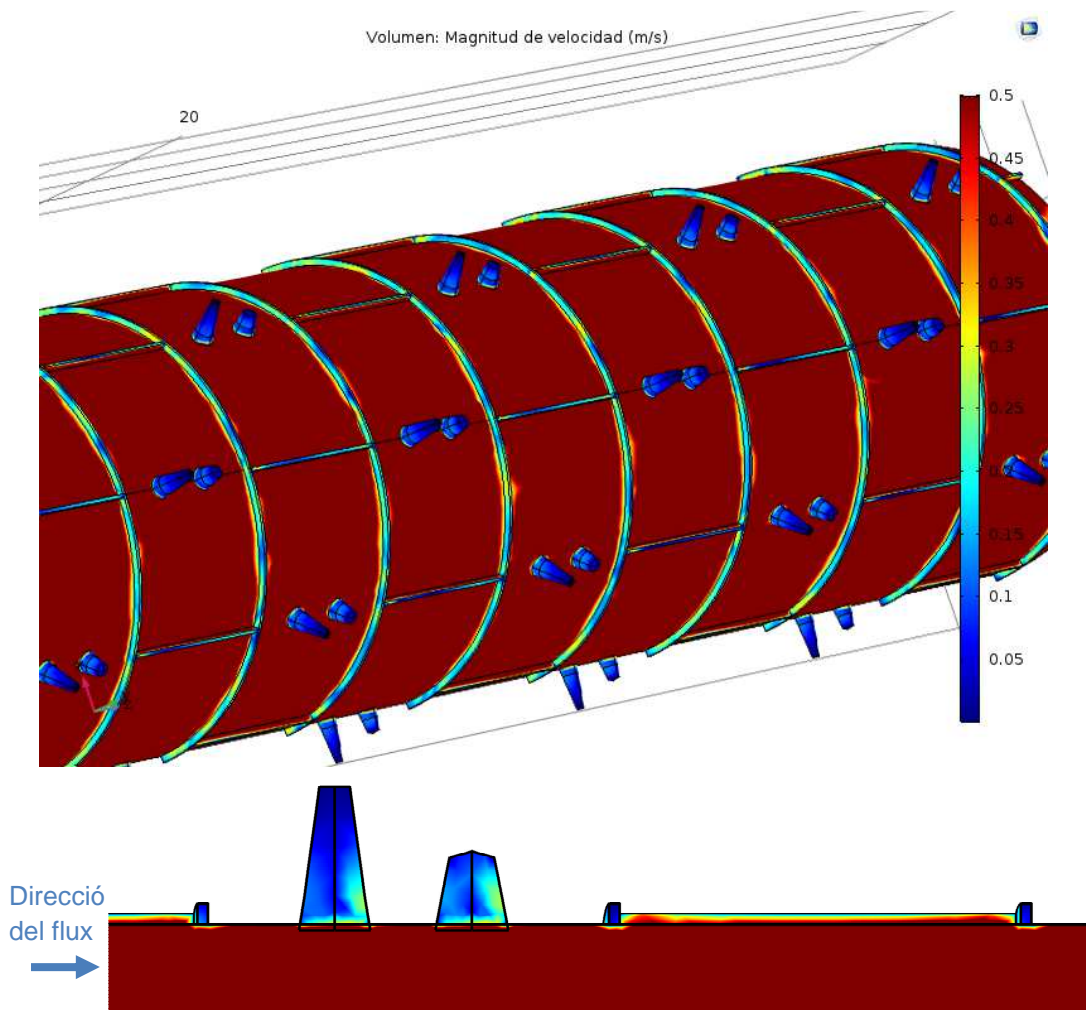


Figura 31: Velocitats en les parets i en els seus elements.

Observem una heterogeneïtat de les velocitats remarcable en els diferents elements. Les juntes circumferencials contenen aigua pràcticament estancada ja que la velocitat és pròxima a 0m/s. En canvi, en les juntes longitudinals, hi ha una circulació dins seu, ja que són paral·leles a la direcció del fluid, amb velocitats variables però mai nul·les.

Pel que fa als inserts, veiem diferències entre els llargs i el curts. En els llargs s'observa velocitat nul·la en la meitat esquerre i meitat superior del con, mentre que en els curts la velocitat nul·la es troba únicament en l'extrem superior del con. Tots dos tipus d'insert

tenen una similitud: presenten velocitats variables (tons blaus i verds) aigües avall de la seva estructura formant petits remolins del fluid.

Si ens fixem en les velocitat dins de les juntes longitudinals (Figura 32) observem que inicialment els valors són molt grans, de l'ordre de 1.8m/s, però, a partir dels 10-15m de túnel, la velocitat dins de les juntes ja és més o menys estacionària amb uns valors màxims de fins a 1m/s.

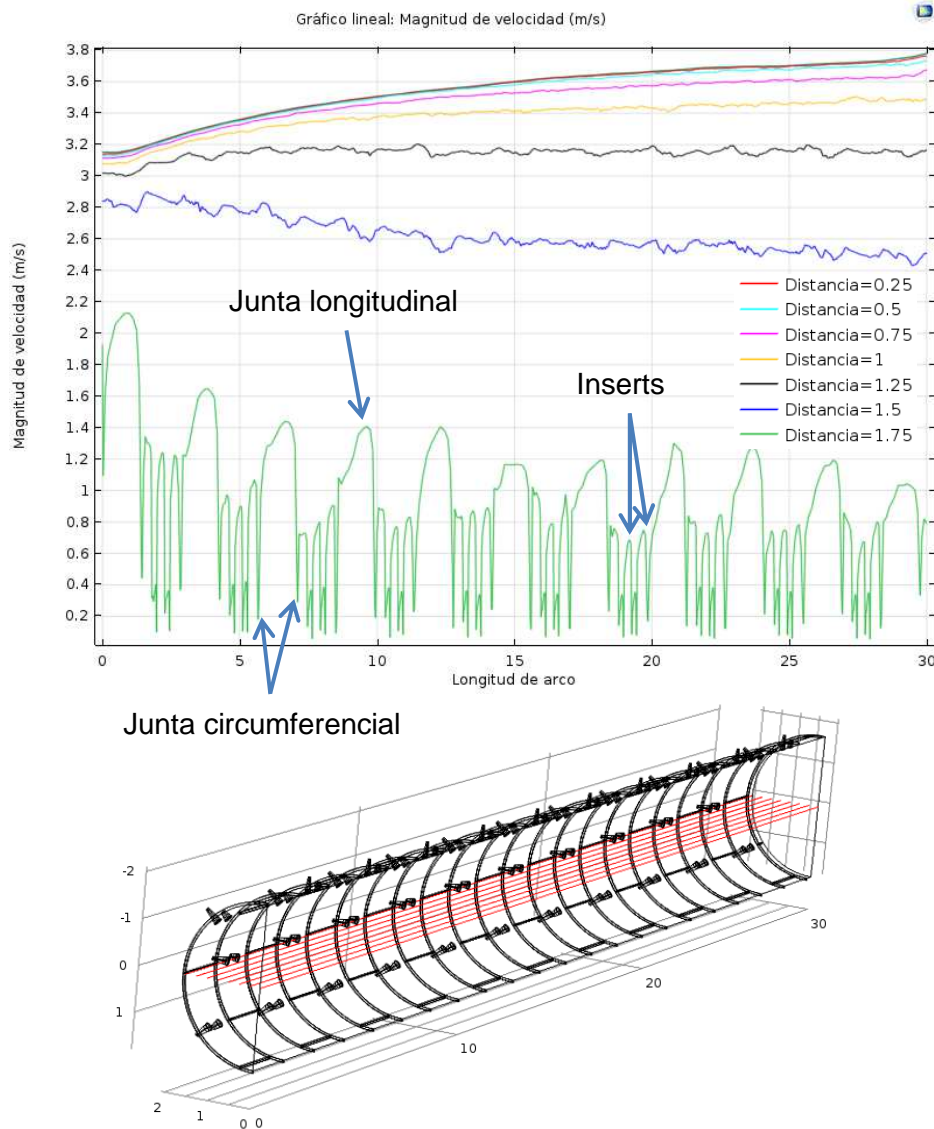


Figura 32: Velocitat longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m) i a alçada 0m.

La Figura 32 també ens mostra les variacions de la velocitat causades per la rugositat i la presència dels diferents elements de l'anell. Observem una disminució considerable de la velocitat a partir del primer metre (distància=1 Figura 32) respecte de l'eix. Per tant, l'àrea d'influència produïda per la rugositat de la paret i els elements que la contenen, es dona en els primers 0.75m des de la paret (veure annex per a diàmetre 6 i 9m).

Aquesta àrea amb flux turbulent és on es produeixen la majoria de pèrdues de càrrega. Els valors d'aquesta, respecte l'àrea total del diàmetre del túnel, són de 38.3%, 23.4% i

16.0% per a diàmetres 3.5m, 6m i 9m respectivament. Aquest fet corrobora que per a diàmetres grans, les pèrdues de càrrega són menors.

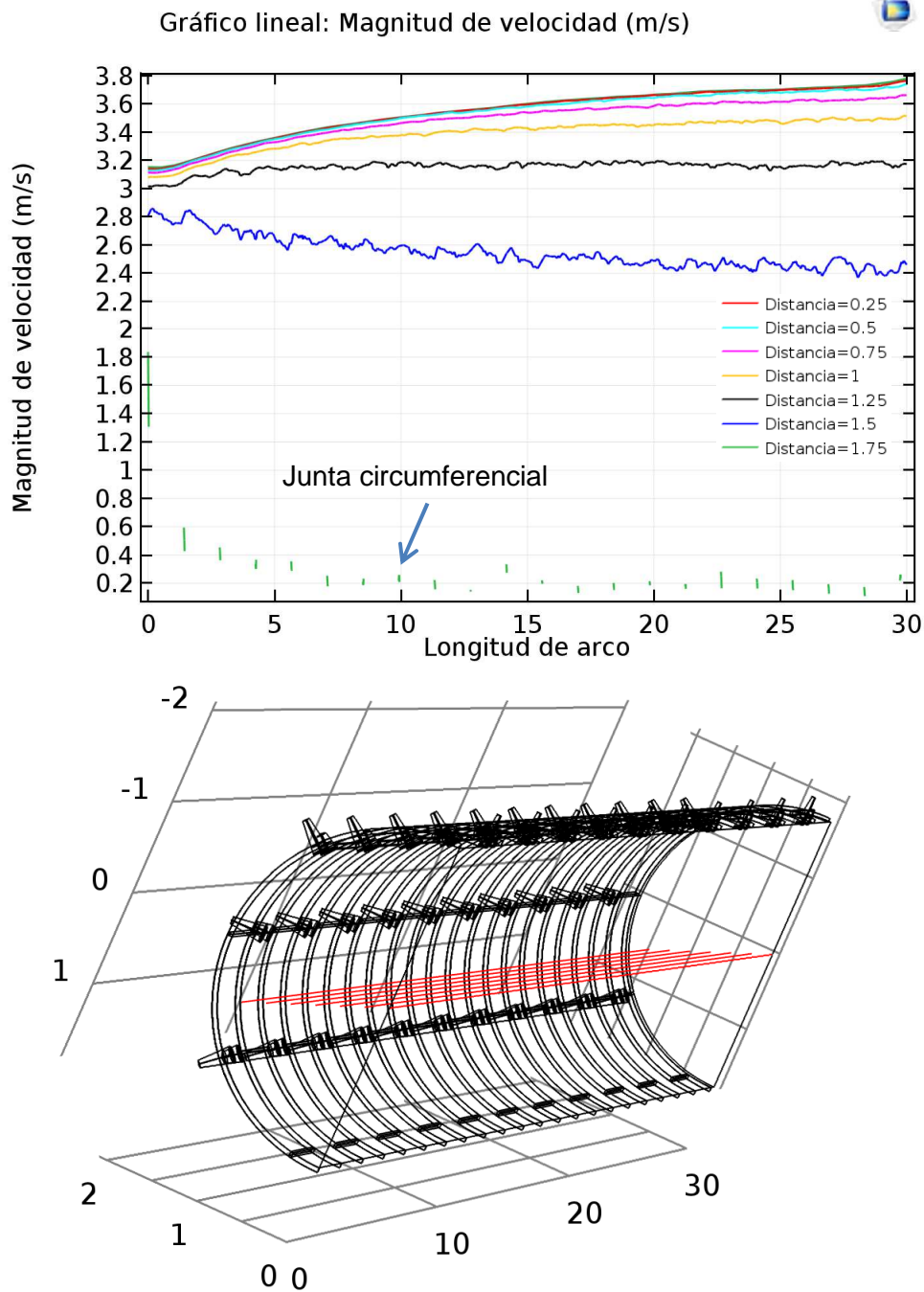


Figura 33: Velocitat longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix i amb alçada variable (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m).

4.3.2 PRESSIÓ

A continuació es descriuen els resultats de les pressions, obtinguts a partir de l'anàlisi del model 3D pel cas número 42.

La Figura 34 ens mostra els valors de pressió obtinguts dins del túnel. Observem que la pressió en l'eix del túnel i als 30m és de 6bar, mentre que aquesta és més gran als 0m.

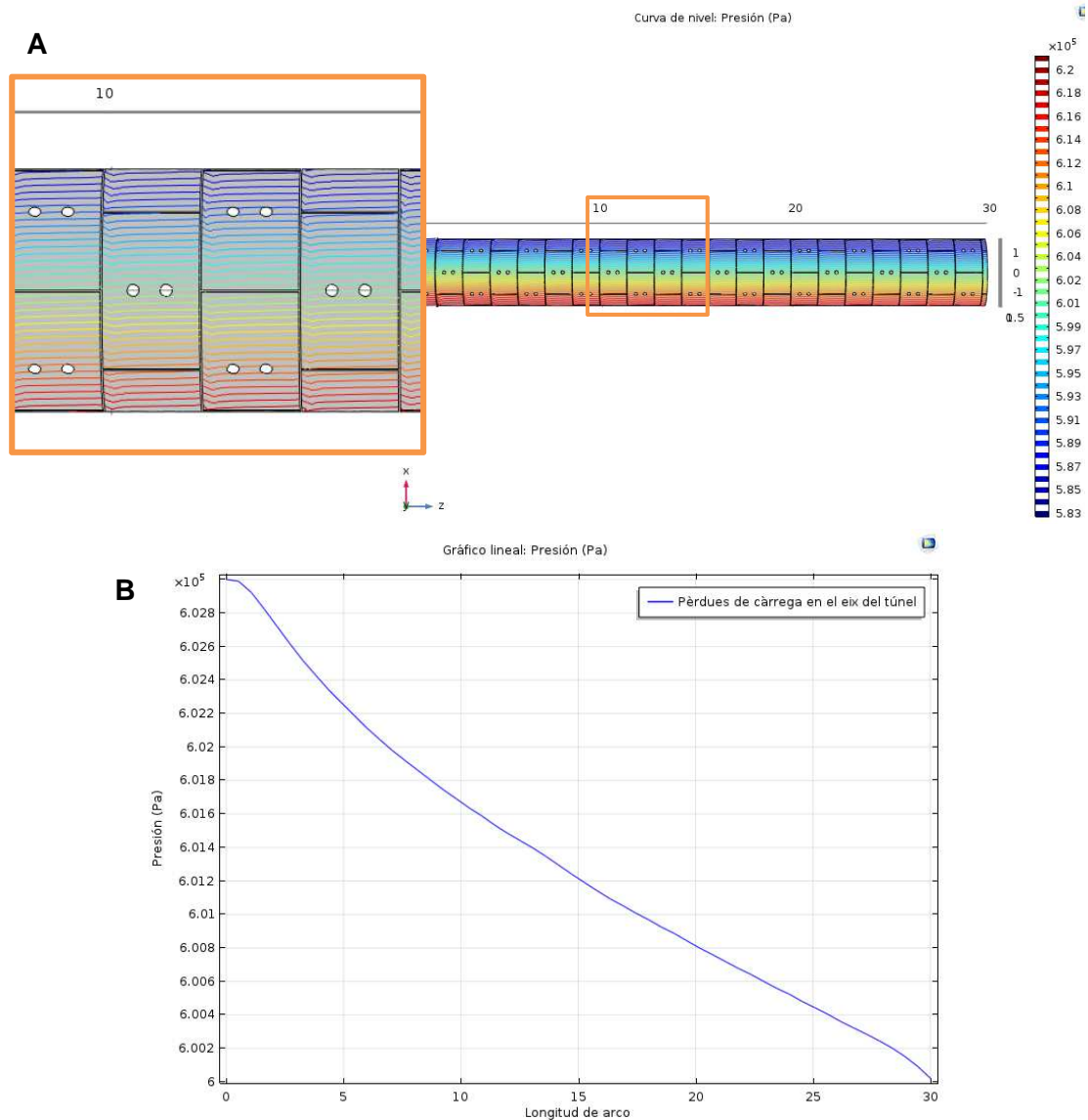


Figura 34: A. Isòbares obtingudes al llarg dels 30m de túnel (emmarcat observem un detall de 4 anells de dovelles). B. Valors de pèrdues de pressió a l'eix.

La corba de la Figura 34 B ens mostra com la pressió es redueix a mesura que anem aigües avall del túnel, passant de més pressió a menys pressió. Ara bé, si representem les pèrdues de pressió al llarg dels 30m afegint talls cada 0.25m paral·lels a l'eix longitudinal (veure Figura 35), observem com a mesura que ens apropem a les parets de les dovelles (de 1.75m a 1m respecte l'eix) el perfil de pressions comença a oscil·lar, de tal forma que passem a tenir valors que van de menys pressió a més pressió; conseqüentment, en aquestes zones el flux circula en la direcció oposada (Figura 36).

El que estem observant doncs, són remolins turbulents. Aquest fenomen, com acabem d'esmentar, es produeix a les parets fins a una distància de 0.75m d'aquestes; en canvi, a la resta de tram, el flux circula sense cap oscil·lació.

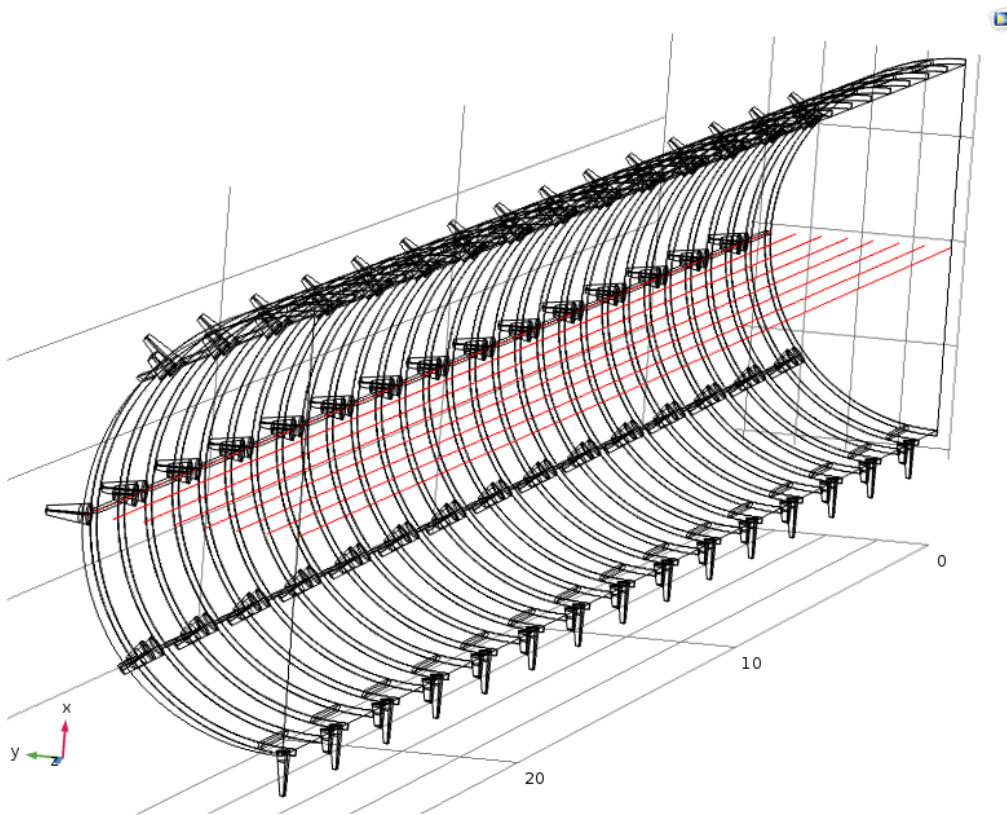


Figura 35: Talls transversals a la direcció del flux i perpendiculars a l'eix, $D=3.5\text{m}$.

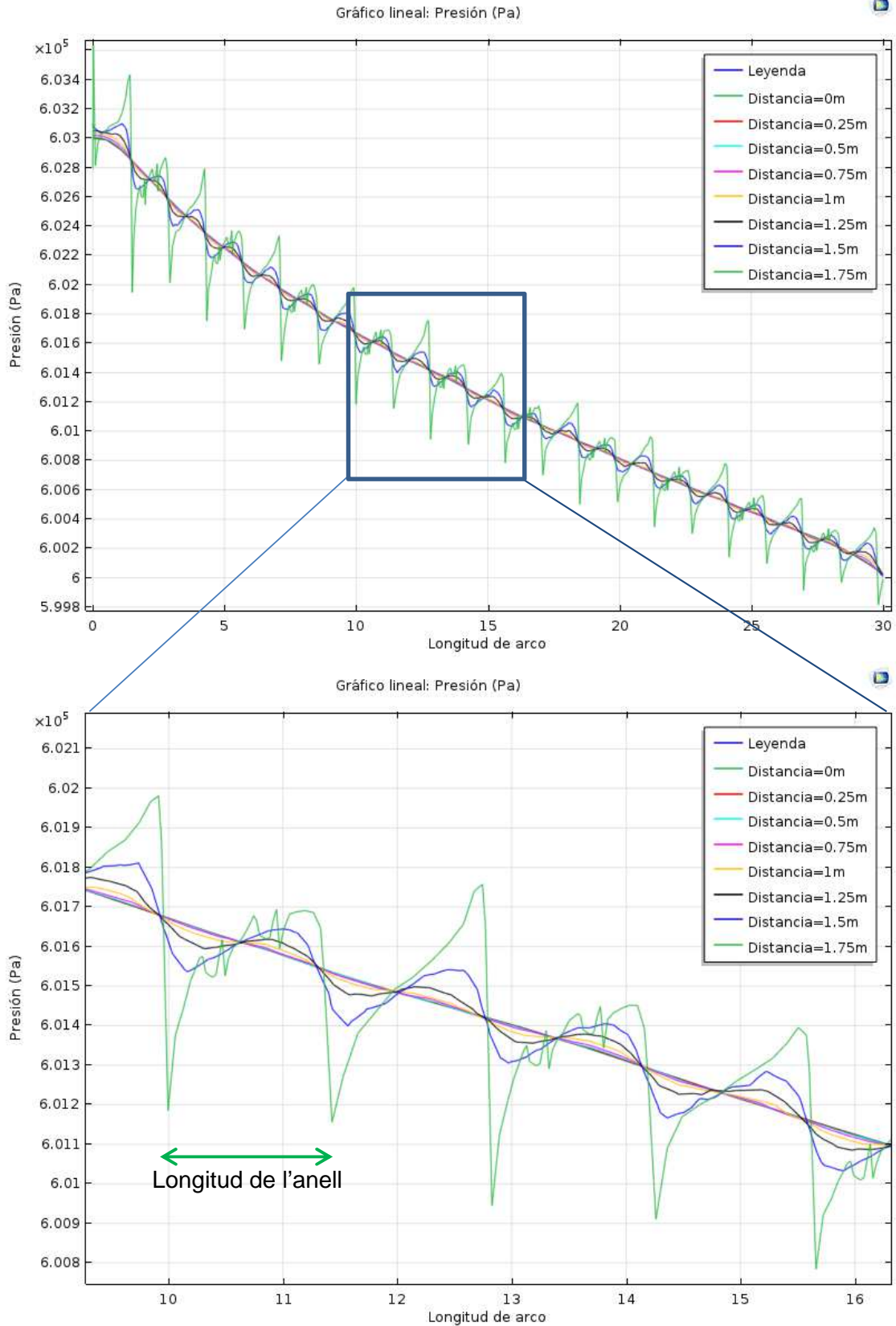


Figura 36: Valors de pressions obtinguts cada 0.25m en direcció perpendicular al flux.

Els salts de pressió que apareixen en la Figura 36, es produeixen sempre en trobar una junta circumferencial. A l'alçada dels inserts curts i llargs també es pot observar un pic, però de dimensions molt més reduïdes.

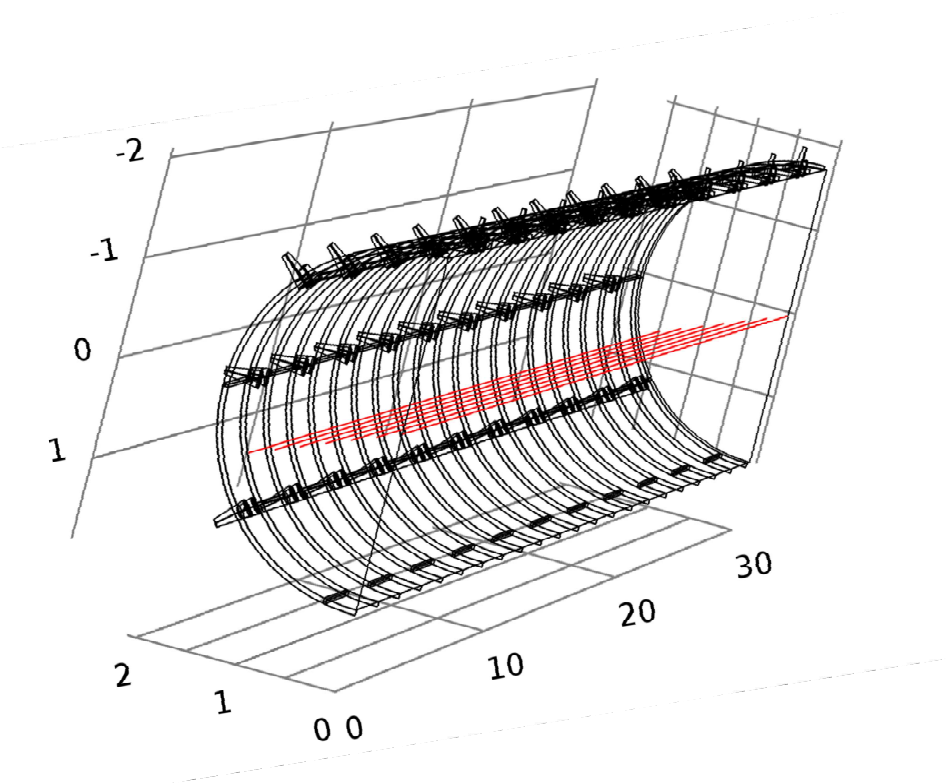
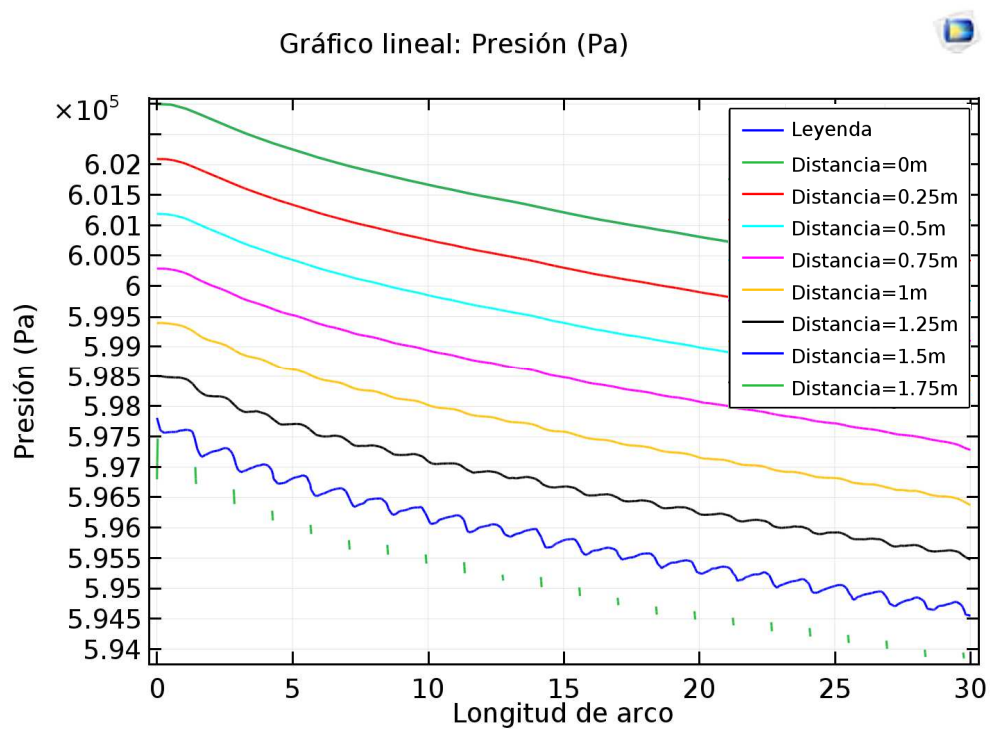
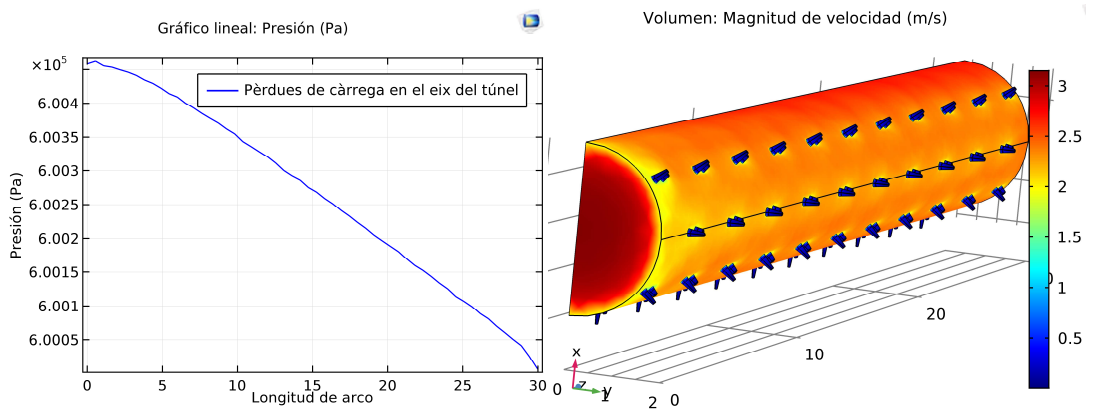
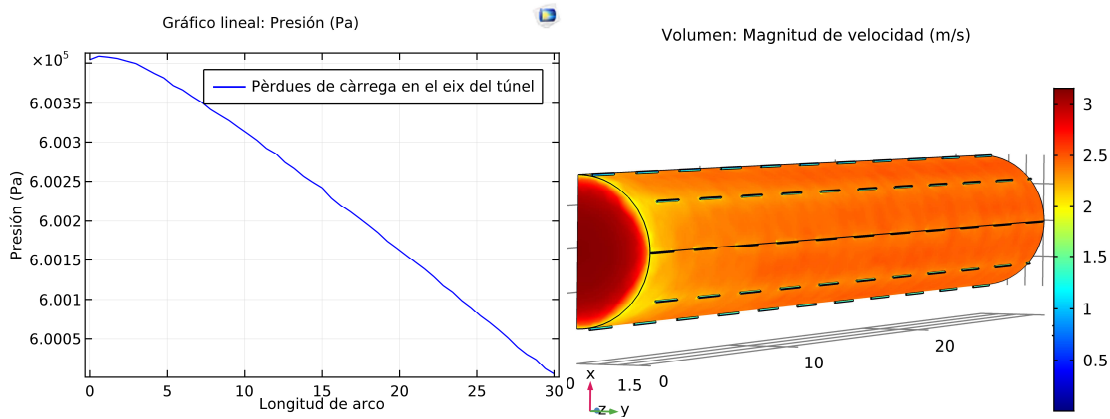
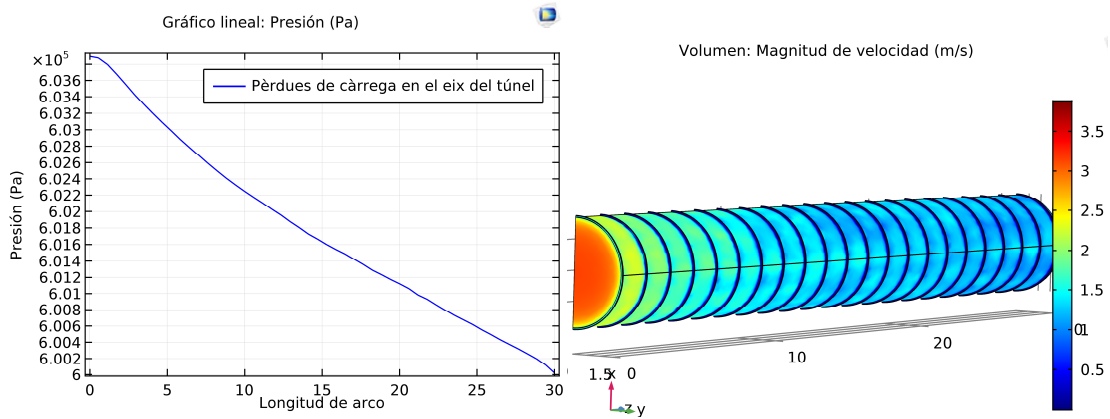


Figura 37: Valores de presiones longitudinal dels 30 m de túnel a diferents distàncies respecte a l'eix i amb alçada variable (0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1m, 1.25m, 1.5m i 1.75m).

Per tal d'analitzar individualment les pèrdues de càrrega generades pels diferents elements de les dovel·les, s'han estudiat els següents casos:

- Cas amb juntes circumferencials

- Cas amb juntes longitudinals
- Cas amb orificis



Els resultats d'aquests tres casos ens mostren que per a juntes circumferencials les pèrdues són de casi bé un ordre de magnitud superior respecte els altres dos elements estudiats.

Taula 10: Pèrdues de pressió generades per juntes circumferencials, juntes longitudinals i orificis.

	Pèrdues en 30m de túnel (Pa)
Juntes circumferencials	2968.7
Juntes longitudinals	452.7
Orificis	399.4

En definitiva, podem dir que l'element que més influeix en les pèrdues de càrrega són les juntes circumferencials. D'ara en endavant, considerarem les pèrdues generades pels orificis i les juntes (longitudinals i circumferencials) com a pèrdues degudes a les juntes circumferencials.

Aquests salts de pressió també s'observen en les línies de trajectoria de fluxos. En la Figura 41 observem com per a les partícules que es troben centrades i prop del eix, aquestes tenen una trajectòria contínua i rectilínea, mentre que per a les partícules que es troben a menys de 0.75m del contorn de les parets, les trajectòries són oscil·lants.

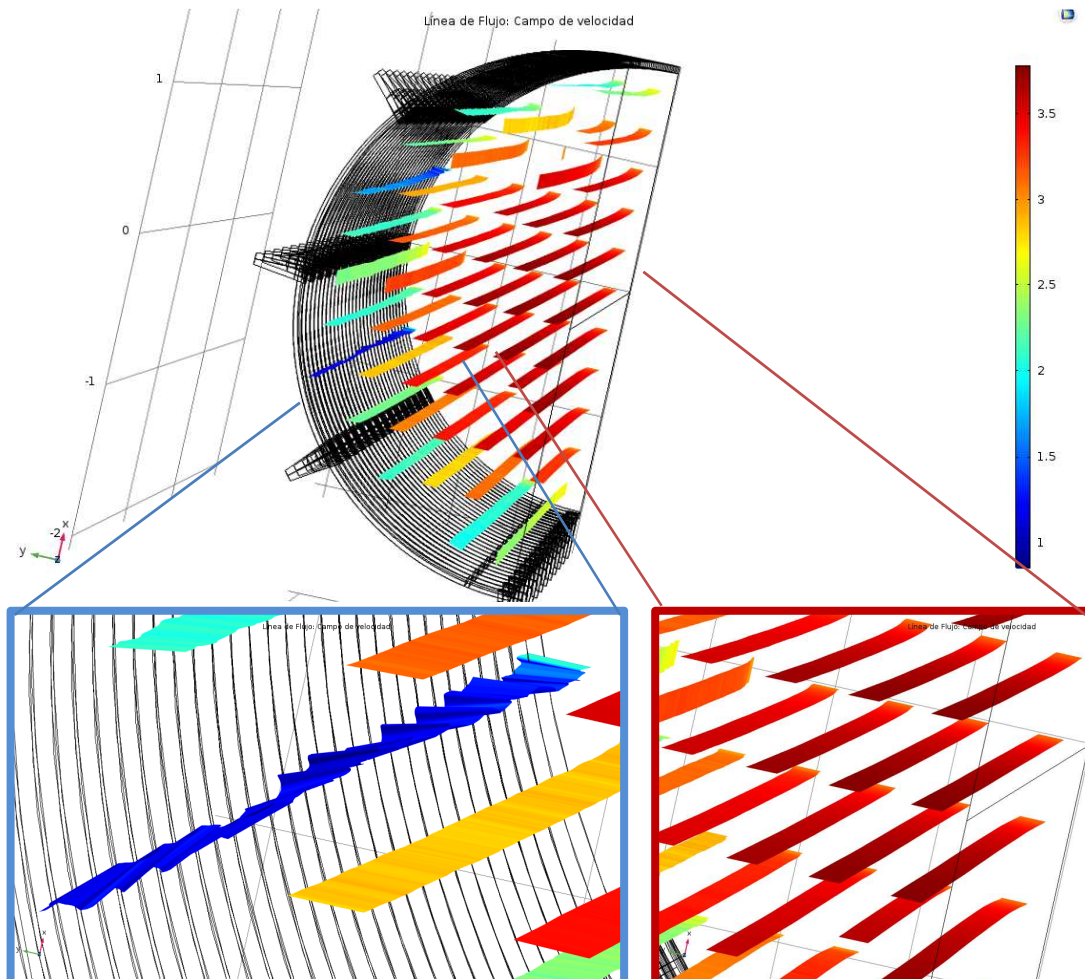


Figura 41: Línies de flux pel model número 42. Els diferents colors representen les velocitats en m/s. El requadre emmarcat de color blau representa la trajectòria de les partícules oscil·lants mentre que el marc vermell, representa la trajectòria contínua de les partícules en l'eix.

Si comparem aquests valors amb els obtinguts pels diàmetres de 6m i 9m, observem que tenen exactament el mateix comportament.

D'aquest apartat podem concloure doncs, que les pèrdues de pressió són constants al llarg del traçat i que es veuen incrementades degut als diferents obstacles de l'anell. En particular, el salt més brusc es dona quan el flux es troba la junta circumferencial. Tanmateix, observem que hi ha turbulències en els contorns més pròxims a les parets.

4.4 Resultats Globals del model 3D

Un cop analitzats els resultats del cas número 42 dels models 3D, descriurem el conjunt de resultats obtinguts.

Diàmetres:

En la següent figura hem representat les pèrdues de pressió per junta i per metre lineal segons les longituds dels anells, velocitats i amplades de juntes. Observem una distribució lineal pel que fa a les tres velocitats més altes, en canvi per a velocitat baixa (0.5m/s), les pèrdues de càrrega són de dos ordres de magnitud inferior.

Els resultats obtinguts amb diàmetre 9m no són coherents, ja que teòricament haurien de ser menors als de 3.5m i 6m (tal i com s'observa en la gràfica els de D=9m tenen una posició intermèdia entre aquests dos i no pas inferior).

Si ens fixem en el cas de D=9m, d'amplada de junta de 13mm, velocitat 0.5m/s i longitud d'anell de 1.4m, observem que les seves pèrdues són majors que per les de D=3.5m. Això és improbable hidràulicament, ja que a mesura que augmenta el diàmetre del túnel, no hi ha tanta massa d'aigua afectada per les turbulències provocades per la fricció de les parets; és a dir, com més gran és el diàmetre, esperem observar menys pèrdues de càrrega (tal i com s'observa en els de D=3.5m i 6m).

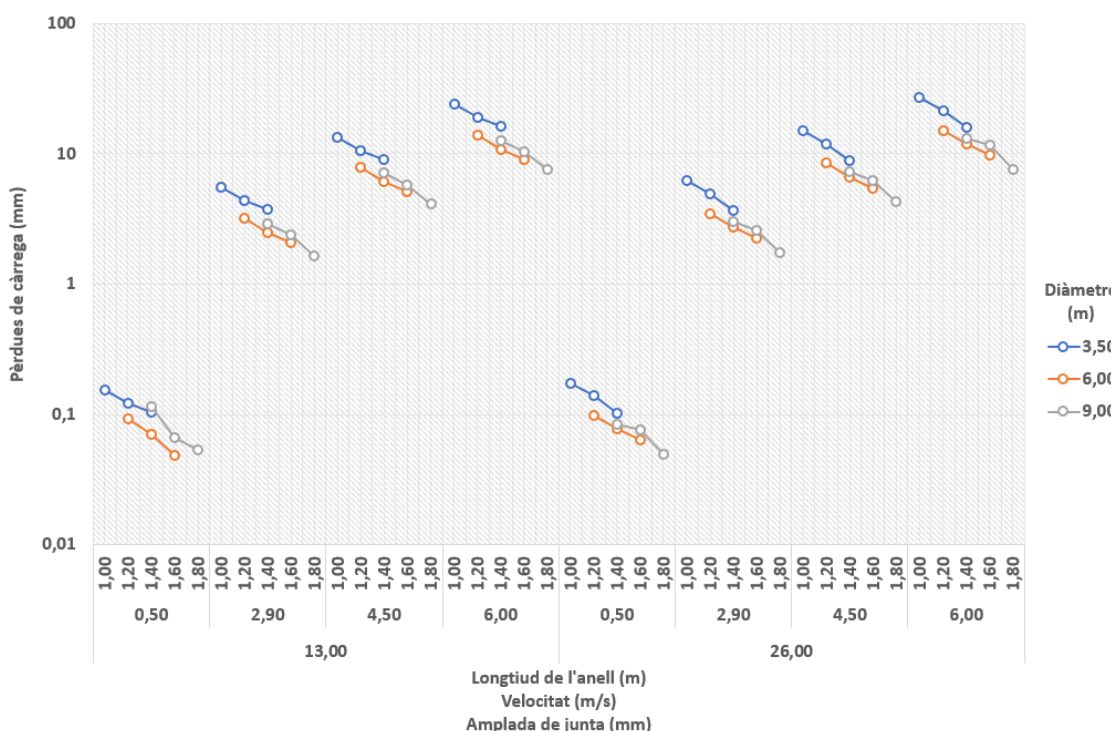


Figura 42: Distribució de valors obtinguts per D=3.5m, 6m i 9m, respecte l'amplada de la junta, les velocitats i la longitud de l'anell.

Els resultats incoherents de les pèrdues de càrrega dels túnels de diàmetre 9m, van ser explicats pel motiu que es descriu a continuació.

Inicialment, vam començar a fer aquest treball amb models 3D amb un sol diàmetre de 3.5 m. Una longitud adient per poder modelar correctament un túnel hidràulic és considerar una llargada de túnel corresponent a 7 o 8 cops el diàmetre. En el nostre cas inicial, aquesta longitud era de 30.0m (arrodonint 24.5m, equivalents a 7 vegades el diàmetre de 3.5m).

Un cop analitzats tots aquests models, vam voler estudiar diàmetres més grans (de 6m i 9m).

Taula 11: Longitud òptima vs modelitzada per a diferents diàmetres.

Diàmetre (m)	3.5	6	9
Longitud òptima m (considerant 7 vegades el diàmetre)	24.5	42	63
Longitud modelitzada (m)	30	30	30
Diferència entre longituds (m)	5.5	12	33
Desviació respecte la longitud òptima (%)	+18	-40	-110

Segons els valors mostrats en la Taula 11, la distància òptima del model de D=9m, hagués hagut d'ésser d'uns 60m aproximadament, el doble del modelitzat. Degut a la falta de recursos informàtics dels ordinadors utilitzats, no hem pogut realitzar models més llargs per falta de memòria RAM, entre d'altres paràmetres.

Per tant, a partir d'aquest moment, descartarem els resultats obtinguts amb D=9m, ja que considerem que no són suficientment representatius de la situació real que es produiria.

Els resultats, segons els dos diàmetres del túnel 3.5m i 6m, es mostren a continuació. Observem com les pèrdues són sempre majors per a diàmetre petit (3.5m), mentre que els valors mínims de pèrdues de càrrega els obtenim en els models amb el diàmetre 6m.

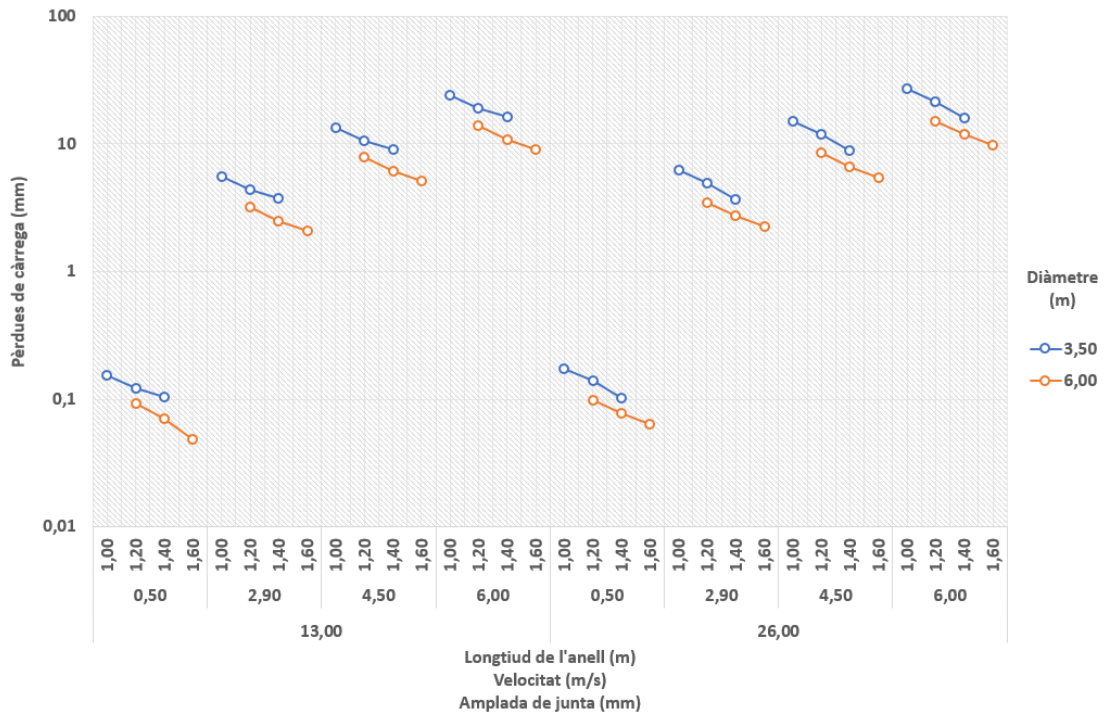


Figura 43: Comparació de les pèrdues de càrrega segons els diàmetres del túnel, 3.5m (color blau) i 6m (color taronja).

Amplades de junta:

El següent aspecte que volem analitzar és l'afectació de l'amplada de la junta en els resultats generals dels nostres models 3D. En la gràfica de la Figura 44, observem una petita diferència entre totes dues amplades estudiades. En columnes blaves es troben representats els valors de pèrdues segons l'amplada de junta de 13mm i la línia taronja indica els de 26mm. Veiem que aquests últims sempre estan lleugerament per sobre, amb uns valors d'entre 0.5mm i 2mm segons la velocitat. Podem dir doncs, que com més gran sigui l'amplada de la junta més pèrdues es produiran.

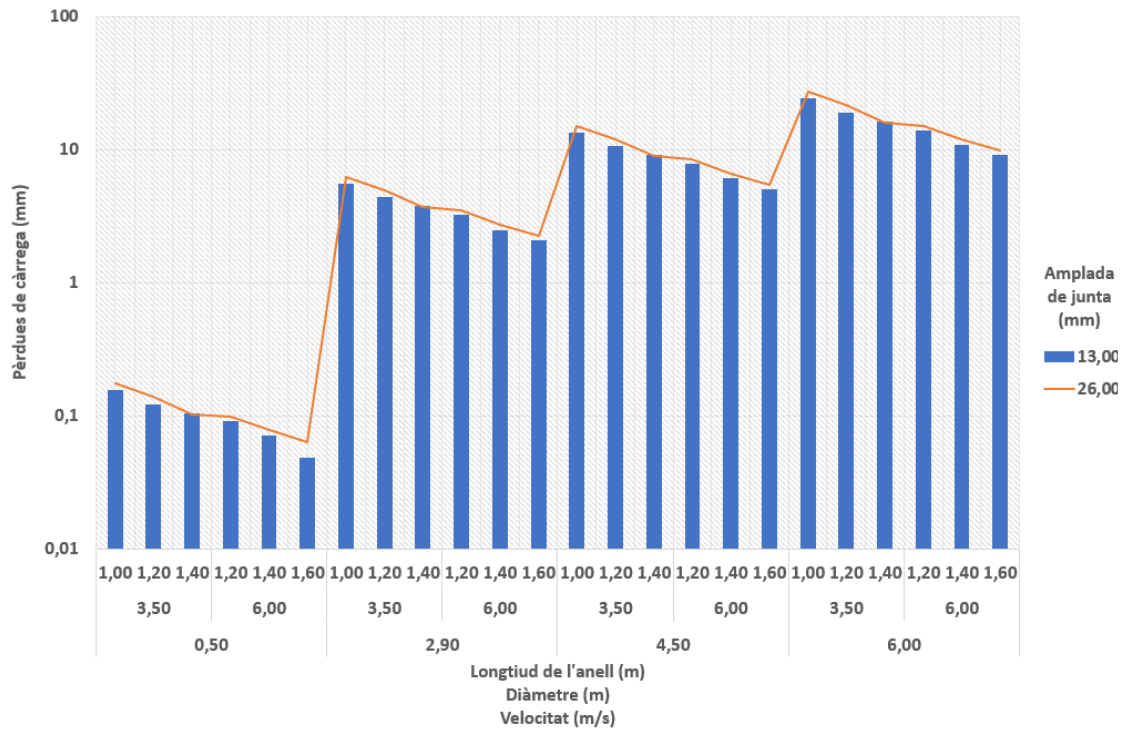


Figura 44: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les amplades de junta de 13mm (columnes blaves) i 26mm (línia taronja).

En la Taula 12, observem les diferències de pèrdues de pressió entre dues amplades de junta segons la velocitat i el diàmetre. De nou destacar la diferència de fins a dos ordres de magnitud entre els valors de velocitat 0.5m/s i la resta. Observem un increment de les pèrdues a mesura que augmenta la velocitat del flux i/o es redueix el diàmetre. De manera que, tot i tenir més volum d'aigua que pugui circular dins de la junta i que s'hi quedi estancada, el factor que més influeix és de nou la velocitat.

Taula 12: Diferències de pèrdues de càrrega de les mitjanes d'amplada de junta de 13mm i 26mm segons el diàmetre i la velocitat.

		Velocitat (m/s)			
		0.5	2.9	4.5	6
Diàmetre (m)	3.5	0.01	0.39	0.93	1.64
	6	0.01	0.21	0.53	0.93

Velocitats:

Les pèrdues de càrrega, comparades segons les velocitats, mostren de nou un salt d'entre un i dos ordres de magnitud per a la velocitat de 0.5m/s respecte de les altres tres. Les pèrdues màximes es donen amb velocitats de 6m/s, mentre que les mínimes es produeixen amb velocitats de 0.5m/s.

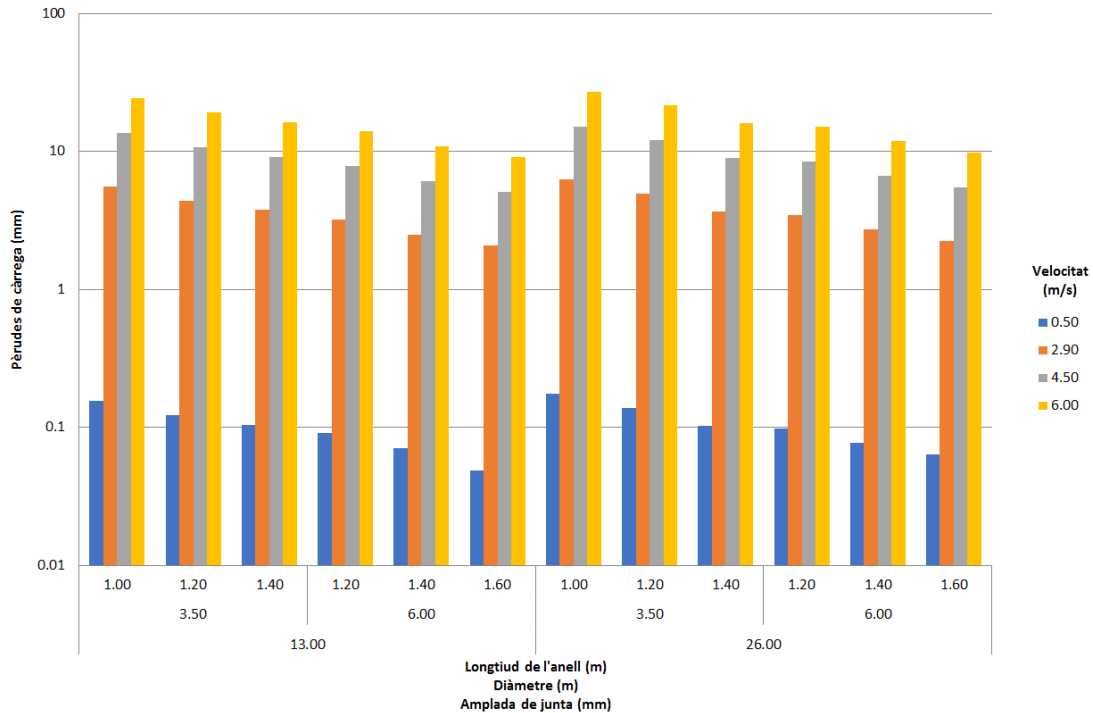


Figura 45: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les diferents velocitats estudiades. En color groc velocitat 6m/s, en gris 4.5m/s, en taronja 2.9m/s i en blau 0.5m/s.

Longituds dels anells:

Els resultats obtinguts segons les diferents longituds dels anells ens mostren que com més curt sigui l'anell, més pèrdues de càrrega es produiran. Per tant, en el nostre cas, les pèrdues són màximes amb anells de longitud de 1m, mentre que les pèrdues es minimitzen amb els anells de 1.6m. Això s'observa a qualsevol velocitat tot i que amb diferent ordre de magnitud en cada una d'elles. Les pèrdues de pressió, majors en anells petits, són degudes a què aquests presenten més quantitat de juntes per metre lineal.

A continuació, es mostren les pèrdues de pressió respecte les longituds d'anells pel cas de diàmetre 3.5m i amplada de junta de 13mm (Figura 46). La següent (Figura 47) ens il·lustra la gràfica amb tots els valors obtinguts on es veuen les tendències descrites.

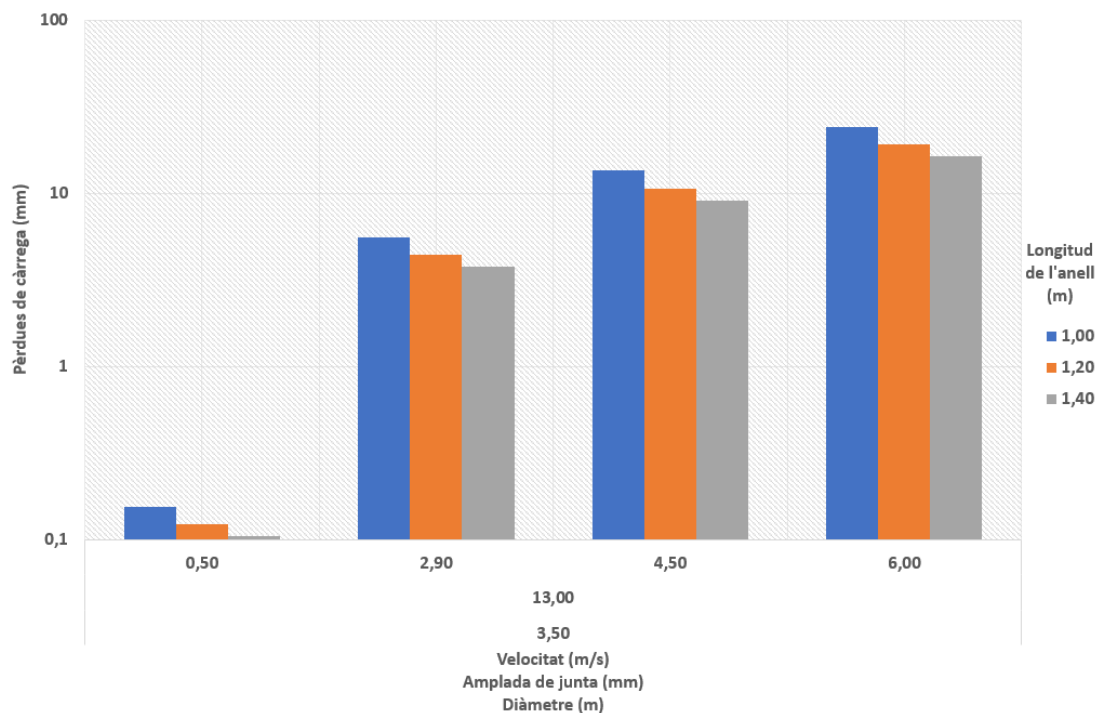


Figura 46: Comparació de les pèrdues de càrrega segons les diferents longituds de l'anell pel cas de diàmetre 3.5m i amplada de junta 13mm.

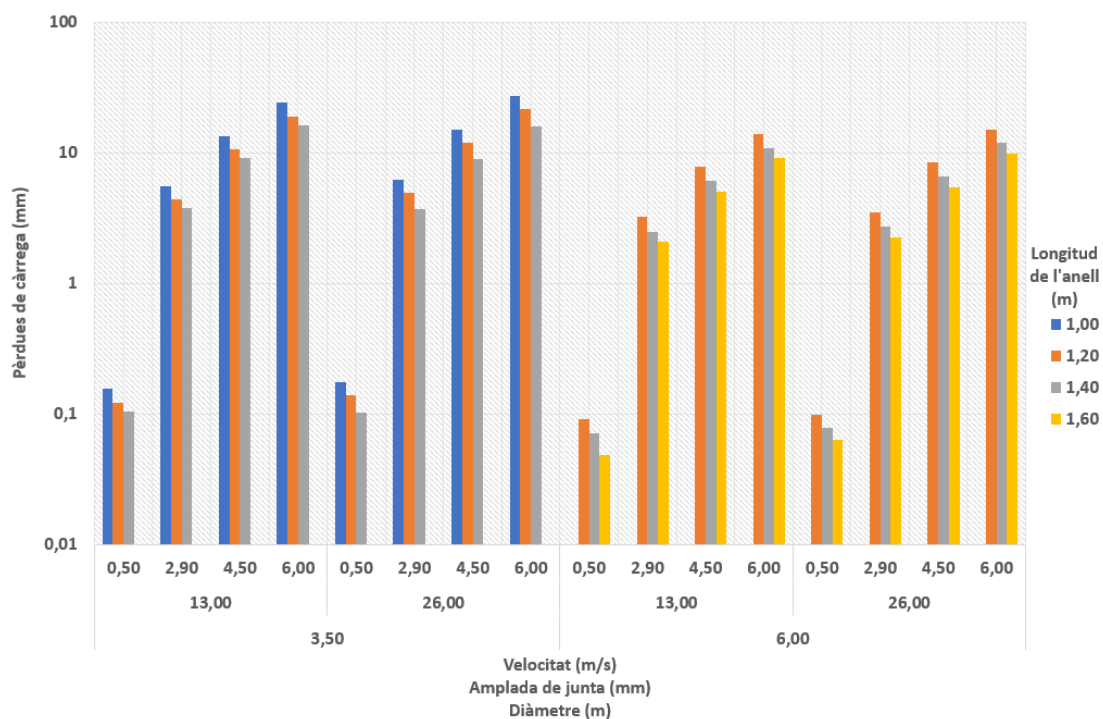


Figura 47: Pèrdues de càrrega (mm) segons les diferents longituds dels anells. Color blau anell de 1m de longitud, taronja 1.2m, gris 1.4m i groc 1.6m.

Per últim, s'han calculat els quocients mitjans entre les pèrdues de pressió pel cas base i el cas amb juntes circumferencials. Observem que els resultats de pèrdues de pressió pel cas amb juntes, són d'entre 6 i 8.5 vegades la pèrdua generada únicament per la fricció. D'altra banda, les pèrdues obtingudes amb diàmetre 6m són menors respecte

del de 3.5m i, per tant, la ràtio entre el cas base i el cas amb juntes és d'un ordre de magnitud superior (veure Figura 48).

Així doncs, els valors obtinguts amb el cas base són d'un ordre de magnitud inferior als obtinguts amb el cas amb juntes.

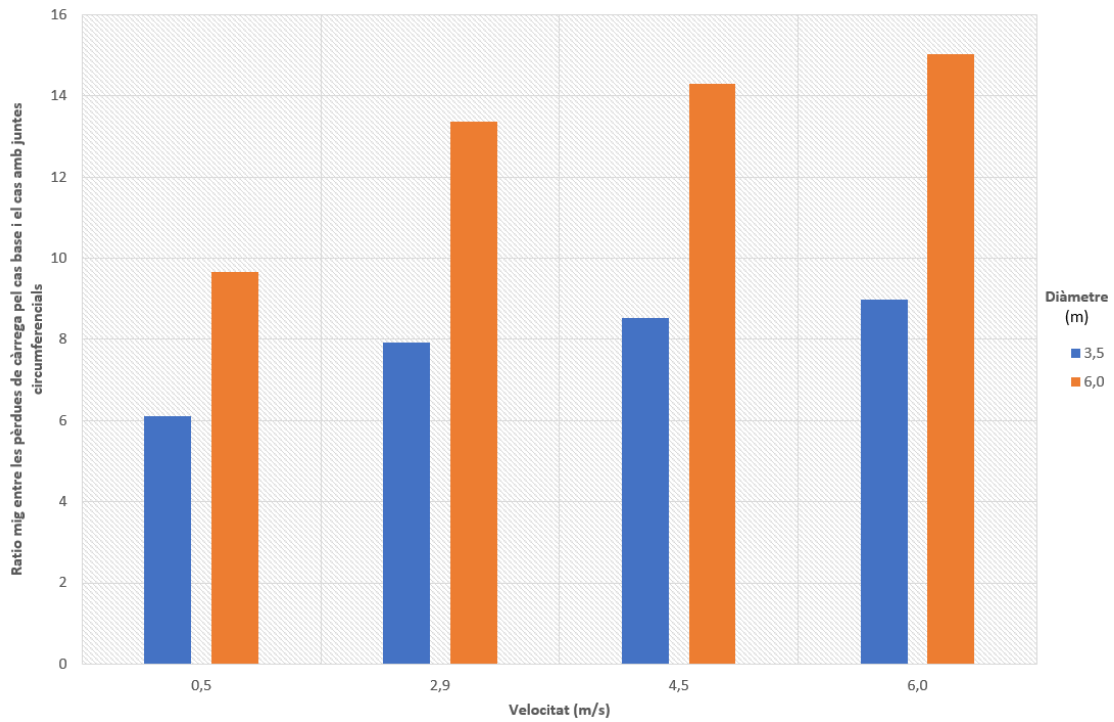


Figura 48: Ratio mig entre les pèrdues de càrrega generades pel cas base i el cas amb juntes circumferencials.

4.5 Formulació

Mitjançant el *software* Eureka hem obtingut diverses equacions que ens permeten interrelacionar les pèrdues de pressió (P) en funció de les diferents variables estudiades: diàmetre del túnel (D), longitud de l'anell (L) i velocitat (v). L'amplada de junta no s'ha tingut en compte ja que s'ha observat que no té una influència destacable en les pèrdues. Finalment, hem escollit una equació molt precisa (veure Taula 13) i de complexitat baixa (Veure Equació 4 i Figura 49).

Equació 4: Correlació entre les pèrdues de pressió i els diferents paràmetres analitzats.

$$P = \frac{2.5v^2}{L * D}$$

On, (P) correspon a les pèrdues generades per un anell en (mm), (v) és la velocitat de l'aigua en m/s, (L) la longitud de l'anell (m) i (D) el diàmetre (m).

Taula 13: Valors d'ajust entre les dades i el model, obtinguts mitjançant Eureka.

Termes	Valors
<i>R² Goodness of Fit</i>	0.981
<i>Correlation Coefficient</i>	0.991
<i>Maximum Error</i>	2.725
<i>Mean square error</i>	0.869
<i>Mean absolute error</i>	0.599
<i>Coefficients</i>	1
<i>Complexity</i>	10

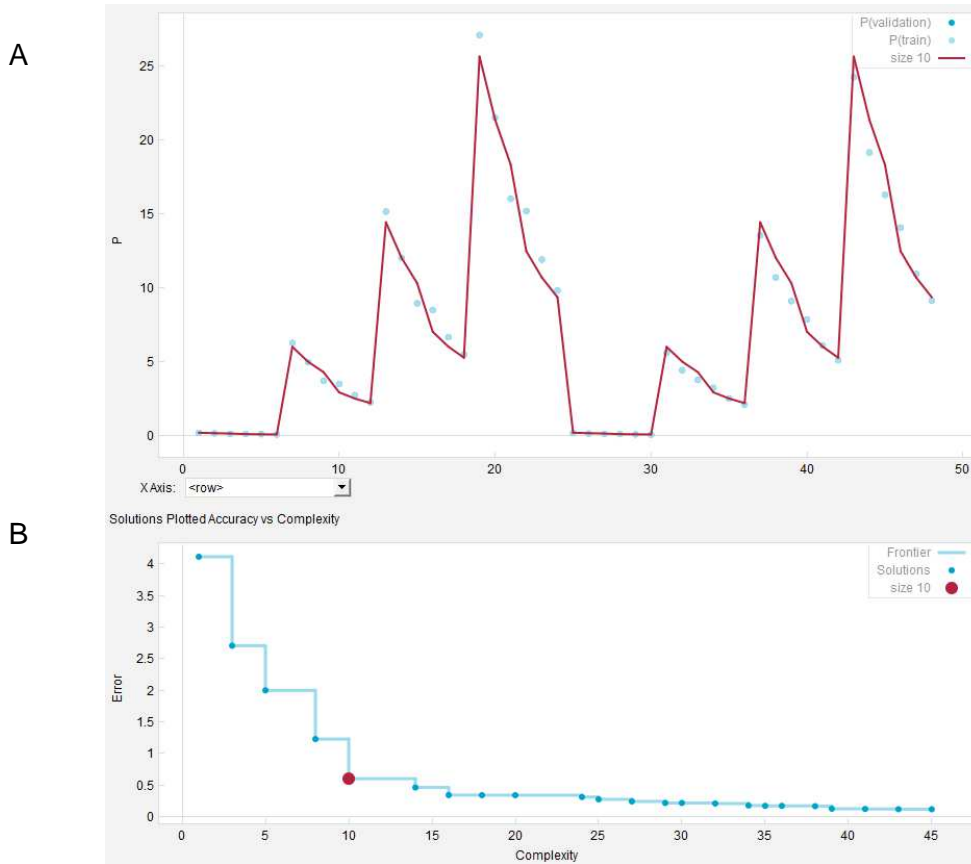


Figura 49: A. Gràfic que mostra com s'ajusta l'equació als nostres resultats. B. Gràfic de precisió vs complexitat (en vermell l'equació seleccionada).

En la següent Figura 50 veiem com els nostres resultats (*observed*) s'ajusten als resultats esperats segons la fórmula escollida (*predicted*). Considerem doncs que aquesta fórmula s'ajusta, amb prou precisió, als resultats que esperem obtenir.

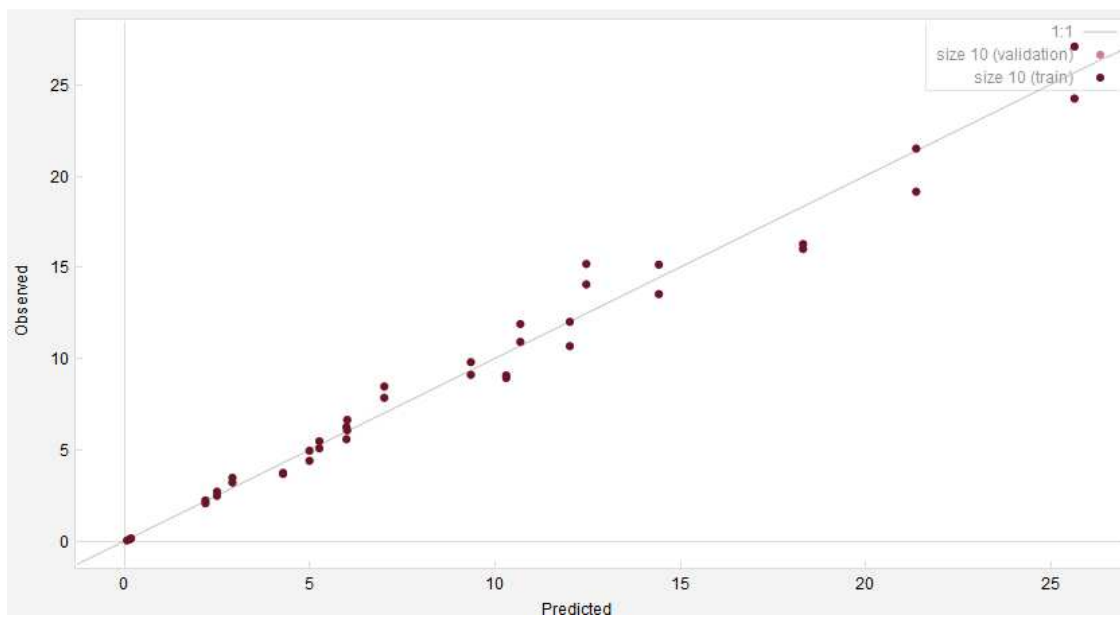


Figura 50: Gràfic on s'observen els resultats obtinguts amb els models 3D respecte els predits amb la fórmula.

A partir d'aquesta fórmula (Equació 4), hem elaborat, a mode d'exemple, el següent gràfic on hi són representats en punts els nostres resultats mitjançant Comsol Multiphysics i en línies els valors obtinguts amb la fórmula (amb una $v=2.9\text{m/s}$ i variant-ne el diàmetre (D)).

Aquest gràfic, així com les seves possibles combinacions, ens permet aproximar per extrapolació les pèrdues de càrrega per anell, segons sigui el diàmetre i la longitud de l'anell.

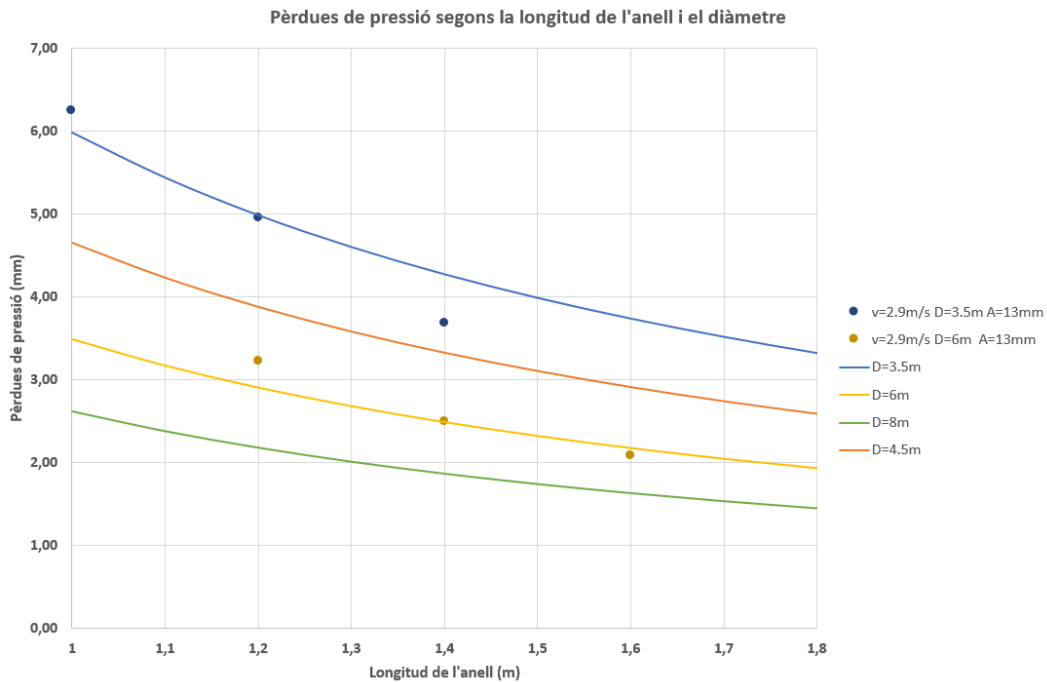


Figura 51: Pèrdues de pressió estimades mitjançant la fórmula vs valors estimats mitjançant Comsol Multiphysics.

En la Figura 51 observem com els valors obtinguts mitjançant l'Equació 4 s'aproximen amb una molt bona precisió als resultats obtinguts amb els models 3D.

Com hem comentat anteriorment, en la Figura 42, havíem descartat els resultats amb diàmetre 9m obtinguts mitjançant els models 3D, ja que eren incoherents. Ara bé, si utilitzem l'Equació 4 per a estimar les pèrdues obtingudes per a aquest diàmetre, veiem que s'ajusten amb els resultats que esperàvem obtenir (veure Figura 52).

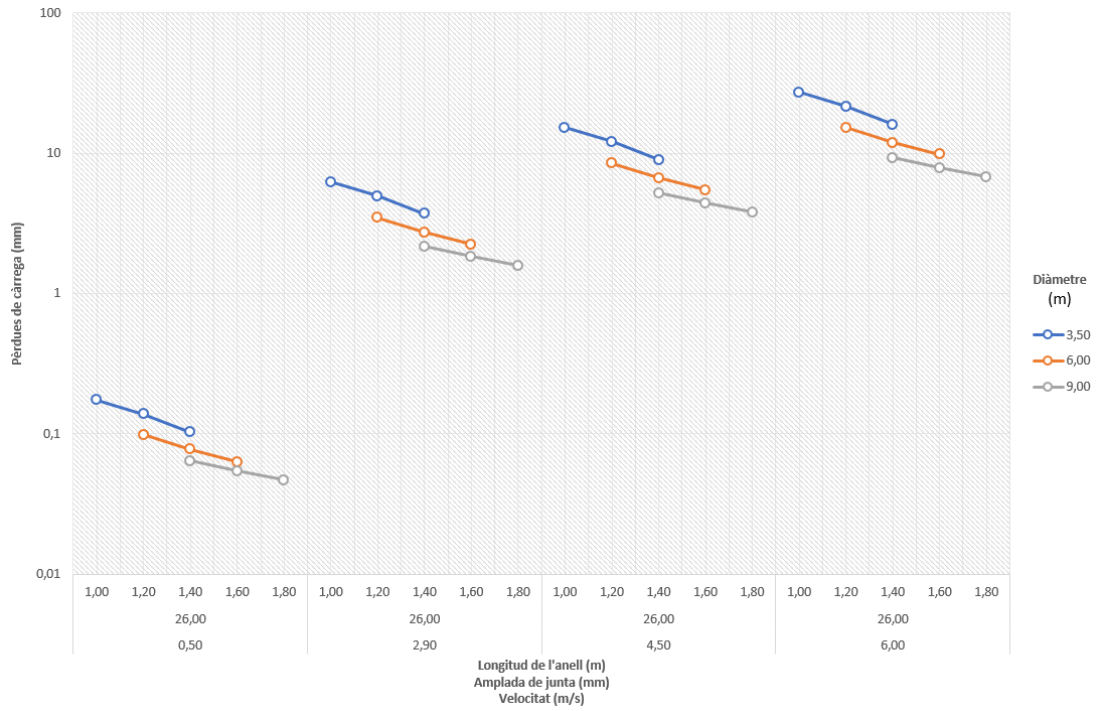


Figura 52: Pèrdues de pressió estimades mitjançant l'Equació 4 per a diàmetre 9m.

4.6 Aplicació a un cas pràctic

A continuació recordem les dades utilitzades per als càlculs:

- Diàmetre: 8.7m
- Longitud d'anell: 1.5m
- Cabal: 167m³/s
- Velocitat: 2.8m/s
- Longitud del túnel: 11.7km
- Salt hidràulic: 80m
- Rendiment de la turbina: 75%
- Coeficient de Manning: $n=0.013$
- Amplada de junta: 13mm

Segons els resultats obtinguts, les pèrdues generades pel cas base a partir de la fórmula de Manning són de 5.54m per a la longitud total del túnel (11.7km). Mentre que per a les pèrdues estimades mitjançant l'Equació 4, aquestes són de 11.67m al llarg dels 11.7km (veure Taula 14).

Taula 14: Pèrdues de càrrega obtingudes amb la fórmula de Manning pel cas base i estimades mitjançant l'Equació 4 pel cas amb juntes.

Cas	Mètode d'aproximació	Pèrdues de càrrega al llarg del túnel (m)
Cas base	Manning	5.54
Cas amb juntes	Equació 4	11.67

Observem que les pèrdues calculades mitjançant la fórmula de Manning amb $n=0.013$ són de 5.54m, mentre que per les aproximades amb l'Equació 4 són de 11.67m. Aquest valor equival a un Manning de $n=0.023$ ($5.54m+11.67m=17.21m$), valor superior al d'un formigó projectat ($n=0.019$).

Amb aquests valors de pèrdues, s'ha calculat l'energia que pot generar la central hidroelèctrica en 1 any, suposant en un cas que els elements geomètrics de les dovelles estan reomplerts (cas base) i en un altre cas amb elements geomètrics sense reomplir (cas juntes).

Per a la realització dels càlculs s'ha tingut en compte que les turbines tenen una eficiència al llarg de l'any del 95% (8322h). També s'ha considerat que el preu d'un kWh és de 0.15 €.

Els valors obtinguts es mostren en la Taula 15. Obtenim uns valors d'energia anual de 758826MW/any pel cas base, i de 639909MW/any pel cas amb juntes.

Taula 15: Potència, Energia i Beneficis anuals pel cas base i pel cas amb juntes.

Cas	Potència W (MW)	Energia (MW/any)	Beneficis anuals (€)
Cas base	91.2	758826	112 469 850.47
Cas amb juntes	76.9	639909	94 632 302.25

La diferència entre tots dos casos és molt important en termes econòmics. Així doncs, es recomana reomplir les juntes circumferencials, tot i que aquest fet tingui un cost afegit al projecte. Aquest cost de reparació és pot estimar en 78.18 euros per metre lineal de junta (veure Taula 16).

Taula 16: Justificació de preus per a segellar una junta.

	Unitats	Preu (€)	Preu Parcial (€)
Mà d'obra	2.5	25	62.5
Morter de reparació d'alta resistència R4 tipus MC-RIM PW 20 o similar	5.0	1.8	9.0
Morter de fraguat ràpid tipus MC-FIX ST o similar	0.5	4.5	2.25
Preu per metre lineal de junta (€/m)			73.75
Preu total per metre lineal de junta (€/m) (incloent un 6% de costos indirectes)			78.18

Sabent que el túnel de Kargi és de 8.7m de diàmetre i les dovelles de 1.5m, tindrem 27.3m de junta a tractar per cada anell amb un cost de 1821.48 € per junta. En total tenim 7800 anells, per tant el cost de segellar totes les juntes serà de 14 209 850.47 €.

Aquesta inversió està més que justificada, ja que en el cas de no segellar les juntes els beneficis a 10 anys vista serien de 946 milions d'euros, mentre que si segellem les juntes, els beneficis generats per l'energia hidroelèctrica serien de 1124 milions d'euros. En conseqüència, la inversió de 14.2 milions d'euros que suposa segellar les juntes és una inversió que a llarg termini es convertirà en més guanys. A més a més, aquest cost equival únicament a un mes i mig dels beneficis de la hidroelèctrica, un termini que es considera raonable. Cal notar que la reparació d'aquests elements tindrà una vida limitada i serà necessari un manteniment.

5 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

5.1 Discussió dels resultats

Des de fa anys, les constructores deixen en mans dels clients la decisió de segellar o no les juntes circumferencials d'un túnel hidràulic/hidroelèctric. La majoria opten per no segellar-les, per tal d'estalviar temps i costos en el projecte. Amb tot, no hi ha cap estudi que justifiqui aquesta pràctica.

Els models 2D ens han servit per comprovar la fiabilitat del software Comsol Multiphysics i dels resultats obtinguts mitjançant els models de turbulència k- ϵ . Les dades obtingudes han mostrat que les variables que més influenciaven en les pèrdues de càrrega eren la velocitat, el diàmetre i, en menor mesura, l'amplada de la junta. Essent majors aquestes pèrdues de pressió, amb grans velocitats i/o diàmetres més petits.

La realització dels models 3D ens ha permès introduir la geometria i dimensions reals de les dovelles. Aquests resultats ens han demostrat que l'element que més influïa en la pèrdua de pressió era la junta circumferencial. També s'ha observat que, com menor longitud presentés l'anell estudiat, majors pèrdues s'obtenien. Això era degut a què hi havia una densitat superior de juntes circumferencials al llarg del túnel.

Aquests resultats ens evidencien la gran diferència de pèrdues de pressió entre casos base (simulen les juntes segellades i per tant només tenim pèrdues per fricció) i casos amb juntes circumferencials, on les pèrdues són causades per fricció i per la presència dels elements. Tanmateix, també manifesten que els casos amb juntes no segellades generen fins a un ordre de magnitud més de pèrdues que el cas base.

El software Eureka va proporcionar-nos diverses equacions; totes elles ens relacionaven les pèrdues de pressió per anell amb les diferents variables estudiades. De totes aquestes, vam escollir-ne una amb un coeficient de correlació elevat però de baixa complexitat.

L'equació, $P=2.5v^2/LD$, va ser la utilitzada per estimar les pèrdues de càrrega pels casos amb diàmetre de 9m. Inicialment aquest diàmetre va ser rebutjat per incoherència dels resultats de pèrdues de pressió, ja que tot i disposar d'uns bons ordinadors, aquests no van ser prou potents com per modelitzar i calcular, amb una bona aproximació, aquests casos.

Altrament, aquesta equació va ser aplicada a un cas pràctic real, demostrant-ne la seva idoneïtat per calcular amb força precisió les pèrdues de càrrega generades en un túnel de variables conegudes.

Els resultats van mostrar que no segellar juntes circumferencials feia augmentar el número de Manning de 0.013 (fricció) a 0.023 (fricció+juntes); valor superior al del formigó projectat (0.019). Per tant, aquestes xifres confirmen la importància de segellar les juntes, ja que si no es produeixen més pèrdues de pressió que en un túnel amb formigó projectat.

El nostre treball ha permès corroborar la hipòtesis inicial consistent en segellar les juntes. Malgrat que suposi un increment del pressupost del projecte, a llarg termini la central hidroelèctrica generarà més energia, i, per tant, més benefici econòmic.

5.2 Recomanacions futures

Per seguir avançant en aquesta línia de recerca sobre les pèrdues de càrrega generades per elements en les dovelles, caldria obtenir un ventall de resultats molt més ampli, a partir de models 3D, per poder confirmar la formulació presentada en aquest treball. Per això caldria disposar d'uns ordinadors més potents que permetessin calcular models amb longituds majors (necessàries per a estudiar diàmetres més grans).

Un altre avenç seria afegir en aquests tipus d'estudis, altres elements sovint presents en les dovelles (com poden ser pernys, juntes inclinades,... entre d'altres) i els diversos graus de rotació que presenten els diferents anells.

També seria rellevant formular una equació més general (no únicament pel nostre tipus d'anell) per aproximar les pèrdues de càrrega tenint en compte més variables (número de segments per anell, número d'elements per segment, fricció segon el tipus de formigó...).

Seria convenient que aquesta formulació es calibrés amb resultats reals de centrals hidroelèctriques en funcionament que hagin reomplert els elements de les dovelles, i comparar-los amb d'altres projectes en què no hagin dut a terme aquest procediment. D'aquesta manera es podria confirmar o desmentir la validesa de la equació plantejada.

També seria de gran interès poder realitzar alguns models a escala real i reduïda en el laboratori, per tal d'optimitzar les pèrdues de càrrega degudes a les juntes presents entre anells.

6 CONCLUSIONS

A continuació s'exposen les diferents conclusions extretes del treball:

- Els models 2D i 2D axisimètrics van ésser necessaris per dissenyar els models 3D, ja que ens van permetre assolir les velocitats estacionàries i comprovar l'afectació de les pèrdues de càrrega degudes a una junta circumferencial.
- Amb els resultats obtinguts dels models 3D i mitjançant el software Eureka, vam trobar una equació ($P=2.5v^2/LD$) que relacionava la pèrdua de càrrega amb les diferents variables estudiades (velocitat, longitud de l'anell i diàmetre).
- En els models 3D, l'element que més influïa en les pèrdues de càrrega era la junta circumferencial (en comparació amb les juntes longitudinals i els orificis per a l'erector).
- A més, les pèrdues generades en els casos amb juntes circumferencials eren d'un ordre de magnitud superior a les produïdes únicament per fricció.
- El fet de no segellar les juntes entre anells feia que es produïssin més pèrdues de pressió que en un túnel amb formigó projectat.
- El cas pràctic real corrobora la conveniència de segellar les juntes circumferencials per tal de reduir les pèrdues de càrrega i així adquirir majors beneficis a llarg termini.

Amb tot això, podem dir que:

- Un túnel òptim hauria de ser dissenyat amb el major diàmetre possible, mínima velocitat del fluid i juntes segellades, per tal de minimitzar-ne les pèrdues de pressió.

7 BIBLIOGRAFIA I PÀGINES WEB CONSULTADES

7.1 BIBLIOGRAFIA

Barla, G., Pelizza, S., (2000). TBM tunnelling in difficult ground conditions. In: Proceedings of GeoEng2000, Melbourne.

Bishwakarma, M. Computation of Head Losses in Hydropower Tunnels, (2012).

Bombardelli, F.A, Hirt, C.W., García, M.H., (2001). Discussion of computations of curved free Surface water flow on spiral concentrators. Journal of Hydraulic Engineering 127 (7), 629-631.

Casero, A. (2016). Recomendaciones geométricas para el diseño de dovelas de revestimiento de túneles. Tesina, Universitat Politècnica de Catalunya.

Chen, Q., Dai, G., Liu, H., (2002). Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. Journal of Hydraulic Engineering 128, 683.

Coon, F (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated Banks, U.S. Geological Survey Washington, DC.

Della Valle, N., Castellví, H. (2016). Diseño de túneles con tuneladora. Ciudad de México : 4º Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y en roca.

Kaffash, M.H., Ganji, D.D., Nobakhti, M.H., (2017). An analytical solution of turbulent boundary layer fluid flow over a flat plate at high Reynolds number. Journal of Molecular Liquids 230, 625-633.

Launder, Spalding, (1972). Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, England.

Najafi, M. & Nabipour, M., (2012). The effect of step on the hydraulic characteristics of the subcritical free Surface flow in conveyance tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology.

Pescara, M., (2010). Dimensioning the segmental lining. Tunnelling and tunnel boring Machines. Politecnico di Torino.

Sánchez-Juny, M.; Blade, E.; Jerónimo, P, (2005). Hidràulica. Edicions UPC.

Skelhorn, S. McNally, L. (2009). A Practical Approach for Precast Concrete Segmental Ring Selection. Rapid Excavation and Tunneling Conference.

Wilcox, (2006). *Turbulence modeling for CFD*. 3rd edition, DCW Industries Inc., California.

7.2 PÀGINES WEB CONSULTADES

Pàgina web:

Comsol Multiphysics. Adreça URL: <<https://www.comsol.com/>> [Consulta: Del 10 de novembre del 2016 al 6 de maig 2017].

<<http://www.nutonian.com/products/eureka/>> [Consulta: Del 15 de febrer al 20 d'abril 2017].

Softwares:

- Eureka
- ComsolMultiphysics version 5.2a

8 ANNEXES

A.1 TAULES DE RESULTATS DELS MODELS 2D AXISIMÈTRICS

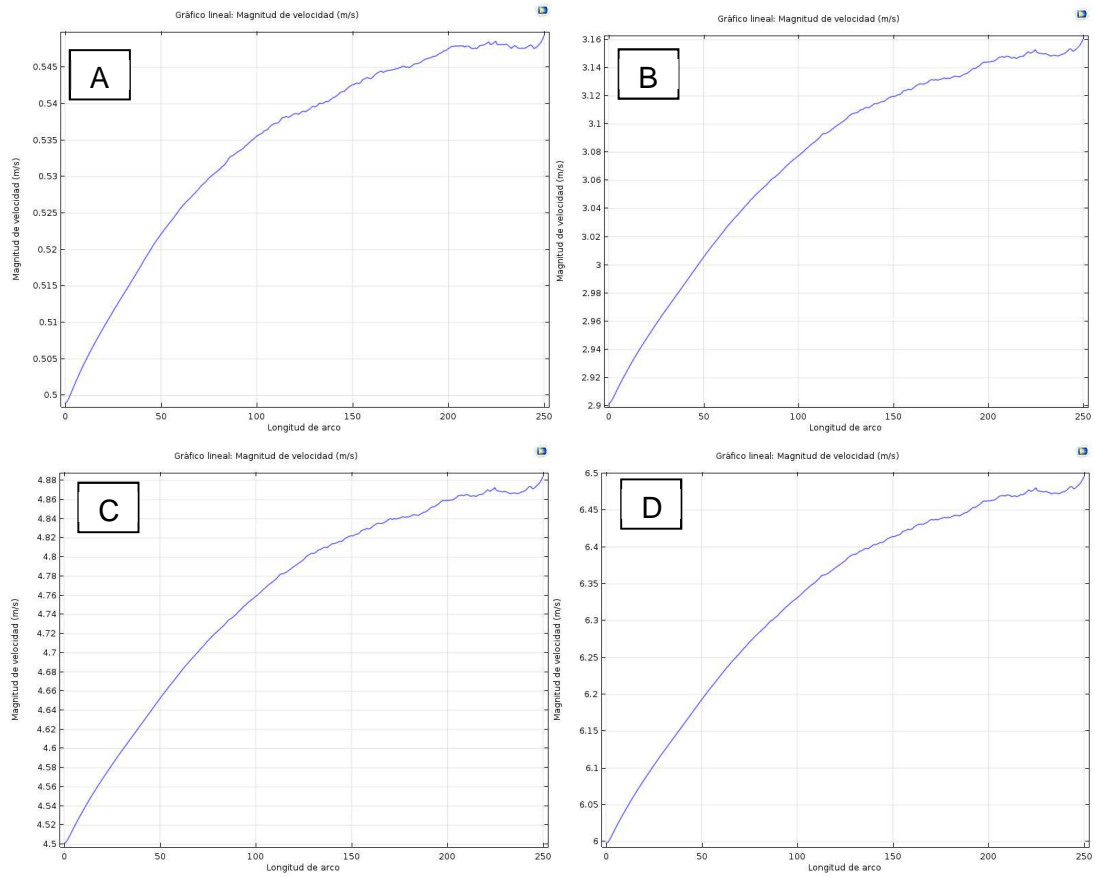


Figura 53: Gràfics velocitat (m/s) en l'eix respecte longitud per al cas 2D axisimètric de diàmetre 6m. Velocitat d'entrada 0.5 m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

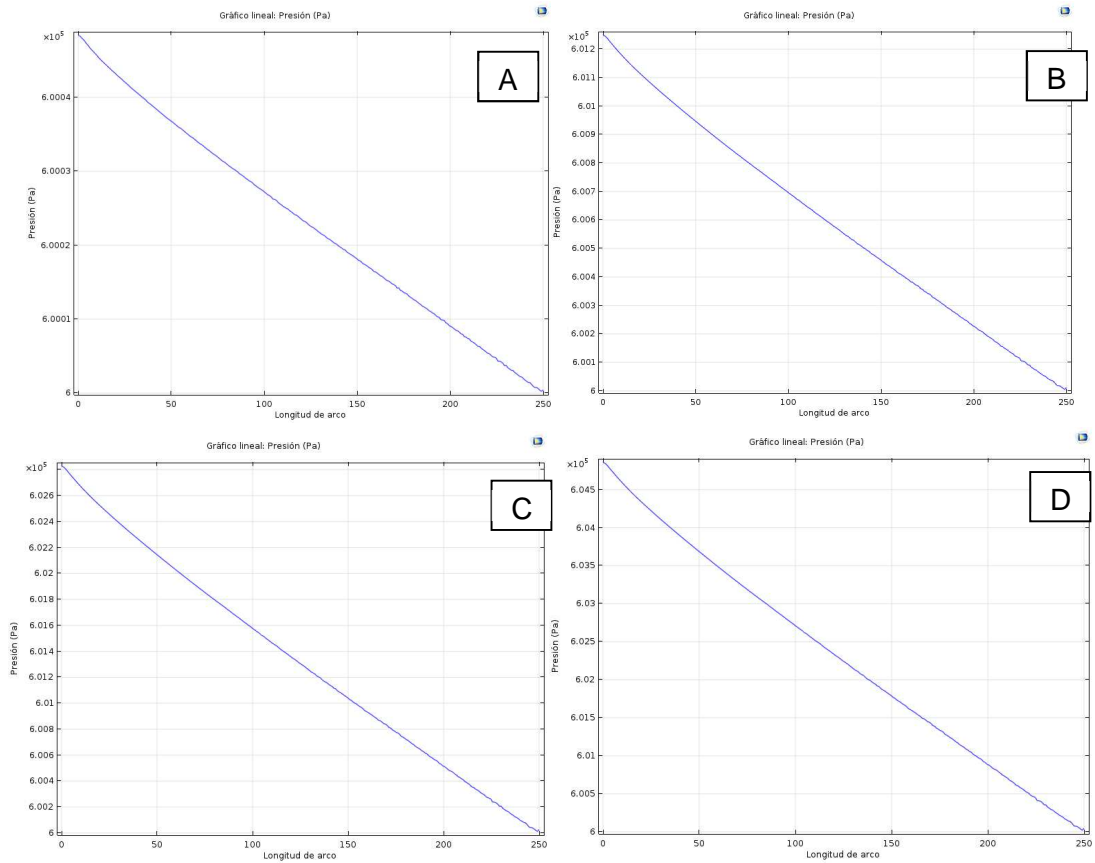


Figura 54: Gràfic pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del cas base axisimètric 2D de diàmetre 6m. Velocitat d'entrada 0.5 m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

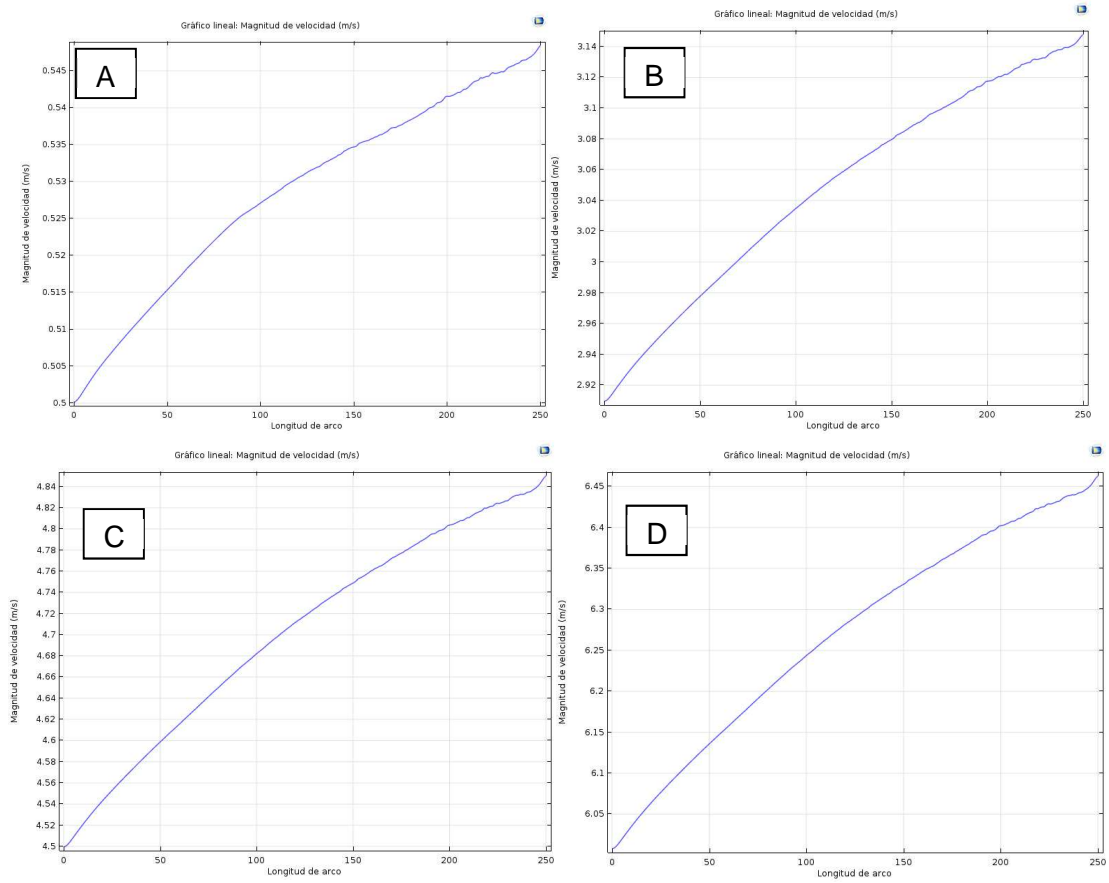


Figura 55: Gràfics velocitat (m/s) en l'eix respecte longitud per al cas 2D axisimètric de diàmetre 9m. Velocitat d'entrada 0.5 m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

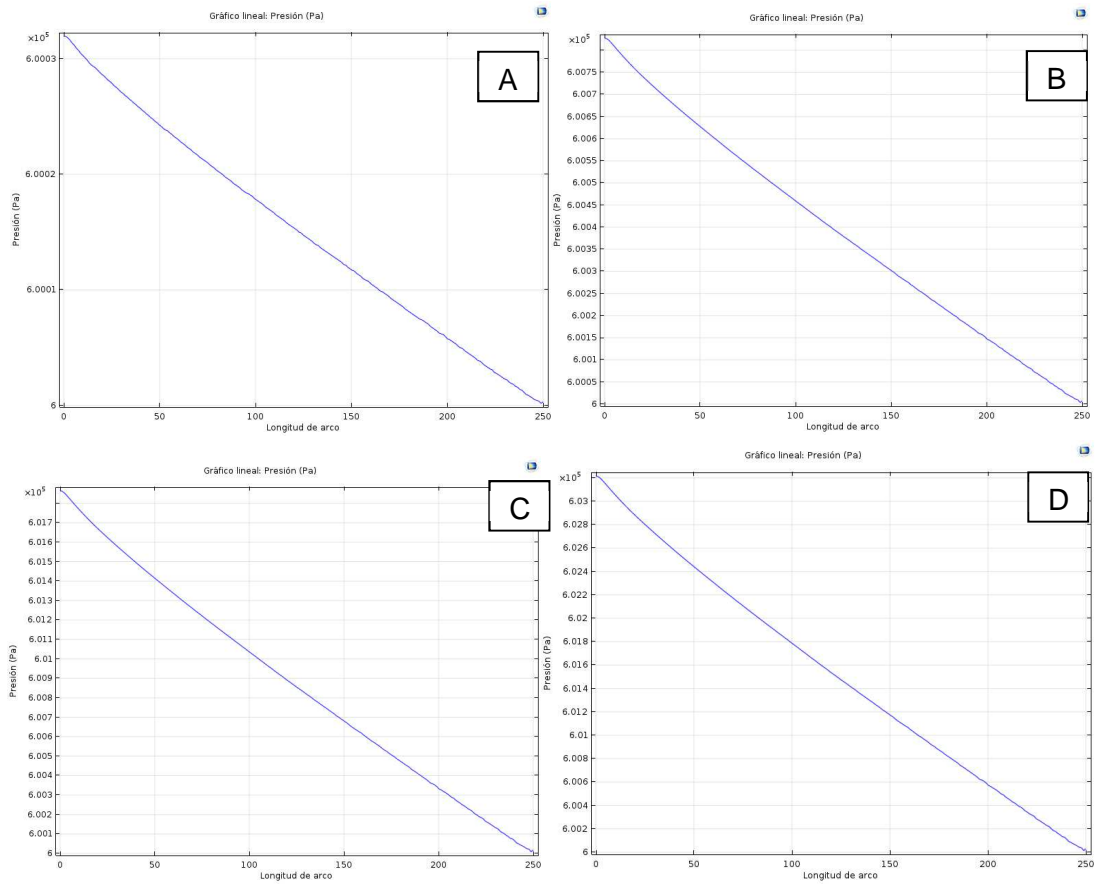


Figura 56: Gràfic pressió (Pa) en l'eix respecte la longitud del cas base axisimètric 2D de diàmetre 9m. Velocitat d'entrada 0.5 m/s (A), 2.9m/s (B), 4.5m/s (C) i 6m/s (D).

A.2 TAULES DE RESULTATS DELS MODELS 3D

En les següents taules es mostren els valors obtinguts per a tots els models 3D calculats.

Taula 17: Casos base del model 3D analitzats.

Cas Base	Velocitat en l'eix (m/s)		Diàmetre (m)
	Velocitat inicial 2D	Velocitat <i>output</i> del 2D i <i>input</i> del 3D	
I	0.5	0.55	3.5
II	2.9	3.15	3.5
III	4.5	4.86	3.5
IV	6	6.45	3.5
V	0.5	0.55	6
VI	2.9	3.15	6
VII	4.5	4.86	6
VIII	6	6.45	6
IX	0.5	0.55	9
X	2.9	3.15	9
XI	4.5	4.86	9
XII	6	6.45	9

Taula 18: Casos analitzats amb els model 3D.

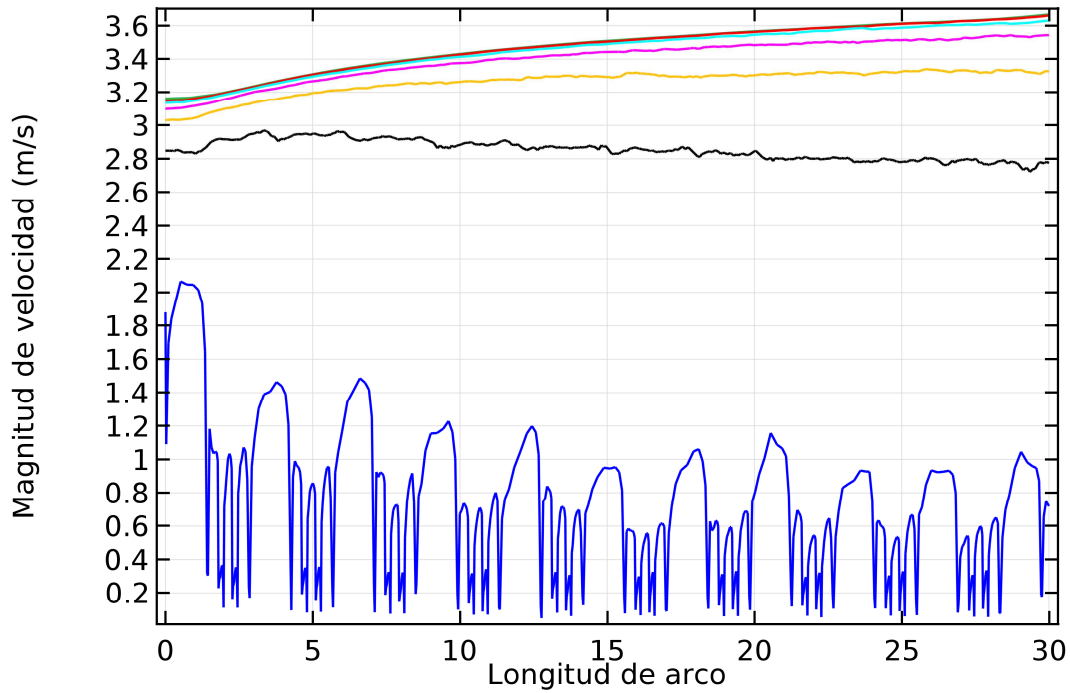
Cas	Velocitat en l'eix (m/s)		Diàmetre (m)	Longitud de l'anell (m)	Amplada de junta (mm)
	Velocitat inicial 2D	Velocitat <i>output</i> del 2D i <i>input</i> del 3D			
1	0.5	0.55	3.5	1	13
2	0.5	0.55	3.5	1.2	13
3	0.5	0.55	3.5	1.4	13
4	2.9	3.15	3.5	1	13
5	2.9	3.15	3.5	1.2	13
6	2.9	3.15	3.5	1.4	13
7	4.5	4.86	3.5	1	13
8	4.5	4.86	3.5	1.2	13
9	4.5	4.86	3.5	1.4	13
10	6	6.45	3.5	1	13
11	6	6.45	3.5	1.2	13
12	6	6.45	3.5	1.4	13
13	0.5	0.55	6	1.2	13
14	0.5	0.55	6	1.4	13
15	0.5	0.55	6	1.6	13
16	2.9	3.15	6	1.2	13
17	2.9	3.15	6	1.4	13
18	2.9	3.15	6	1.6	13
19	4.5	4.86	6	1.2	13
20	4.5	4.86	6	1.4	13
21	4.5	4.86	6	1.6	13

Cas	Velocitat en l'eix (m/s)		Diàmetre (m)	Longitud de l'anell (m)	Amplada de junta (mm)
	Velocitat inicial 2D	Velocitat <i>output</i> del 2D i <i>input</i> del 3D			
22	6	6.45	6	1.2	13
23	6	6.45	6	1.4	13
24	6	6.45	6	1.6	13
25	0.5	0.55	9	1.4	13
26	0.5	0.55	9	1.6	13
27	0.5	0.55	9	1.8	13
28	2.9	3.15	9	1.4	13
29	2.9	3.15	9	1.6	13
30	2.9	3.15	9	1.8	13
31	4.5	4.86	9	1.4	13
32	4.5	4.86	9	1.6	13
33	4.5	4.86	9	1.8	13
34	6	6.45	9	1.4	13
35	6	6.45	9	1.6	13
36	6	6.45	9	1.8	13
37	0.5	0.55	3.5	1	26
38	0.5	0.55	3.5	1.2	26
39	0.5	0.55	3.5	1.4	26
40	2.9	3.15	3.5	1	26
41	2.9	3.15	3.5	1.2	26
42	2.9	3.15	3.5	1.4	26
43	4.5	4.86	3.5	1	26
44	4.5	4.86	3.5	1.2	26
45	4.5	4.86	3.5	1.4	26
46	6	6.45	3.5	1	26
47	6	6.45	3.5	1.2	26
48	6	6.45	3.5	1.4	26
49	0.5	0.55	6	1.2	26
50	0.5	0.55	6	1.4	26
51	0.5	0.55	6	1.6	26
52	2.9	3.15	6	1.2	26
53	2.9	3.15	6	1.4	26
54	2.9	3.15	6	1.6	26
55	4.5	4.86	6	1.2	26
56	4.5	4.86	6	1.4	26
57	4.5	4.86	6	1.6	26
58	6	6.45	6	1.2	26
59	6	6.45	6	1.4	26
60	6	6.45	6	1.6	26
61	0.5	0.55	9	1.4	26
62	0.5	0.55	9	1.6	26

Cas	Velocitat en l'eix (m/s)		Diàmetre (m)	Longitud de l'anell (m)	Amplada de junta (mm)
	Velocitat inicial 2D	Velocitat <i>output</i> del 2D i <i>input</i> del 3D			
63	0.5	0.55	9	1.8	26
64	2.9	3.15	9	1.4	26
65	2.9	3.15	9	1.6	26
66	2.9	3.15	9	1.8	26
67	4.5	4.86	9	1.4	26
68	4.5	4.86	9	1.6	26
69	4.5	4.86	9	1.8	26
70	6	6.45	9	1.4	26
71	6	6.45	9	1.6	26
72	6	6.45	9	1.8	26

A.3 GRÀFICS DE VELOCITATS 3D PER A D=6M I 9M

A Gráfico lineal: Magnitud de velocidad (m/s)



B Gráfico lineal: Magnitud de velocidad (m/s)

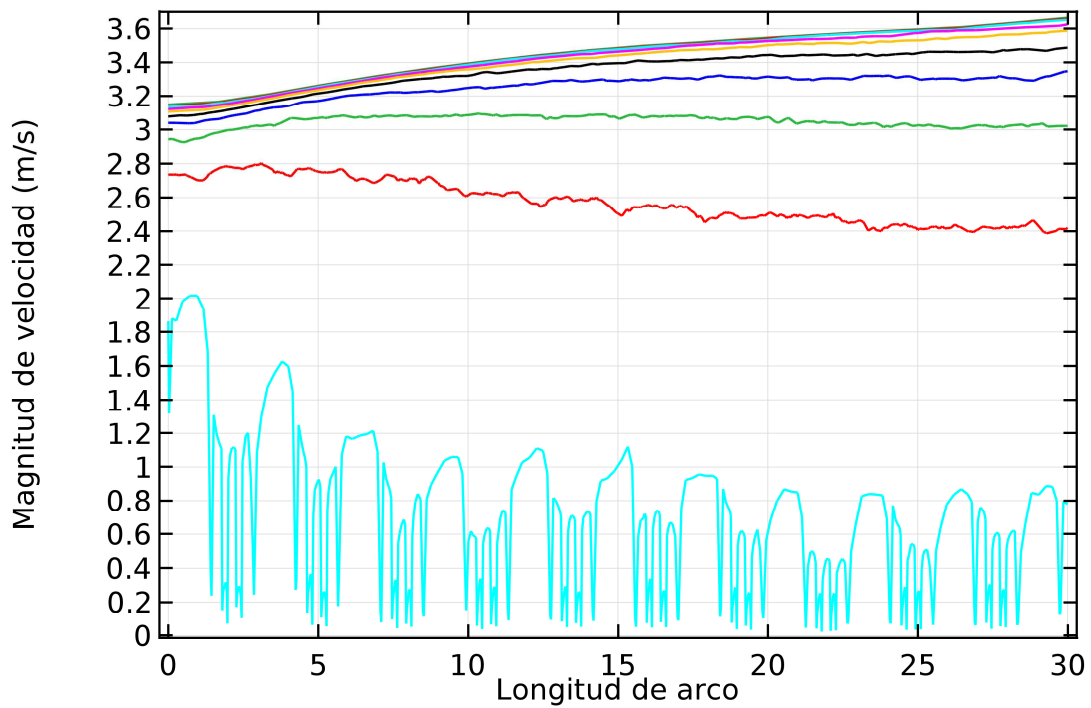


Figura 57: Gràfiques de velocitat per a D=6m (A) i D=9m (B).

A.3 GRÀFICS DE PRESSIONS 3D PER A D=6M I 9M

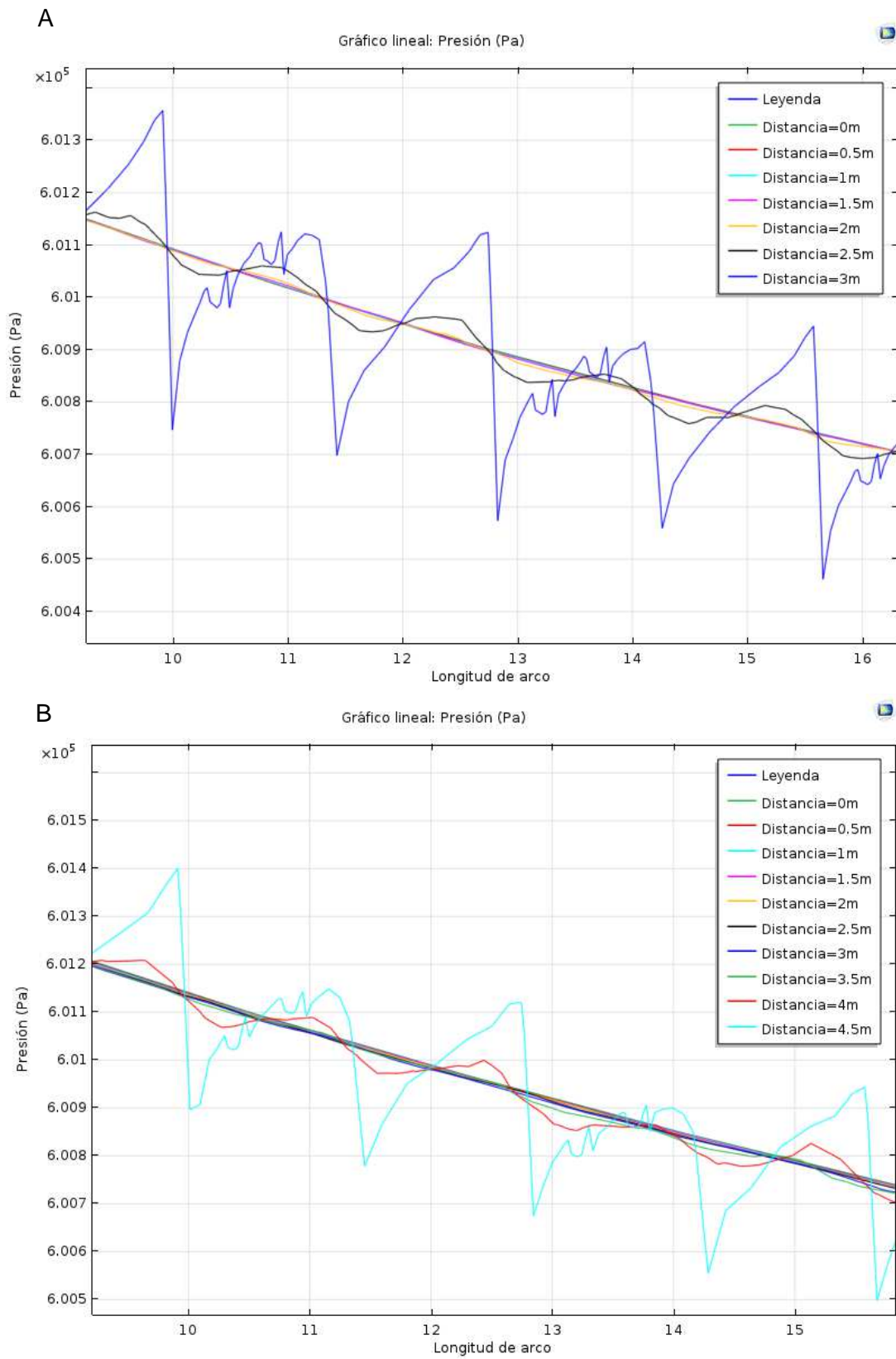


Figura 58: Gràfiques de pèrdues de pressió per a D=6m (A) i D=9m (B).