

Estudi del flux al voltant d'un cilindre

Simulació amb ANSYS Fluent

05/05/2016

UPC - ETSEIB

Arantxa Jaumejoan Bofill

Tutor: Esteve Jou



1. Resum

L'estudi del comportament del flux al voltant d'un cilindre, donada la senzillesa de la geometria, és un dels temes més tractats en la mecànica de fluids, ja que permet aprofundir en els conceptes de capa límit, equacions de Navier-Stokes, fluxos laminars i turbulents, nombre de Reynolds...

Així doncs, el principal objectiu d'aquest projecte és el de crear un document que permeti entendre tots aquests conceptes teòrics i també permeti endinsar-se en el món de les simulacions. És a dir, es vol crear un document que serveixi als alumnes a entendre tots aquests conceptes de mecànica de fluids.

Per tal de realitzar aquest document s'ha estudiat el comportament d'un fluid ideal al voltant d'un cilindre circular quan es fa variar la velocitat a la que circula aquest fluid, és a dir, quan es fa variar el nombre de Reynolds.

Per tal de realitzar aquest estudi s'ha utilitzat el software ANSYS Fluent, amb el qual s'han realitzat les diferents simulacions. S'ha realitzat un estudi unidimensional amb un fluid ideal que incideix perpendicularment sobre un cilindre i s'ha estudiat el valor del C_D en cada cas.

Finalment, s'inclou un anàlisi dels resultats obtinguts amb les simulacions i una comparació amb els resultats teòrics esperats.

2. Índex

1. RESUM	0
2. ÍNDEX	2
3. GLOSSARI	3
4. INTRODUCCIÓ	4
4.1 Objectius del projecte.....	4
4.2 Abast del projecte.....	4
5. CONCEPTES TEÒRICS	5
5.1 Evolució del flux.....	13
6. SIMULACIONS	18
6.1 Introducció a l'Ansys	18
6.2 CFD.....	20
7. IMPACTE AMBIENTAL	32
8. PRESSUPOST	33
CONCLUSIONS	35
AGRAÏMENTS	36
BIBLIOGRAFIA	37
Referències bibliogràfiques.....	37
Bibliografia complementària.....	37

3. Glossari

$St = \frac{f d}{V}$ Nombre de Strouhal : La freqüència adimensional

$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu}$ Nombre de Reynolds

$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] = [S]$ Viscositat cinemàtica

$\mu [Pa \cdot s] = \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] = \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = [P]$ Viscositat dinàmica

$C_D = \frac{D}{\frac{\rho V^2 S}{2}}$ Coeficient d'arrossegament (drag)

$C_L = \frac{L}{\frac{\rho V^2 S}{2}}$ Coeficient de sustentació (lift)

$Ma = \frac{V}{c}$ Nombre de Mach

Y^+ : distància normal a la paret adimensionalitzada

Φ : Funció dissipació viscosa

$\delta(x)$: Gruix de la capa límit

Θ_S : Angle de separació de la capa límit

Ψ : Funció de corrent

4. Introducció

L'estudi de la interacció entre un fluid i un cos submergit dins aquest és un tema molt estudiat dins de l'àmbit de la mecànica de fluids. Si ens centrem en el cas del flux al voltant d'un cilindre trobem que és un tema molt discutit i àmpliament estudiat tant de forma teòrica, experimental o mitjançant simulacions.

El flux perpendicular a l'eix d'un cilindre té moltes aplicacions pràctiques en àmbits de la meteorologia, astronomia o enginyeria. Alguns dels casos en que ens trobem aquest tipus de flux seria en els cables de l'electricitat i els pals de les llums, en els cables de suspensió d'un pont, en el flux d'aigua al voltant de les columnes submergides d'un pont o en els líquids i gasos refrigerants al voltant d'un banc de tubs d'un intercanviador de calor industrial.

4.1 Objectius del projecte

Els objectius definits per aquest projecte són els següents:

- Aprendre a utilitzar el software ANSYS Fluent per realitzar simulacions en 2D
- Estudiar el comportament del C_D en funció del nombre de Reynolds
- Aprofundir en els coneixements de la mecànica de fluids
- Redactar un treball que expliqui tots els conceptes bàsics, i per tant pugui ser entès per lectors que no siguin experts en el tema

4.2 Abast del projecte

El projecte que es redacta a continuació es pot dividir en dues parts diferents. Per una banda hi ha una part teòrica on es vol aprofundir en els coneixements de mecànica de fluids relacionats amb l'estudi de fluxos lliures al voltant de cossos submergits i on també es vol explicar el funcionament del programa utilitzat. Es a dir, es vol arribar a redactar un treball on el lector pugui entendre els conceptes que s'expliquen i acabi amb nocions bàsiques del tema.

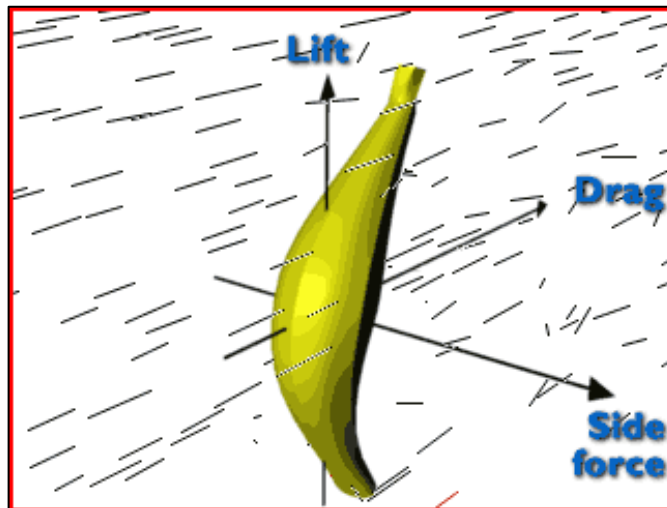
Per altra banda hi ha la part pràctica del projecte. Aquesta part consistirà en un seguit de simulacions per a diferents règims de flux, des de un flux laminar, a velocitats molt lentes, fins a un flux turbulent, amb un nombre de Reynolds de l'ordre de 10^7 , on s'estudiarà el valor del C_D en cada cas i es farà una comparativa amb els valors teòrics.

5. Conceptes teòrics

La mecànica de fluids estudia la cinemàtica i la dinàmica dels fluids, ja siguin líquids o gasos, davant de forces aplicades sobre ells. Una de les àrees més importants és l'estudi de la interacció entre un flux uniforme i un objecte submergit.

Tots els cossos submergits en un fluid experimenten diverses forces que es poden dividir en dues categories bàsiques. Per una banda hi ha les forces de pressió, que actuen perpendiculars a la superfície del cos, i per altra banda hi ha les forces de cisalla que actuen paral·lelament a la superfície del cos.

Si el cos té una forma i una orientació no simètrica, aquestes forces i moments que exerceix el fluid tenen components en les tres direccions de coordenades. Força d'arrossegament en l'eix paral·lel a la direcció del flux, força de sustentació en la direcció perpendicular al flux i que coincideix amb la direcció de la gravetat i per últim força lateral en una altra direcció perpendicular. Tot i això, normalment els cossos submergits en un fluid tenen un eix de simetria respecte al flux, i per tant la força lateral no apareix. Així doncs, les forces més importants a estudiar i entendre són la força d'arrossegament i la força de sustentació.



Imatge 1. Visualització de les forces

- Drag Force [F_D] = Força d'arrossegament

La força d'arrossegament és deguda a la interacció entre el flux i l'objecte submergit. És una força en la direcció oposada a la corrent que tendeix a oposar-se al moviment del cos. La següent fórmula ens permet calcular el valor d'aquesta força:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot A_P$$

On A_P és l'àrea projectada del cos en la direcció del flux.

Com es pot observar la força de resistència a l'avanç té associat un coeficient, anomenat coeficient d'arrossegament (C_D) que és adimensional.

La resistència a l'avanç es produeix per dos motius, per la força de fricció (fregament) i per la força de pressió (inèrcia). Per nombres de Reynolds baixos domina la força de fregament, i en canvi, per nombres de Reynolds alts domina la força d'inèrcia.

La força de fricció es deguda a la viscositat del fluid i actua tangencialment a la superfície del cos. Si es considera fluid no viscos aleshores no existeix.

La força d'inèrcia es deguda a la pressió que actua perpendicularment a la superfície del cos en tots els punts. Es pot considerar que es deguda per aquests factors:

-Resistència de forma: la forma d'un objecte produeix una determinada distribució de pressions degut a les velocitats locals que pot produir el desprendiment de la capa límit.

-Resistència induïda: Apareix degut a que sorgeix una força de sustentació causada per la forma particular del cos. Si hi ha angles d'atac alts es produeix més sustentació i en conseqüència més resistència induïda.

- Resistència deguda a la superfície: També anomenada efecte pell, és deguda al fregament aerodinàmic amb la superfície, entre les molècules d'aire i les de la superfície sòlida. Una superfície suau té menys resistència que una superfície rugosa.

- **Lift Force [F_L] = Força de sustentació**

La força de sustentació té una direcció perpendicular a la direcció del fluid. Aquesta força es deguda a la diferencia de pressions que hi ha en els dos costats d'un cos. En el cas estudiat en aquest treball aquesta força no té sentit ja que es tracta d'un cos simètric i sense rotació, així doncs no hi haurà diferencia de pressions.

Si el cos fos simètric respecte un eix que no té la mateixa direcció del fluid si que tindriem un component de força de sustentació.

La següent formula ens permet calcular el valor d'aquesta força:

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot A_P$$

Com es pot observar, en aquest cas també existeix un coeficient adimensional, anomenat coeficient de sustentació (C_L).

Es pot observar que tan el coeficient d'arrossegament com el coeficient de sustentació són funcions del nombre de Reynolds, el nombre de Mach i l'angle d'atac.

$$C_L = f_1(Re, M, \alpha) \qquad C_D = f_2(Re, M, \alpha)$$

El nombre de Reynolds és un paràmetre adimensional que ens indica si el flux és laminar o turbulent.

El nombre de Mach relaciona la velocitat del fluid amb la velocitat del so i ens permet determinar si un flux és supersònic, sònic o subsònic en funció de si és més gran, igual o més petit que 1. També en permet determinar si el flux és compressible o incompressible, comprovant si és més petit o més gran que 0,3.

L'angle d'atac és l'angle que es forma entre la direcció del flux i la corda del perfil del cos.

En aquest projecte el concepte d'angle d'atac no té sentit, ja que estem tractant amb un cos simètric respecte dos eixos de coordenades. Per tant els coeficients d'arrossegament i de sustentació ens dependran de la geometria del cos i de la velocitat del fluid.

Com he comentat abans el nombre de Reynolds ens serveix per determinar l'estat del flux. En l'estudi del flux al voltant d'un cilindre ens trobem dos Reynolds per als quals es produeix un canvi de laminar a turbulent. El primer canvi es produeix a $Re = 3000$ aproximadament, on el flux extern canvia de laminar a turbulent. El segon canvi es produeix per a $Re = 10^5$, on la capa límit fa la transició.

L'estudi del comportament d'un fluid en moviment depèn molt de que el fluid estigui o no sotmès a la influència de límits sòlids. Un fluid en moviment, que no és compressible i que no pateix esforços tallants s'anomena flux potencial. Dos característiques importants d'aquest tipus de flux són: primer, no pot haver circulacions ni remolins dins de la corrent, per tant també rep el nom de flux irrotacional; segon, no ha d'existir fricció i no pot haver transformació d'energia mecànica en calor.

Un principi fonamental de la mecànica de fluids, enunciat per Prandtl el 1904, és la teoria de la capa límit, que estableix que l'efecte de la superfície sòlida sobre el fluid està restringit a una capa del fluid situada a les proximitats de la paret. Aquesta capa s'anomena capa límit, i els esforços tallants o forces de cisallament, existeixen només en aquesta part del fluid, és a dir, fora de la capa límit encara ens trobem amb un flux potencial on els efectes de la viscositat són menyspreables i el fluid es pot suposar ideal.

Dins de la capa límit existeixen tres efectes importants:

- 1- Formació i creixement de la capa límit
- 2- Iniciació de la turbulència
- 3- Separació de la capa límit del contacte amb el límit del sòlid

La capa límit, com he comentat abans, es una zona del fluid propera a la superfície del cos on es concentren tots els esforços tallant i pot ser de dos tipus segons el règim en el que es trobi, capa límit laminar o capa límit turbulenta. El gruix d'aquesta capa va des de el punt on la velocitat és zero, és a dir, el punt que està en contacte amb la superfície del sòlid, fins al punt on la velocitat és igual a la velocitat de corrent lliure.

Com que la velocitat de la interfase sòlid - fluid és zero les velocitats properes a la superfície del sòlid seran obligatòriament petites, provocant que el flux en la part de la capa límit que està molt propera a la superfície sigui laminar.

A velocitats baixes els fluids tenen tendència a moure's sense que es produeixi cap barreja lateral, i les capes continues llisquen unes sobre les altres. Sorgirà una força de fricció entre les diferents capes, deguda al lliscament al que estan sotmeses per la diferencia de velocitats, que s'anomena resistència de fricció.

A velocitats superiors apareix la turbulència, formant-se remolins que provoquen una barreja transversal. Com que les partícules es mouen de forma caòtica i en totes direccions el gruix de la capa límit augmenta, i també augmenta la velocitat de les partícules. Això implica un augment de la resistència de fricció que s'ha explicat anteriorment.

A una distància més gran de la superfície les velocitats poden augmentar bastant, fet que pot provocar que la capa límit sigui turbulenta. Entre aquesta zona totalment turbulenta i la capa laminar hi ha una zona de caràcter intermedi anomenada zona de transició. Així doncs, la capa límit turbulenta es considera que té tres zones, una subcapa viscosa, la capa de transició i la zona turbulenta.

Hi ha casos de capa límit només laminar, però en la majoria de les situacions ens trobarem una capa límit combinada. Primer hi ha una zona laminar i després una zona turbulent.

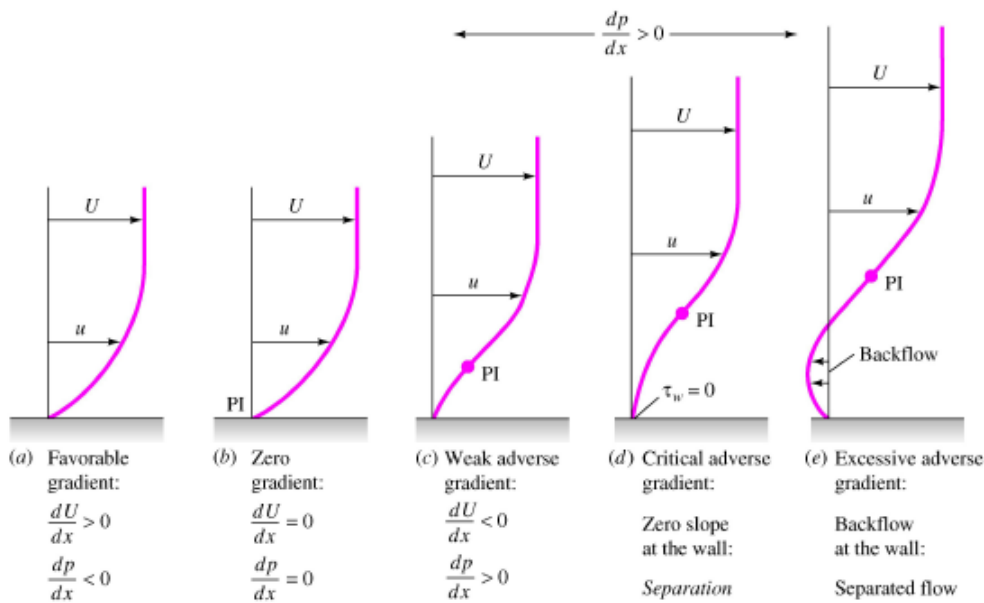
La separació de la capa límit té lloc quan la variació de velocitat del fluid, tant en magnitud com en direcció, és massa gran perquè el fluid pugui adherir-se a la superfície del sòlid. Això normalment succeeix quan existeix un canvi pronunciat en la conducció. Formant-se l'estela, una zona formada per un fluid que s'ha desacelerat, on es formen grans remolins anomenats vòrtexs. Aquests remolins es mantenen en moviment degut a les forces de cisalla, que existeixen entre l'estela i la corrent separada. Consumeixen una gran quantitat d'energia i poden donar lloc a grans pèrdues de pressió en el fluid.

Si ens centrem en el cas aquí estudiat, tractant amb un cos rom com es un cilindre trobarem les següents característiques.

Primer ens hem de fixar en el comportament del flux al voltant del cilindre, assumint que es tracta d'un fluid no viscos. La velocitat va des d'un valor mínim de zero al punt d'estancament (o punt d'impacte) fins a un valor màxim a la part superior, i les pressions relatives van des d'una pressió màxima i positiva al punt d'estancament fins a un valor nul i després esdevenen negatives, fins a un valor màxim a la part superior del cilindre. A partir de la part superior la pressió comença a augmentar i la velocitat a disminuir. Quan la velocitat és màxima ha de ser suficientment gran com per vèncer el gradient de pressions advers. Si el fluid no tingués viscositat així seria; però en un fluid real, degut a la viscositat, existeix fricció. De forma que la velocitat de les partícules va disminuint, fins un punt on les pressions són superior i llavors es produirà el desprendiment de la capa límit de la superfície del cilindre. Aquest desprendiment es produeix en forma de vòrtexs que fan que existeixi una estela turbulenta darrere del cos. Aquesta estela s'anirà esmorteint fins arribar a desaparèixer a una certa distància degut als efectes de la viscositat.

Respecte a la diferència en quant al desprendiment d'una capa límit laminar o turbulenta, trobem que el desprendiment té lloc després en una capa límit turbulenta que en una laminar, degut a que en aquesta, les velocitats de les partícules dins de la capa límit són superiors.

A la següent imatge es pot veure com al punt d el gradient de pressions es igual a la velocitat, així doncs, en aquest punt comença el desprendiment de la capa límit.



Imatge 2. Velocitat en funció del gradient de pressions

Les equacions fonamentals necessàries per a resoldre el problema de forma teòrica són les següents:

- Equació de conservació de la massa o de continuïtat (Primer escrita de forma vectorial i després en coordenades cartesianes):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0$$

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

- Equacions de la quantitat de moviment, també anomenades equacions de Navier-Stokes (També escrita de forma vectorial i en coordenades cartesianes):

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho \cdot g - \nabla P + \nabla \tau_{ij}$$

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

- Equació de l'energia:

$$\rho \frac{du}{dt} + P(\nabla \cdot V) = \nabla(k\nabla T) + \phi$$

Les hipòtesis considerades són les següents:

- Estudi de flux unidimensional

- Fluid Newtonià. És aquell fluid on el gradient de velocitats és proporcional a l'esforç tallant. La constant de proporcionalitat és la viscositat que es defineix mitjançant aquesta equació:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

També cal tenir en compte les relacions resultants esforç - velocitat de deformació per a un fluid Newtonià, que són les següents:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

- Fluid incompressible (ρ constant)

- Flux irrotacional

Si ens centrem en un cas on el $Re \ll 1$, com per exemple en el cas de $Re = 0,1$, ens trobem amb un flux laminar anomenat flux Stokes. La hipòtesi bàsica d'un flux de Stokes és que els termes d'inèrcia són menyspreables a l'equació del moviment.

Ens trobem amb un cas de flux laminar, estacionari i viscos, on també es pot menysprear la gravetat, ja que només és important en capes límits on la flotabilitat és dominant. Així doncs és pot simplificar l'equació de Navier-Stokes, obtenim la següent equació:

$$\nabla P = \mu \nabla^2 v$$

Si també calculem la divergència de l'expressió anterior s'obté:

$$\nabla^2 P = 0$$

Per a un flux en 2D mitjançant la funció de corrent (stream function, ψ) podem resoldre l'equació a dalt especificada i l'equació de continuïtat.

Type of motion	Coordinate system	Velocity components	Differential equations for ψ which are equivalent to the Navier-Stokes equation ^b	Expressions for operators
Two-dimensional (planar)	Rectangular with $v_z = 0$ and no z-dependence	$v_x = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$ $v_y = +\frac{\partial \psi}{\partial x}$	$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \psi) + \frac{\partial(\psi, \nabla^2 \psi)}{\partial(x, y)} = \nu \nabla^4 \psi$ (A)	$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ $\nabla^4 \psi = \nabla^2 (\nabla^2 \psi)$ $= \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) \psi$
	Cylindrical with $v_z = 0$ with no z-dependence	$v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ $v_\theta = +\frac{\partial \psi}{\partial r}$	$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \psi) + \frac{1}{r} \frac{\partial(\psi, \nabla^2 \psi)}{\partial(r, \theta)} = \nu \nabla^4 \psi$ (B)	$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$
Axisymmetrical	Cylindrical with $v_\theta = 0$ and no θ -dependence	$v_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ $v_r = +\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$	$\frac{\partial}{\partial t} (E^2 \psi) - \frac{1}{r} \frac{\partial(\psi, E^2 \psi)}{\partial(r, z)} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} E^2 \psi = \nu E^4 \psi$ (C)	$E^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ $E^4 \psi = E^2(E^2 \psi)$
	Spherical with $v_\phi = 0$ and no ϕ -dependence	$v_r = -\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ $v_\theta = +\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r}$	$\frac{\partial}{\partial t} (E^2 \psi) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial(\psi, E^2 \psi)}{\partial(r, \theta)}$ $- \frac{2E^2 \psi}{r^2 \sin^2 \theta} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \cos \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \sin \theta \right) = \nu E^4 \psi$ (D)	$E^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\sin \theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$

Taula 1. Equacions per la funció de corrent

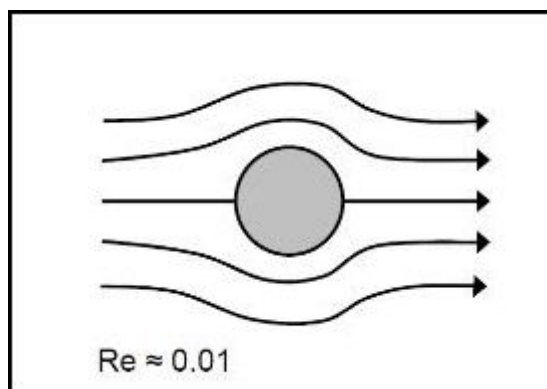
5.1 Evolució del flux

L'estudi del flux al voltant d'un cilindre és un fenomen molt discutit a la mecànica de fluids. Així doncs hi ha nombrosos estudis, tant teòrics (de simulació i de càlculs manuals) com pràctics (a túnels de vent), que tracten aquest tema.

Per tal de realitzar les simulacions adequades primer s'ha realitzat un estudi dels diferents règims de flux que ens podem trobar quan es va augmentant el valor del nombre de Reynolds, començant per un valor molt proper a 0 fins a valors de Reynolds de l'ordre de 10^7 . Aquí es diferencien explicant les principals característiques de cada cas:

Re \rightarrow 0

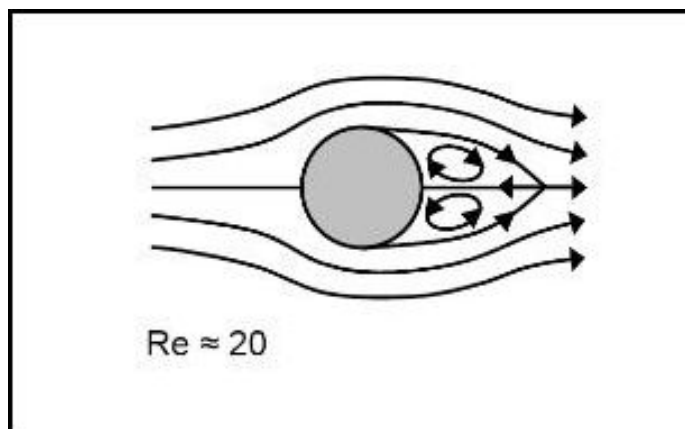
Quan el Reynolds té valors molt propers a zero, és a dir, quan la velocitat del fluid incident és molt petita ens trobem en un règim de flux viscos on els efectes de les forces d'inèrcia són mínims, anomenant també flux Stokes. En aquest règim no es produeix un despreniment del flux i les línies de corrent estan enganxades al cilindre i són simètriques. Es tracta d'un comportament ideal, ja que a la realitat sempre es produeix una separació de la capa límit, per mínima que sigui.



Imatge 3. Flux laminar al voltant d'un cilindre

3 < Re < 40

Per aquest interval de valors ens trobem un flux en règim laminar amb separació a la part de darrera del cilindre. Es tracta d'un flux constant amb una estela on es formen dos vòrtex simètrics que van augmentant de mida conforme augmenta la velocitat del flux incident.



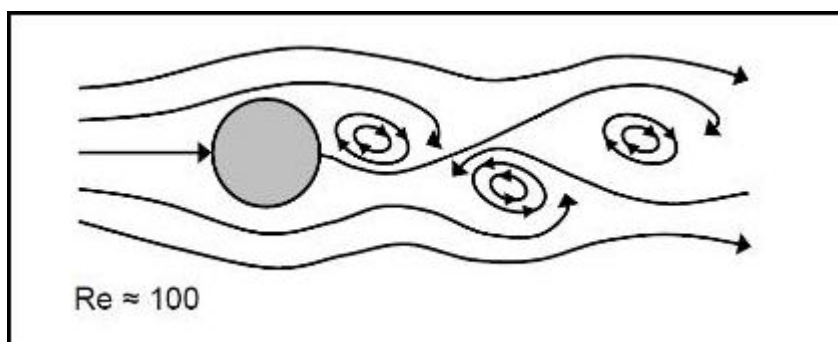
Imatge 4. Flux laminar al voltant d'un cilindre amb vòrtexs simètrics

$40 < Re < 90$

Per a valors de Reynolds entre 40 i 90 aproximadament ens trobem amb un règim de flux laminar amb un estela inestable on els vòrtex, que abans eren simètrics i estaven enganxats al cilindre, es comencen a separar del cos de forma irregular; començant a formar els vòrtexs de Von Karman.

$90 < Re < 150$

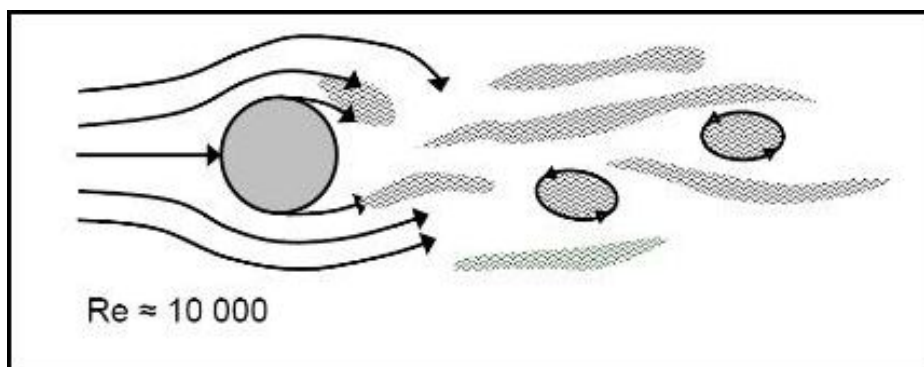
Per aquest interval ens trobem amb un flux en règim laminar amb els del vòrtexs de Von Karman completament desenvolupats.



Imatge 5. Flux laminar al voltant d'un cilindre amb vòrtexs de Von Karman

$150 < Re < 10^5$

Quan el nombre de Reynolds augmenta a grans xifres ens trobem encara un règim de flux laminar amb una estela on els vòrtex de Von Karman esdevenen turbulents. Formant una clara estela darrere del cilindre.



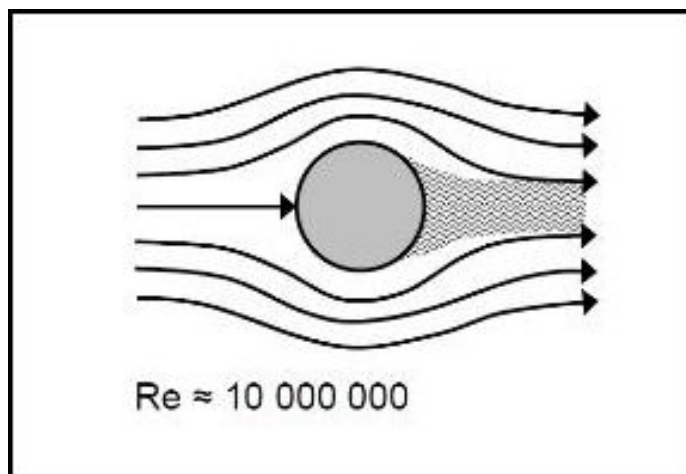
Imatge 6. Flux laminar al voltant d'un cilindre amb vòrtexs esdevenint turbulents

 $10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$

En aquest interval de valors del Reynolds la separació de la capa límit laminar té lloc a la part del davant del cilindre. No obstant, a la part superior de la regió separada, es dona lloc a la transició a flux turbulent. Aquesta transició a flux turbulent i la corresponent estela més estreta, redueix el coeficient de resistència a l'avanç al cilindre i és responsable de la disminució de C_D a $Re = 3 \cdot 10^5$.

 $3 \cdot 10^6 < Re$

Per a nombres de Reynolds superiors a $3 \cdot 10^6$ ens trobem en un règim supercrític on la capa límit esdevé directament turbulenta en algun punt de la part davantera del cilindre i es produeix la separació d'aquesta capa límit en la part posterior del cilindre, aproximadament a un angle de 115° . En aquest règim de flux la separació de la capa límit es produeix en punts més propers a la part superior i inferior del cilindre, provocant una estela més gran i en conseqüència una resistència més elevada. Així doncs el coeficient d'arrossegament augmenta amb l'increment del Re fins que els punts de separació de la capa límit ja no varien, llavors per molt que augmenti el nombre de Reynolds el C_D es mantindrà estable.



Imatge 7. Flux turbulents al voltant d'un cilindre

A la següent taula [1] es pot observar un resum de tots els casos de flux aquí explicats i els valors de les principals característiques. Per a l'estudi d'aquest projecte es interessant conèixer el valor del nombre de Reynolds i el valor del coeficient d'arrossegament en cada una de les categories definides anteriorment, per tal de poder comparar resultats experimentals i de simulació.

Reynolds number regime	Flow regime	Flow characteristic	Strouhal number Sr	Drag coefficient C_D	Separation angle Θ_S
$Re \rightarrow 0$	Creeping flow	Steady, no wake	-		-
$3 < Re < 40$	Vortex pairs in wake	Steady, symmetric separation	-	$1,59 < C_D < 4,52$	$130^\circ < \Theta_S < 180^\circ$
$40 < Re < 90$	Onset of Karman vortex street	Laminar, unstable wake	-	$1,17 < C_D < 1,59$	$115^\circ < \Theta_S < 130^\circ$
$90 < Re < 150$	Pure Karman vortex street	Karman vortex street	$0,14 < Sr < 0,21$	-	-
$150 < Re < 10^5$	Subcritical regime	Laminar, with vortex street in stabilities	$Sr = 0,21$	$C_D \approx 1,2$	$\Theta_S \approx 80^\circ$
$10^5 < Re < 3,5 \cdot 10^6$	Critical regime	Laminar separation. Turbulent reattachment. Turbulent separation. Turbulent wake.	No preferred frequency	$0,2 < C_D < 1,2$	$80^\circ < \Theta_S < 140^\circ$
$3,5 \cdot 10^6 < Re$	Super critical regime (transcritical)	Turbulent separation	$0,25 < Sr < 0,30$	$C_D \approx 0,6$	$\Theta_S \approx 115^\circ$

Taula 2. Flow regime past a circular cylinder (incompressible flow)

6. Simulacions

6.1 Introducció a l'Ansys

Per realitzar la part del projecte de simulació del flux al voltant d'un cilindre s'ha utilitzat el software ANSYS Fluent. Hi ha molts programes desenvolupats per a dur a terme problemes de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), i aquest és un dels més coneguts i més utilitzats en el món de la mecànica de fluids.

L'Ansys és un paquet computacional d'elements finits amb propòsit genèric. L'anàlisi pels elements finits és el mètode numèric de subdividir un sistema complet en petites peces de mida seleccionada per l'usuari, anomenades elements. El software implementa les equacions diferencials que governen els fenòmens de transport, i per tant el comportament d'aquests elements, i les soluciona simultàniament; creant llavors una explicació compressible de com el sistema actua conjuntament. Els resultats obtinguts poden visualitzar-se en forma de taula, amb gràfiques o amb alguna animació. Aquest tipus d'anàlisi s'utilitza principalment per al disseny i la optimització així com per a l'estudi i la investigació de sistemes tals que el seu nivell de complexitat fa que la seva solució manual sigui pràcticament impossible. Els sistemes que s'ajusten a aquesta descripció presenten aquests nivells de complexitat degut a la seva geometria, a l'escala o a l'acoblament de les equacions diferencials que els governen.

L'ANSYS és un software de simulació que funciona utilitzant mètodes numèrics. El Fluent és una extensió d'aquest software que funciona especialment per resoldre problemes on es vol estudiar el comportament del fluid.

El programari ANSYS Fluent conté àmplies característiques de modelatge físic que s'utilitzen per modelar fluxos, turbulències, transferències de calor i reaccions per a aplicacions industrials. Com per exemple el flux d'aire sobre l'ala d'un avió, la combustió en un forn, el flux de la sang, la fabricació de semiconductors i el disseny de plantes de tractament d'aigües residuals entre molts altres usos.

L'avançada tecnologia desenvolupada sobretot en els últims anys ofereix resultats CFD ràpids i precisos, malles flexibles, en moviment i deformables. Les funcions definides per l'usuari permeten la implementació de nous models d'usuari i una àmplia personalització dels existents. Les característiques interactives d'ajust, solució i post-processament del resoldre de ANSYS Fluent faciliten fer pauses en un càlcul, examinar els resultats amb el post-processat integrat, realitzar canvis i ajustos, i després continuar amb el càlcul dins de la mateixa aplicació.

Per a modelar fluxos turbulents el programa utilitza models d'aproximació de la turbulència RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes). Són els models més utilitzats pels enginyers. Són les mateixes equacions de Navier-Stokes definides anteriorment, però on la velocitat, la pressió i les altres variables escalars es descomponen en dues parts, la mitjana i un valor degut a les fluctuacions. També apareixen uns valors que representen els efectes de la turbulència. Aquestes tensions de Reynolds, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, s'han de modelar per definir per complet les equacions.

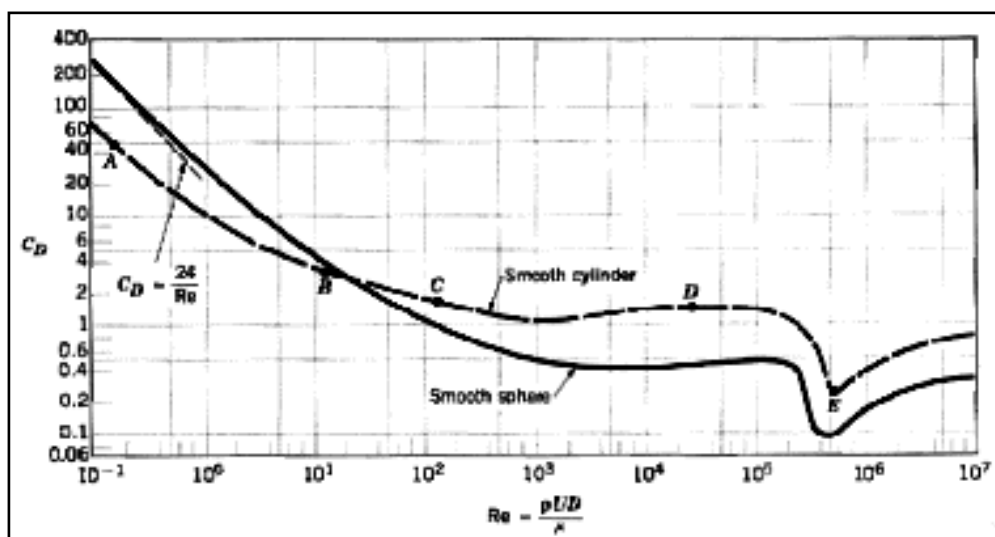
Per tal de modelar aquests termes que apareixen en els fluxos turbulents l'Ansys disposa de diferents models per a els diferents casos que ens podem trobar.

Com s'ha comentat a dalt, l'Ansys Fluent és un software de simulació molt complet que segueix la següent estructura:

- Pre-processor per la generació i el modelat de geometries, generació de malles basades en blocs estructurats, generació de malles de superfícies no estructurades triangulars, generador de malles tetragonals en 3D i triangulars en 2D: Gambit.
- Processor o solver. Aquest és el nucli del programa i s'encarrega de la resolució de les equacions que modelen el problema: Fluent.
- Post-Processor: S'encarrega de representar els resultats i de generar taules i diagrames: Fluent.

6.2 CFD

Com s'ha dit anteriorment es vol estudiar el flux al voltant d'un cilindre quan va augmentant la velocitat. Així doncs s'ha decidit estudiar el valor del coeficient d'arrossegament en funció del nombre de Reynolds. Es vol aconseguir representar la gràfica que es veu a continuació, per això es realitzaran diferents simulacions variant el nombre de Reynolds.

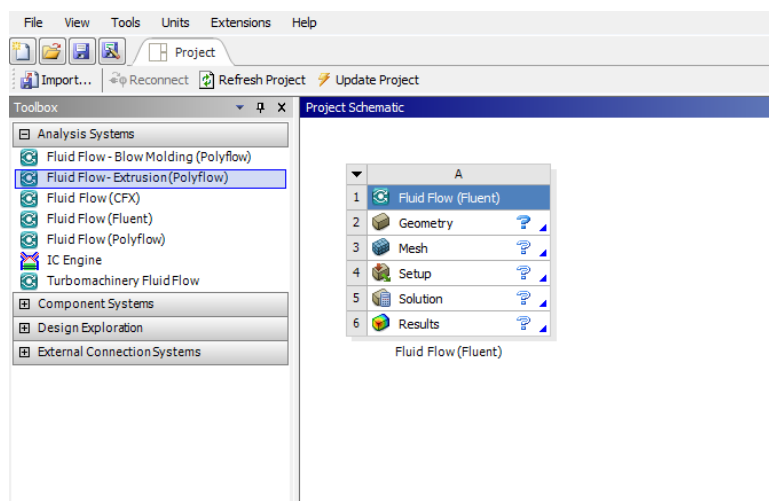


Imatge 8. Gràfic $C_D - Re$ amb valors experimental^[2]

PRE PROCÈS

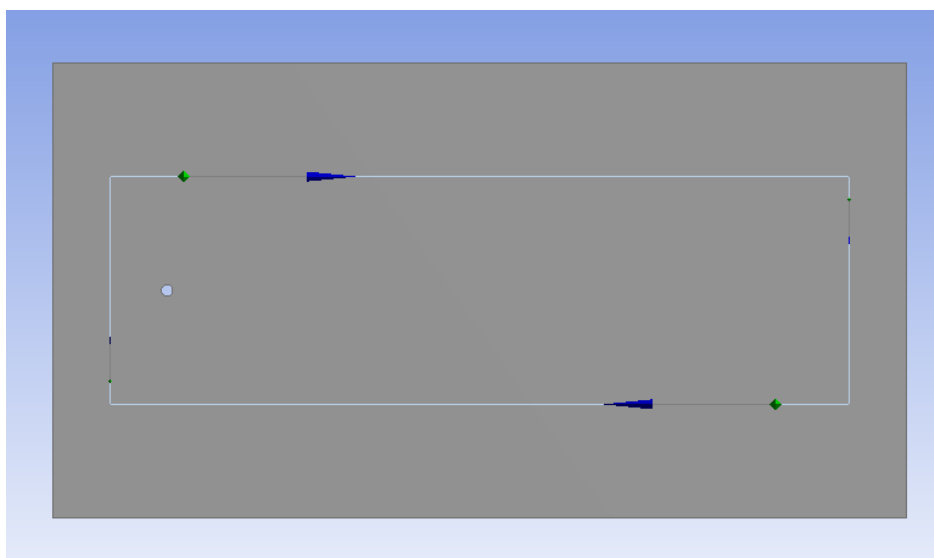
S'ha utilitzat la plataforma AnsysWorkbench (la versió 16.2), que permet crear un projecte de simulació complet. El primer pas es crear un nou projecte de Fluent amb la opció Fluid Flow. Un cop definit el projecte ens apareix un menú amb 5 punts que hem d'anar seguint en l'ordre indicat:

Geometria, mallat, simulació, solucions i resultats.



Imatge 9. Projecte al Workbench 16.2

Després hem de definir la geometria. S'ha considerat un cilindre de diàmetre igual a 0,1m ja que es vol aconseguir un flux laminar a l'inici, per tant necessitem un fluid amb gran viscositat i un cos petit. S'han fixat els límits del rectangle prou lluny com perquè no afectin als resultats de les simulacions. És un rectangle molt gran respecte al cilindre però és necessari ja que un dels problemes més comuns al realitzar simulacions és no agafar els límits prou lluny i que llavors intervinguin en els resultats obtinguts provocant que aquest no siguin vàlids, es a dir, que no reflecteixin la realitat que es vol simular. A la imatge també es pot veure que s'ha creat rectangle més petit dins, més endavant s'explicarà la funció que tindrà.



Imatge 10. Geometria definida

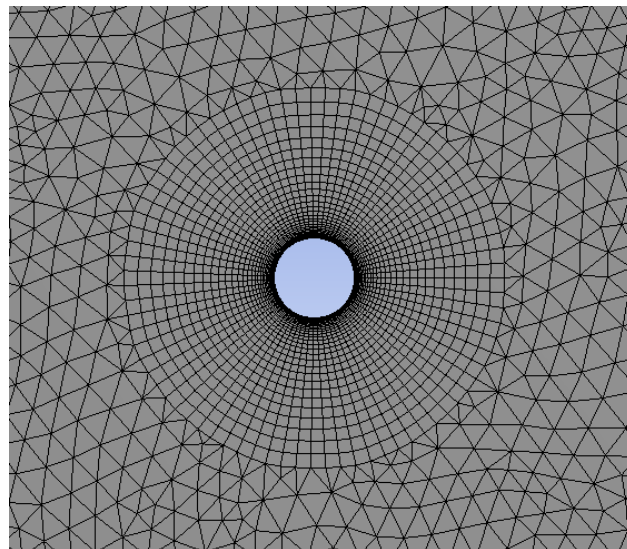
El següent pas és mallar la geometria i realitzar un estudi i refinament d'aquest mallat. Primer es realitza un mallat bàsic a tota la geometria amb la opció de mallat normal. S'han escollit elements triangulars per a realitzar el mallat. Després s'ha refinat tota la zona del voltant del cilindre ja que és una zona on es produiran grans canvis de velocitats en molt poc espai ja que és on es formarà la capa límit. Així doncs ens interessa obtenir informació de tots aquests punts. S'ha realitzat aquesta operació mitjançant l'eina 'inflation', que crea un mallat quadrat i molt fi al voltant de tot el cilindre.

Per definir el gruix d'aquest refinament s'ha utilitzat una eina online que, entrant els valors desitjats, et calcula el valor del gruix de la primera cel·la i et permet calcular el nombre total de cel·les necessàries.

Y+ Wall Distance Estimation

Input	
Freestream velocity:	<input type="text" value="0.007"/> [m/s]
Density:	<input type="text" value="891"/> [kg/m ³]
Dynamic viscosity:	<input type="text" value="0.29"/> [kg/ms]
Boundary layer length:	<input type="text" value="0.1"/> [m]
Desired Y+ value:	<input type="text" value="1"/> []
Output	
Reynolds number:	<input type="text" value="2.2e+0"/> []
Estimated wall distance:	<input type="text" value="5.3e-4"/> [m]
<input type="button" value="Estimate Wall Distance"/>	

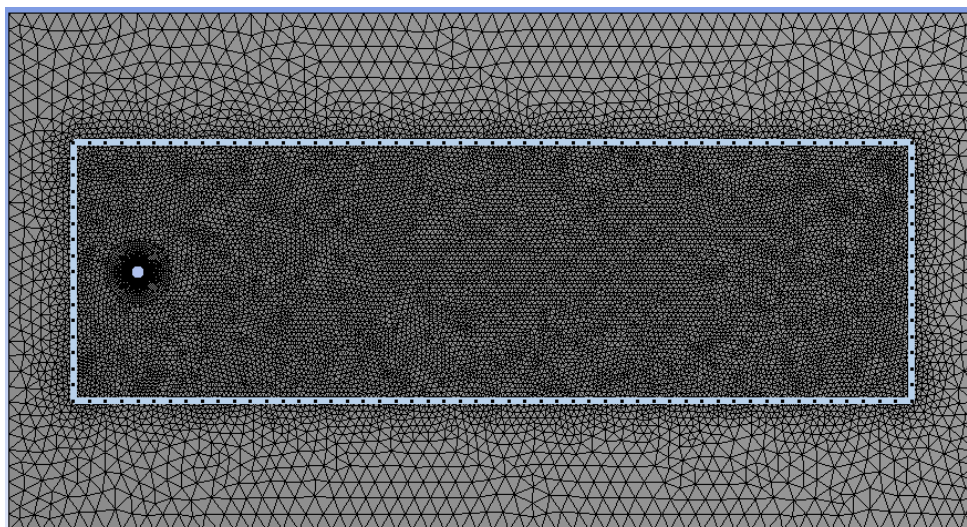
Imatge 11. Càlcul de Y+



Imatge 12. Mallat al voltant del cilindre

Finalment també s'ha volgut estudiar amb més detall tota la zona de darrere del cilindre, que és on es formarà l'estela quan tinguem fluxos turbulents. Per realitzar això s'ha creat una geometria rectangular a la zona de l'estela, que s'ha vist a l'apartat anterior, i seleccionant els quatre costats amb l'eina de 'facesizing' s'ha definit la mida dels elements de l'interior d'aquesta geometria.

S'han realitzat proves amb mallats cada cop més refinats fins arribar al mallat més bast on els valors obtinguts no patien canvis significatius. Ja que ens interessa tenir un mallat prou fi per realitzar les simulacions de forma correcta però sense refinar-lo en excés, per tal d'optimitzar el temps de càlcul i la quantitat de memòria RAM demanada al sistema operatiu.



Imatge 13. Mallat final

SIMULACIÓ

Fins aquí el procés ha sigut el mateix per a totes les simulacions; el següent pas consta en definir tots els paràmetres necessaris per fer les simulacions, així doncs, per a cada cas s'han anat canviant els valors. Tot i això podem definir tres casos principals: Simulacions de flux laminar, simulacions de flux en estat de transició, simulacions de flux turbulent. En aquest apartat apareix un menú a l'esquerra de l'Ansys que s'ha d'anar seguint per tal d'afegir totes les característiques de la simulació i de la visualització dels resultats.

1. General: aquí definirem el temps, si es constant o transitori. Per a les simulacions on es generen els vòrtex de Von Karman s'ha de definir un temps transitori. En els altres casos un temps constant, en un principi, és correcte.
2. Models: Aquí s'ha de definir el model que es vol utilitzar. Per a les simulacions de flux laminar s'escull el model anomenat "viscous-laminar". Per a les simulacions en transitori i en turbulent s'escull el model k- ϵ , un model de dues equacions molt robust i que funciona de forma acurada per a un rang de valors molt ampli.
3. Materials: En aquest pas s'ha de definir el fluid utilitzat. En aquest cas s'ha utilitzat oli SAE 20. S'ha definit la densitat (891 kg/m^3) i la viscositat ($0,29 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$).
4. Boundary Conditions: Aquí es seleccionen les condicions de contorn. Per a la part superior i inferior del rectangle s'ha seleccionat la opció de simetria, a la part de l'esquerra es defineix la velocitat de corrent lliure (velocity inlet), que s'anirà augmentant conforme es vagin fent diferents simulacions, i a la part de la dreta es defineix la pressió igual a la pressió atmosfèrica (pressure outlet).
5. Reference Values: Aquí s'ha de definir l'àrea frontal del cos, amb el diàmetre del

cilindre de 0,1 m.

6. Solution Initialization: S'ha de definir el valor amb el qual començarà a iterar les simulacions. Per obtenir un valor aproximat s'agafa com a valors inicials els valors definits a l'entrada del rectangle.
7. Monitors: Aquí definim els resultats que volem que es mostrin per pantalla. Ens interessa veure els gràfics del C_D i C_L , i per defecte també ens sortiran els residus.
8. Run Calculation: Definim el nombre d'iteracions i l'interval de temps entre elles.

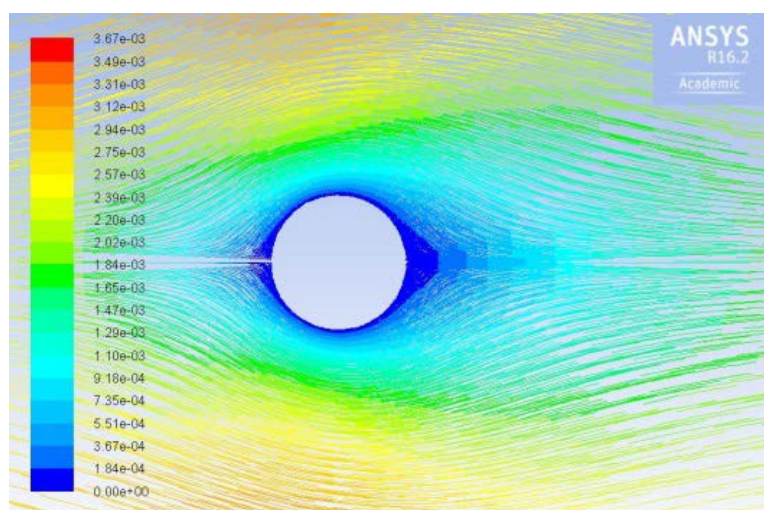
Els paràmetres que no s'han explicat en aquest llistat és perquè no s'han modificat, és a dir, s'han deixat els paràmetres que venen per defecte definits al programa.

POST PROCÈS

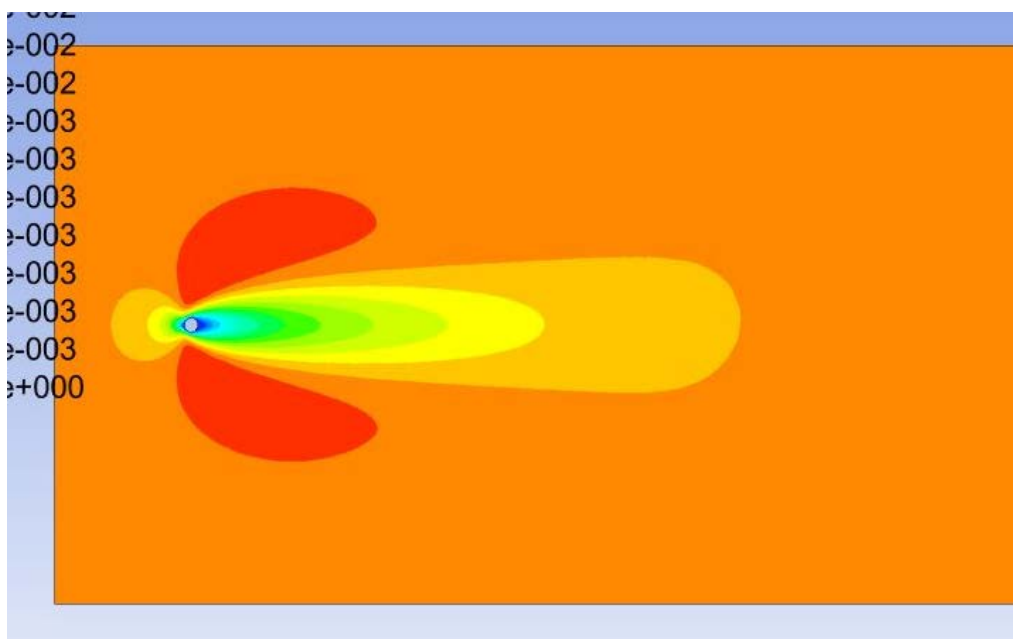
Un cop realitzades les simulacions es realitza el post procés i la visualització dels resultats obtinguts en cada cas. Per tal de comparar les simulacions amb la teoria explicada anteriorment a continuació es mostra un cas de cada interval:

Re → 0

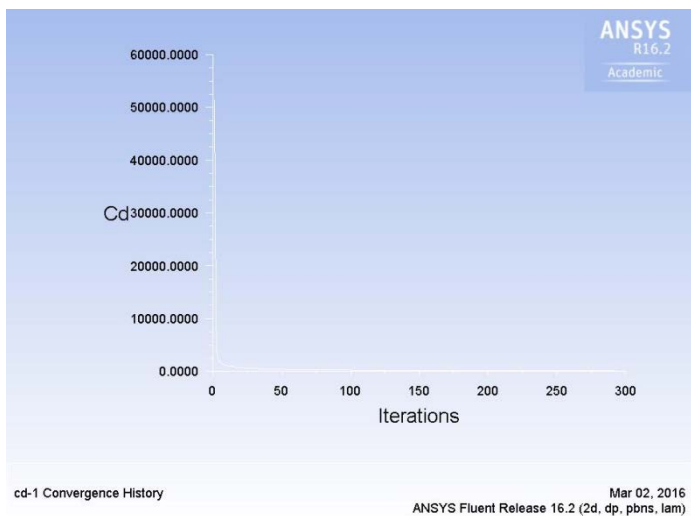
Simulació realitzada amb un $Re = 0,1$. S'observa que no es produeix desprendiment de la capa límit, les línies de corrent es queden enganxades al cilindre. També es veu com el coeficient de sustentació tendeix a zero i el coeficient d'arrossegament tendeix a un valor concret. A la imatge de les velocitats s'observa com el flux es veu afectat per la interacció amb el cilindre però torna a la normalitat ràpidament.



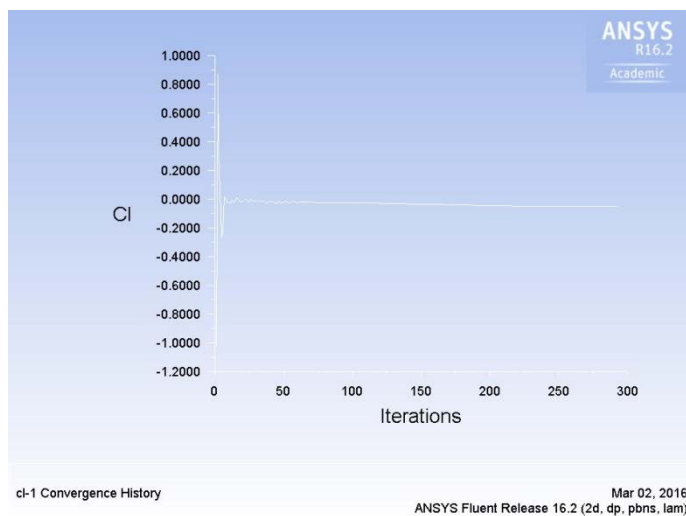
Imatge 14. Línies de corrent per $Re=0,1$



Imatge 15. Velocitat a $Re=0,1$



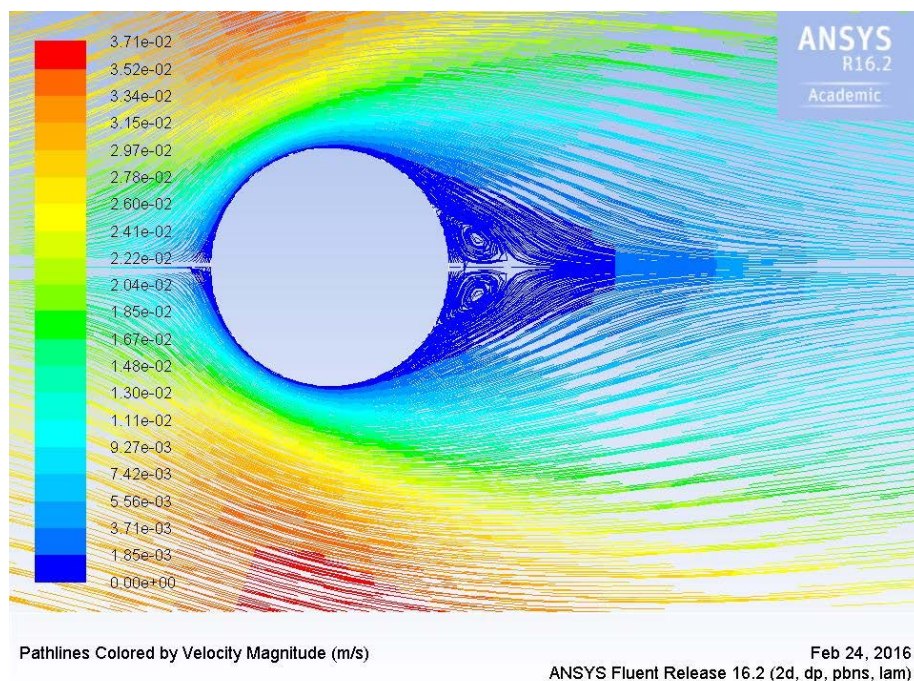
Imatge 16. Valor del C_D per $Re=0,1$



Imatge 17. Valor del C_L per $Re=0,1$

$3 < Re < 40$

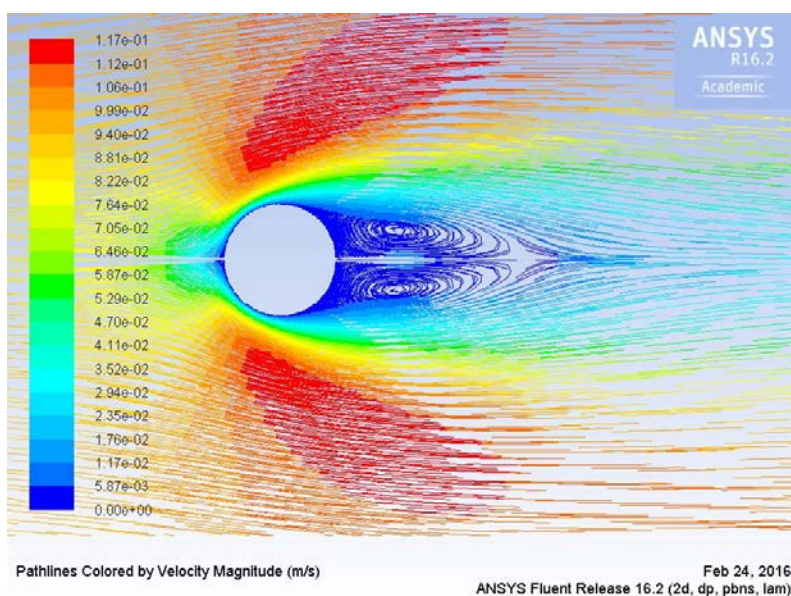
Per aquests intervals es pot observar com es comencen a formar els dos remolins simètrics la part de darrere del cilindre.



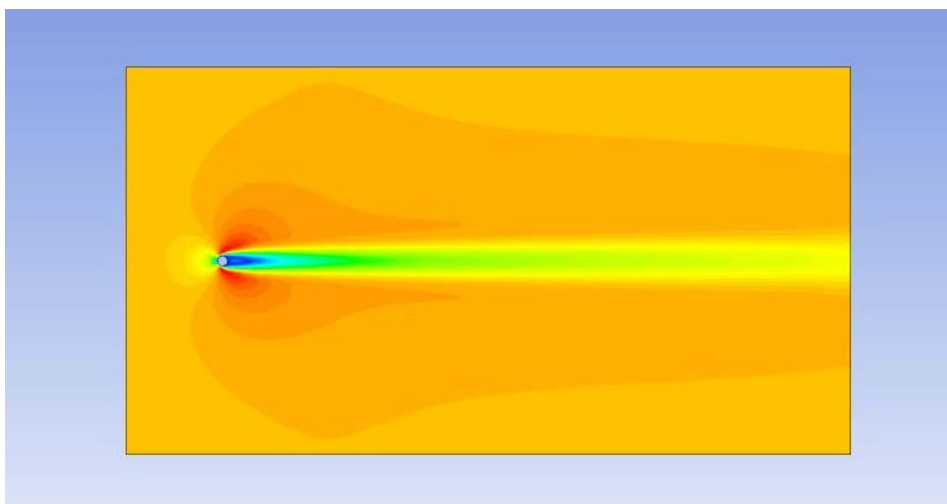
Imatge 18. Línies de corrent a Re = 20

40 < Re < 90

Aquests vòrtex de la part de darrere del cilindre van augmentant conforme s'augmenta el valor del nombre de Reynolds. Però podem observar que encara tenim un flux simètric. A la imatge de les velocitats es pot observar com el flux triga molt més en tornar al seu estat inicial.



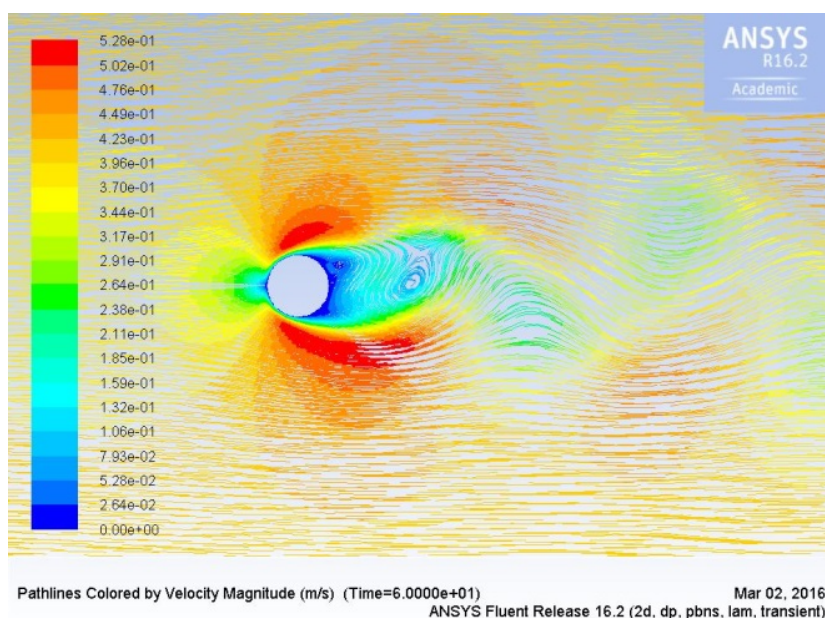
Imatge 19. Línies de corrent a Re = 50



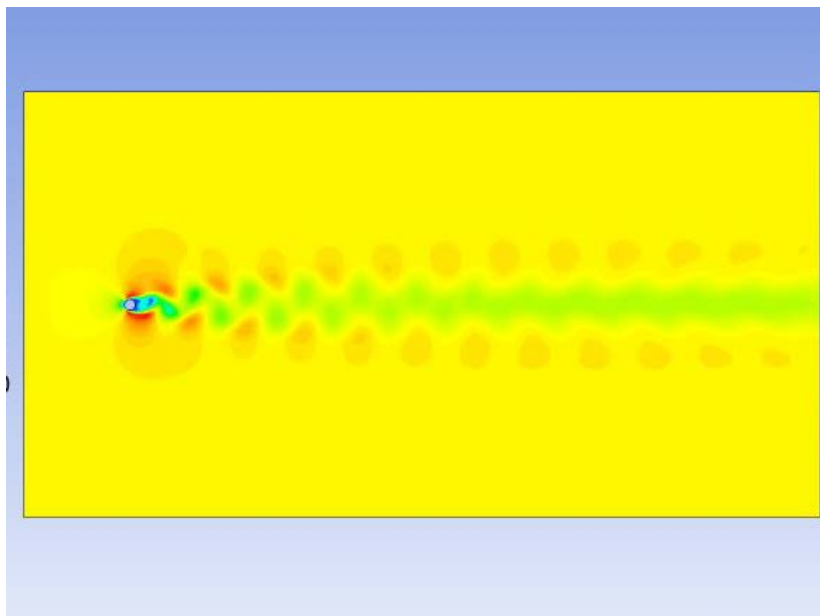
Imatge 20. Velocitat Re = 50

90 < Re < 150

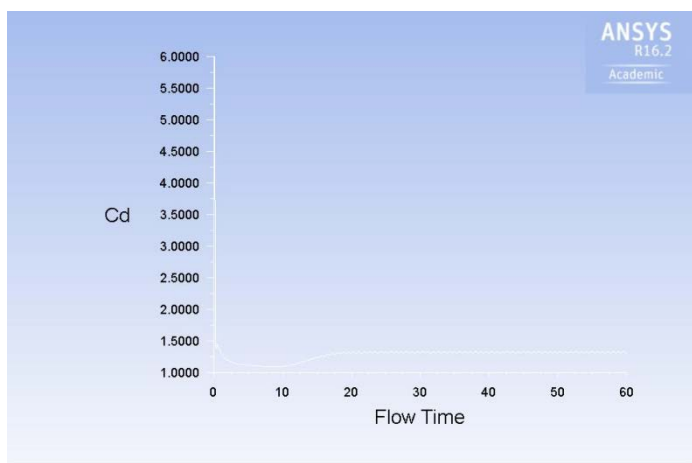
Aquí es pot observar com ja s'han format els vòrtexs de Von Karman. Aquí ja estem tractant amb un flux transitori amb un $Re=122$. També es pot veure com el coeficient d'arrossegament tendeix a un valor i en canvi el coeficient de sustentació varia periòdicament entre dos valors, degut a la formació dels vòrtexs de Von Karman.



Imatge 21. Línies de corrent a $Re=122$

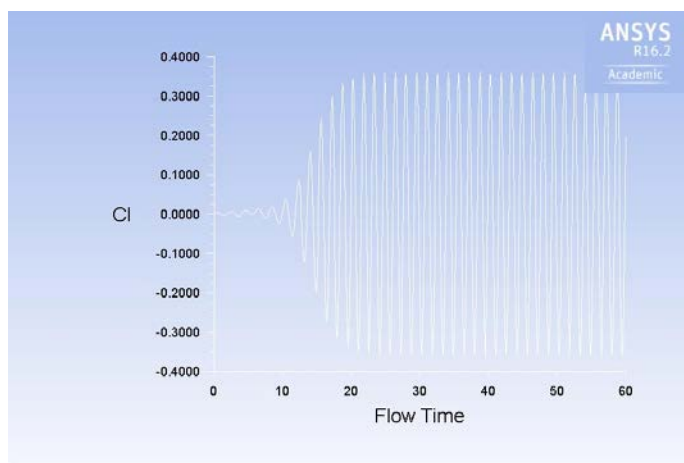


Imatge 22. Velocitat $Re = 122$



cd-1 Convergence History (Time=6.0000e+01) Mar 02, 2016
ANSYS Fluent Release 16.2 (2d, dp, pbns, lam, transient)

Imatge 23. Valor del C_D a $Re = 122$



cl-1 Convergence History (Time=6.0000e+01) Mar 02, 2016
ANSYS Fluent Release 16.2 (2d, dp, pbns, lam, transient)

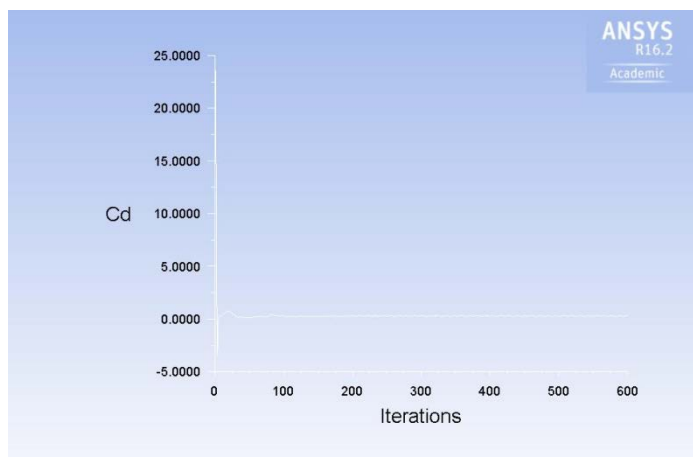
Imatge 24. Valor del C_L a $Re = 122$

150 < Re < 10⁵

A partir d'aquests valors de Reynolds les imatges de les simulacions comencen a ser semblants, ja que el flux es va tornant turbulent cada vegada amb el punt de separació de la capa límit més darrere. S'observa que es crea una estela molt llarga i a la vegada estreta.

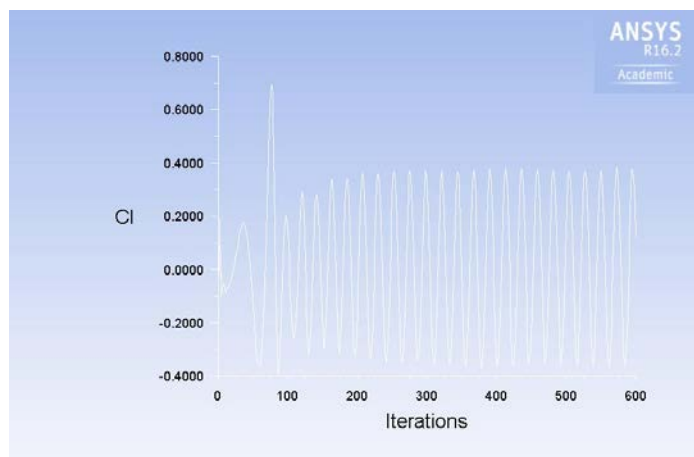


Imatge 25. Velocitats a Re=977



cd-1 Convergence History
ANSYS R16.2 Academic
Mar 09, 2016
ANSYS Fluent Release 16.2 (2d, dp, pbns, ske)

Imatge 26. Valor de C_D a Re=977



cl-1 Convergence History
ANSYS R16.2 Academic
Mar 09, 2016
ANSYS Fluent Release 16.2 (2d, dp, pbns, ske)

Imatge 27. Valor de C_L a Re=977

Aquí s'adjunta una taula resum de les simulacions realitzades; s'inclou per a cada velocitat de flux simulada el valor del Reynolds corresponent, els valors dels coeficients d'arrossegament i de sustentació obtinguts a la simulació i el valor del nombre de Mach calculat.

Per a l'estudi realitzat en aquest projecte no té sentit fixar-nos en el valor del coeficient de sustentació, ja que hauria de donar 0 per als casos de flux estable i un valor que varia periòdicament per als casos de flux transitori, ja que quan es formen els vòrtex de Von Karman la pressió superior i inferior del cilindre anirà variant.

També s'ha volgut incloure el nombre de Mach per observar si estem estudiant un cas de flux subsònic (el nombre de Mach és menor que 1), sònic (el nombre de Mach és igual a 1) o supersònic (el nombre de Mach és major que 1). En tots els casos simulats estem treballant amb un flux incompressible i subsònic, ja que estem tractant amb un fluid, l'oli.

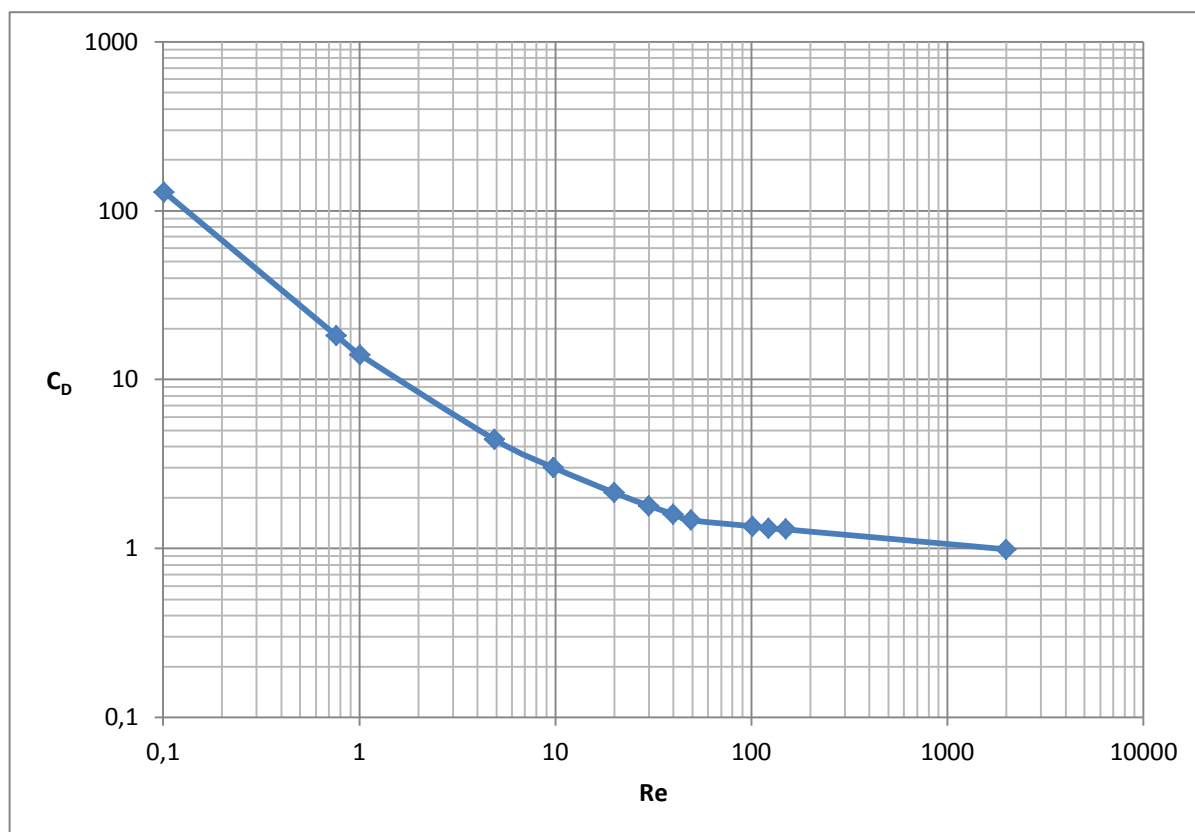
v (m/s)	Re	Cd	Cl	Mach
0,00033	0,10139	86,823	-0,0005141	0,00000022
0,0025	0,768103	18,096	-0,00021566	1,6667E-06
0,0033	1,013897	13,974	-0,00002021	0,00000022
0,016	4,915862	4,4062	0,0006882	1,0667E-05
0,032	9,831724	3,0068	-2,3605E-06	2,1333E-05
0,065	19,97069	2,1367	0,000066989	4,3333E-05
0,098	30,10966	1,7884	0,000086749	6,5333E-05
0,13	39,94138	1,5942	0,00010273	8,6667E-05
0,16	49,15862	1,4704	0,00012891	0,00010667
0,33	101,3897	1,3514	-0,25431	0,00022
0,4	122,8966	1,3115	0,19684	0,00026667
0,49	150,5483	1,2953	-0,2555	0,00032667
6,5	1997,069	0,9877	0,03544	0,00433333

Taula 3. Valors de les simulacions

Per últim s'ha dibuixat el gràfic que relaciona el valor del coeficient d'arrossegament amb el valor del nombre de Reynolds. Com és pot observar el gràfic dibuixat a partir dels valors simulats és bastant semblant al gràfic dibuixat a partir de valors experimentals.

S'observa que per a valors de Reynolds baixos, on tenim un flux laminar, els resultats són més acurats degut a que és més fàcil modelar fluxos on no hi hagi turbulència. Conforme augmenta el nombre de Reynolds s'han d'utilitzar models de turbulència per realitzar les simulacions, i aquests models tot i intentar ajustar-se a la realitat dels fluxos turbulents no són exactes al 100%. En aquest projecte s'ha utilitzat el model d'equacions $k-\epsilon$, però s'haurien de provar diferents models que tracten amb fluxos turbulents per veure les diferències que es produeixen a les solucions.

Un altre factor per les diferències entre els valors experimentals i els valors simulats pot ser segut a les simplificacions definides a les simulacions (treballem en 2D, no en 3D).



Gràfic 1. C_D - Re amb valors simulats

7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental que es deriva d'aquest projecte és mínim ja que es tracta d'un projecte de caire més teòric. Només s'han de tenir en compte les despeses en electricitat que s'han causat quan s'ha utilitzat l'ordinador, tant per realitzar les simulacions necessàries com per buscar informació i redactar la memòria.

Aquestes despeses en electricitat produeixen una certa quantitat de CO₂ que es emesa al medi ambient. Per tal de fer un càlcul aproximat del total d'emissions es considera que s'han utilitzat els ordinadors de la universitat durant 200 hores.

S'ha considerat que la potència mitjana que consumeix un ordinador de sobretaula és de 310 W (0,31 kW)^[3] per hora. Així doncs es calcula que el consum total del projecte és de 62 kWh.

Per calcular les emissions de CO₂ totals produïdes s'ha considerat el coeficient del pas d'energia final a emissions de CO₂ definit pel ministeri d'indústria, energia i turisme per a electricitat convencional peninsular, que és de 0,649 kg CO₂/kWh^[4]. Obtenint així el valor tota de emissions produïdes, que és de 40,238 kg de CO₂.

Per altra banda també s'ha de tenir en compte les emissions de gasos contaminants que s'han produït al realitzar els viatges a la universitat, ja que aquests s'han realitzat amb cotxe. Els viatges s'han realitzat de El Masnou, que és on estic vivint, a la universitat. Cada trajecte té una distància de 20 km aproximadament, per tant, per cada dia que he anat a la universitat s'han de comptar 40 km. Tenint en compte els dies de treball surt una distància total de 2000 km. Tenint en compte que a la fitxa tècnica del vehicle utilitzat especifica que les emissions de CO₂ són de 149 g/100 km es calculen unes emissions totals de 2,98 kg de CO₂.

Per últim cal dir que també s'han produït despeses en electricitat quan s'ha treballat amb llum artificial o quan s'han utilitzat fulls de paper per realitzar càlculs o prendre els apunts que eren necessaris. Però aquests valors són molt petits i difícils de quantificar, així doncs no s'han tingut en compte en l'impacte mediambiental.

Així doncs les emissions totals produïdes de CO₂ són de 43,218 kg.

8. Pressupost

Per tal de realitzar un càlcul aproximat del cost total del projecte a continuació es detallen tots els factors que s'han considerat i la despesa que provoquen. Per una banda hi ha la utilització dels ordinadors de la universitat amb una durada de 200 hores i un cost mitjà de l'electricitat de 0,12 €/kWh^[6], extret de les dades de diverses companyies elèctriques. També hi ha el nombre d'hores invertides en aquest projecte, tant de recerca d'informació com de simulació i de redacció de la memòria, considerant un sou de becari de 7,2 €/hora. Per altra banda hi ha el cost de desplaçament, com ja s'ha comentat anteriorment, el projecte s'ha realitzat a la universitat i això implica que s'hagin fet molts viatges amb cotxe. S'han considerat un total de 2000 km realitzats amb un consum mitjà del cotxe de 6,2 l cada 100 km, extret de la fitxa tècnica del vehicle, i amb un preu de la gasolina de 1,189 €/l ^[5]. Per últim s'han tingut en compte les despeses de imprimir tota la memòria i enquadernar-la. S'ha estimat un cost de 50 €, basat en impressions de treballs fetes anteriorment. També cal dir que no s'han tingut en compte les despeses que podrien sorgir pel fet d'utilitzar el programa Ansys, la llicència del qual té un cost anual.

En aquesta taula es fa un resum del càlcul del cost del projecte desglossat en els diferents factors que s'han tingut en compte:

Motiu				Cost
Desplaçaments a la universitat	2000 km	6,2 l/ 100 km	1,189 €/l	147,44 €
Hores treballades	300 hores	-	7,2 €/h	2.160,00 €
Electricitat del ordinador	200 hores	0,31 kW/h	0,12 €/kWh	7,44 €
Imprimir i enquadernar	-	-	-	50,00 €
COST TOTAL				2.364,88 €

Taula 4. Estudi econòmic

Com es pot observar a la taula el cost total del projecte és de 2.364,88 €. Si es considera una durada de 4 mesos, que és el temps dedicat a la realització del treball, ens surt un cost mensual de 591,22 €/mes.

Conclusions

Un dels principals objectius del projecte era verificar, mitjançant mètodes de simulació, el valor del coeficient d'arrossegament en funció del Reynolds per a un cilindre submergit en un fluid. S'ha pogut observar com el valor d'aquestanava disminuint en anar augmentant el nombre de Reynolds i s'ha pogut dibuixar un gràfic de comparació molt acurat.

El fluid utilitzat per aquest projecte és oli, però com que els valors que s'han estudiat són els coeficients d'arrossegament i de sustentació, que la seva característica principal és la seva adimensionalitat, els valors obtinguts en aquest projecte s'haurien de poder extrapolar a altres situacions fent ús de l'anàlisi i de la semblança.

També s'ha aconseguit treballar amb alguns dels diferents models que ofereix el programa Ansys Fluent i s'ha aprofundit molt en coneixements de simulació. S'ha vist la importància d'escollir de forma correcta el model per tal d'obtenir resultats que siguin coherents, i també la importància d'escollir una geomètrica adequada i realitzar un mallat prou fi.

Un camí que es podria seguir un cop finalitzat aquest projecte és el de realitzar de forma experimental l'estudi aquí simulat per a poder comparar els valors obtingut pels dos mitjans. En un primer moment es volia arribar a realitzar aquest experiment com a part del projecte, però degut a la dificultat per realitzar l'experiment, ja que és complicat aconseguir que el fluid circuli a la velocitat desitjada a la vegada que observem els resultats, s'ha decidit centrar-se només en la part més teòrica i no tant experimental.

També és podria realitzar la simulació canviant el fluid i el diàmetre del cilindre, per separat, per validar la semblança dels resultats en tots el casos, i en conseqüència la utilitat dels coeficients d'arrossegament i de sustentació.

Agraïments

Primer de tot m'agradaria agrair el suport rebut tant per part de la meva família com per part dels amics que al llarg de tot el projecte m'han animat i m'han ajudat en el que ha sigut necessari.

També m'agradaria agrair al meu tutor, Esteve Jou, per l'ajuda que m'ha prestat durant la realització del projecte, i per haver-se mostrat receptiu a l'hora de realitzar consultes o dubtes que m'han anat sorgint durant aquests mesos.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] H. SCHLICHTING, K. GERSTEN *Boundary Layer Theory*; Springer, 2000.
- [2] FRANK M. WHITE *Mecánica de fluidos*; Mc Graw Hill, Sexta edición 2008.
- [3] <http://finanzas.excite.es/cuanta-electricidad-consume-un-ordenador.html>
- [4] http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/C%20_%2020140720_Factores%20emision%20CO2%20y%20E%20%20Final_Primary-CorrErrata_con%20portada.pdf
- [5] <http://servicios.elpais.com/gasolineras/>
- [6] <http://tarifasgasluz.com/faq/precio-kwh>

Bibliografia complementària

McCabe/ Smith; *Operaciones básicas de ingeniería química*; Editoria Reverté, S. A., 2003.

Yunus A. Çengel, John M. Cimbala; *Fundamentos de mecànica de fluidos*, Mc Grau Gill, 1ra edició 2014.

Apunts de l'assignatura de mecànica de fluids de l'ETSEIB.

<https://www.youtube.com/watch?v=DXWO-X16Ulo>

<http://ciencia.nasa.gov/>

<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>

<http://cronodon.com/BioTech/Biorheology.html>