

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Simulació, amb finalitats docents, de l'aerodinàmica
d'un tràiler**

MEMÒRIA

Autor: Marc Roca Maideu
Director: Esteve Jou Santacreu
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'aerodinàmica és un dels àmbits més importants de l'automoció, ja que gràcies a ella es poden aconseguir millores substancials en els vehicles pel que fa a consum d'energia i emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Aquest treball no pretén fer un estudi realista sobre l'aerodinàmica de l'automòbil, sinó que vol demostrar, amb finalitats docents, la utilitat de la simulació CFD (*Computational Fluid Dynamics*) mitjançant el programa *ANSYS Fluent*.

En particular es simularà l'aerodinàmica d'un tràiler simplificat. Es veurà com augmenta el coeficient de resistència a l'avanç en canviar diferents paràmetres com la geometria del vehicle o el vent lateral.

Per fer-ho s'han repassat conceptes bàsics de mecànica de fluids i s'ha fet una guia, intentant imitar una pràctica per a estudiants d'aerodinàmica, indicant els passos a seguir per posar en marxa una simulació.

S'han simulat sis casos diferents. En tres d'ells s'ha modificat la distància entre la tractora i el remolc sense vent lateral. En els altres tres s'ha modificat el vent lateral mantenint fixa la distància entre tractora i remolc.

S'ha vist com el coeficient C_D augmenta en augmentar la distància entre la tractora i el remolc. I també s'ha comprovat com també augmenta en augmentar l'angle d'incidència del vent lateral.

També s'ha comprovat que la simulació CFD i en particular l'*ANSYS Fluent* són eines molt potents que, si bé són vàlides per fer simulacions de caire professional, també ho són en l'àmbit docent.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
SUMARI DE TAULES I FIGURES	5
Sumari de taules.....	5
Sumari de figures	5
1. INTRODUCCIÓ	8
1.1. Objectius del projecte	8
1.2. Justificació i motivació.....	9
1.3. Abast i limitacions del projecte.....	9
1.4. Planificació.....	11
2. FONAMENTS TEÒRICS DE MECÀNICA DE FLUIDS	12
2.1. La viscositat	12
2.2. Nombres adimensionals	13
2.3. Capa límit.....	14
2.4. Flux extern	15
2.5. Equacions governants de la mecànica de fluids.....	16
2.6. Força d'arrossegament.....	18
2.7. Constant d'arrossegament.....	19
3. SIMULACIÓ	20
3.1. Geometria	20
3.2. Mallat	24
3.3. Configuració de la simulació	28
3.3.1. Configuració general.....	28
3.3.2. Model	29
3.3.3. Materials.....	30
3.3.4. Condicions de contorn	30
3.3.5. Malla dinàmica.....	31
3.3.6. Valors de referència	31
3.3.7. <i>Solution methods</i>	31
3.3.8. <i>Solution controls</i>	32
3.3.9. Monitors	33
3.3.10. Inicialització de la solució	35

3.3.11. <i>Calculation activities i Run calculation</i>	35
4. RESULTATS I POST PROCESSING	36
4.1. Resultats de les simulacions sense vent lateral	36
4.2. Resultats de les simulacions amb vent lateral	43
5. CONCLUSIONS	50
6. IMPACTE AMBIENTAL	52
7. PRESSUPOST	53
8. AGRAÏMENTS	55
9. BIBLIOGRAFIA	56
Referències bibliogràfiques	56
Bibliografia consultada	56
Bibliografia complementària	56

Sumari de taules i figures

Sumari de taules

Taula 1.4.1 Planificació del projecte	11
Taula 3.2.1 Nomenclatura de les cares del volum de control.....	27
Taula 3.3.1 Propietats de l'aire considerades	30
Taula 4.1.1 Resultats de les simulacions sense vent lateral	36
Taula 4.2.1 Resultats de les simulacions amb vent lateral	43
Taula 7.1 Pressupost del projecte	54

Sumari de figures

Figura 2.1.1 Distribució de velocitats en y i esforç tallant. Font: Hucho	12
Figura 2.3.1 Transició de capa límit laminar a turbulenta. Font: Hucho.....	14
Figura 2.4.1 Flux al voltant d'un vehicle. Font: Hucho.....	15
Figura 2.7.1 Constants d'arrossegament de diferents tipus de vehicle Font: Hucho	19
Figura 3.1.1 Dimensions del camió amb separació de 50 cm	21
Figura 3.1.2 Dimensions del camió amb separació de 100 cm	21
Figura 3.1.3 Dimensions del camió amb separació de 150 cm	22
Figura 3.1.4 Dimensions del volum de control per als tres casos sense vent lateral	22
Figura 3.1.5 Dimensions del volum de control per als tres casos amb vent lateral	23
Figura 3.2.1 Configuració del mallat inicial	24
Figura 3.2.2 Mallat inicial	25
Figura 3.2.3 Configuració de la Inflation	25

Figura 3.2.4 Mallat final	26
Figura 3.2.5 Detall de la Inflation i del refinat del camió	26
Figura 3.2.6 Detall del refinat del deixant.....	27
Figura 3.3.1 Menú de configuració de l'ANSYS Fluent	28
Figura 3.3.2 Configuració del model de turbulència	29
3.3.3 Colors de les condicions de contorn	30
Figura 3.3.4 Residuals de la simulació de 100 cm	33
Figura 3.3.5 Evolució de Cd en la simulació de 5°	34
Figura 3.3.6 Velocitats després d'inicialitzar la solució amb el mètode híbrid	35
Figura 4.1.1 Cd vs separació	37
Figura 4.1.2 Cd vs separació segons Hucho.....	37
Figura 4.1.3 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 50 cm	38
Figura 4.1.4 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 50 cm	39
Figura 4.1.5 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 100 cm	39
Figura 4.1.6 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 100 cm	40
Figura 4.1.7 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 150 cm	40
Figura 4.1.8 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 150 cm	41
Figura 4.1.9 Vectors velocitat en la simulació de 50 cm	41
Figura 4.1.10 Detall de la capa límit.....	42
Figura 4.1.11 Cd vs angle	43
Figura 4.1.12 Cd vs angle segons Hucho.....	44
Figura 4.1.13 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 5 graus	45

Figura 4.1.14 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 5 graus.....	45
Figura 4.1.15 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 10 graus.....	46
Figura 4.1.16 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 10 graus.....	46
Figura 4.1.17 Línies de corrent en la simulació de 10 graus	47
4.1.18 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 15 graus ...	48
Figura 4.1.19 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 15 graus.....	48
Figura 4.1.20 Vectors de velocitat i tensió a la paret de la simulació de 5 graus	49

1. Introducció

1.1. Objectius del projecte

L'objectiu global d'aquest projecte és demostrar que la simulació CFD (*Computational Fluid Dynamics*) duta a terme amb el programa *ANSYS Fluent* pot ser una eina docent molt interessant per entendre conceptes de la mecànica de fluids i de l'aerodinàmica en particular.

Per fer-ho s'han plantejat dos objectius específics que són els següents:

El primer d'ells és fer un estudi qualitatiu i amb finalitats docents sobre com es veu afectada la constant d'arrossegament o C_D d'un camió amb remolc en canviar la distància entre la cabina tractora i el remolc, concretament es volen simular les separacions de 50, 100 i 150 centímetres.

El segon és fer el mateix però fent variar l'angle d'incidència del vent lateral. Concretament es volen simular uns angles de 5° , 10° i 15° .

En particular, es vol veure com la constant C_D augmenta en augmentar la distància i també en augmentar l'angle, tal com constata el llibre *Aerodynamics of Road Vehicles* de Wolf-Heinrich Hucho [1].

L'estudi, com s'ha dit, es farà mitjançant simulació CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Concretament s'emprarà el programa de simulació de fluids *ANSYS Fluent* ja que és el programa que s'utilitza a la universitat i que a més ofereix versions gratuïtes per a estudiants.

El fet de treballar amb finalitats docents permet que les geometries estudiades siguin senzilles i poc realistes.

Paral·lelament també es pretén que d'aquest treball se'n pugui treure una pràctica a realitzar per estudiants d'aerodinàmica. És per això que en l'apartat 3 s'explica detalladament els passos que cal seguir per posar en marxa una simulació.

1.2. Justificació i motivació

El 16 de novembre de 2017, el fundador i CEO de l'empresa de vehicles elèctrics Tesla, Elon Musk, presentava el que semblava ser el camió del futur, el Tesla Semi. Durant la presentació, es posava especial èmfasi en la seva C_D de 0,36; tot comparant-la amb la de vehicles esportius d'alta gamma. Això va despertar en mi un interès per saber quins eren els factors que influïen en aquesta constant i per què l'empresari hi donava tanta importància.

Vaig pensar que seria molt interessant fer simulacions i obtenir resultats realistes sobre com es pot millorar l'aerodinàmica d'un camió.

No obstant, la simulació aerodinàmica implica uns recursos dels que un estudiant no disposa, com poden ser les versions professionals dels programaris de disseny i simulació, o un ordinador potent amb el que realitzar els càlculs. És per això que aquest projecte s'ha enfocat a l'àmbit docent: comprovar els canvis en l'aerodinàmica mitjançant els recursos dels que es disposa en l'àmbit universitari.

1.3. Abast i limitacions del projecte

L'abast d'aquest treball queda definit per les etapes que s'han dut a terme, i són les següents:

- Descripció bàsica dels principis de mecànica de fluids que intervenen en el problema.
- Disseny i construcció de la geometria de les diferents variants del problema mitjançant el programa de disseny en 3D *Solidworks* i exportació d'aquest al programa *ANSYS Fluent* en format IGES.
- Creació d'un mallat amb el que obtenir resultats fiables per interpretar-los qualitativament.
- Aplicació de les condicions de contorn pertinents d'acord amb les hipòtesis considerades.
- Configuració i control de la simulació.
- Extracció dels resultats d'interès per l'estudi en qüestió.
- Interpretació dels resultats i comparació amb els resultats d'Hucho.

Queda fora de l'abast d'aquest treball la teoria relacionada amb el funcionament de programa i amb les equacions i algoritmes que aquest utilitza.

Pel que fa a les limitacions, el principal hàndicap és el fet d'emprar la versió d'*ANSYS Fluent* per estudiants. Aquesta versió limita el nombre d'elements del mallat a 512.000. Per aquest motiu, la geometria estudiada ha de ser, com s'ha dit, molt senzilla i amb molt pocs detalls. Tot i això serà suficient per aconseguir els objectius del treball.

1.4. Planificació

La planificació del treball es mostra en la Taula 1.4.1 en format de diagrama de Gantt.

Activitats	Hores	FEBR	MARÇ	ABR	MAIG	JUNY
1. Definició	8					
1.1 Contactes amb departaments	4	■				
1.2 Elecció del tema	2	■				
1.3 Escollir títol	1	■				
1.4 Definir l'abast	1	■				
2. Elaboració	236					
2.1 Recerca d'informació	10	■	■	■	■	
2.2 Aprenentatge autònom d'ANSYS	80		■	■	■	
2.3 Fer les geometries	15		■	■	■	
2.4 Fer mallats i comprovar-los	45		■	■	■	■
2.5 Simulacions	80		■	■	■	■
2.6 Obtenció de resultats	6					■
3. Redacció de la memòria	24					
3.1 Definir l'estructura	2				■	
3.2 Redacció Introducció	4				■	
3.3 Redacció del cos principal	10					■
3.4 Redacció de conclusions	2					■
3.5 Donar format al document	4					■
3.6 Retocs i correccions	2					■

Taula 1.4.1 Planificació del projecte

2. Fonaments teòrics de mecànica de fluids

Aquest apartat es centra únicament en aquells aspectes teòrics que són d'interès per entendre què significa la constant C_D o coeficient d'arrossegament. No s'ha aprofundit molt en la teoria perquè se suposa que un estudiant d'aerodinàmica ja té aquests coneixements ben assentats.

2.1. La viscositat

La viscositat d'un fluid és causada pel fregament molecular entre les partícules d'aquest. Relaciona la tensió tallant amb la deformació del fluid segons l'equació següent:

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

On τ és la tensió tallant, μ és la viscositat dinàmica i du/dy és el gradient vertical de velocitats. A la Figura 2.1.1 s'il·lustra el gradient de velocitats i la tensió tallant.

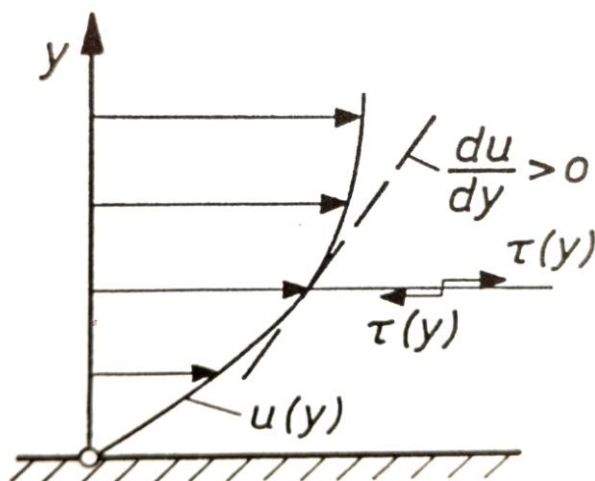


Figura 2.1.1 Distribució de velocitats en y i esforç tallant. Font: Hucho

Es coneix com a viscositat cinemàtica al quocient entre la viscositat dinàmica ν i la densitat del fluid.

2.2. Nombres adimensionals

A l'hora de dur a terme experiments o simulacions aerodinàmiques, ja sigui mitjançant túnels de vent o CFD, és important que el flux d'aire usat tingui les mateixes propietats que el flux real. És per això que s'utilitzen els que es coneixen com nombres adimensionals. La seva funció és imposar les condicions perquè les equacions governants es compleixin en el model i en el prototipus amb les escales imposades. D'aquesta manera es pot establir una semblança entre la simulació o experiment i el problema real.

Existeixen molts números adimensionals en mecànica de fluids, i s'utilitzen uns o altres depenent del problema.

El nombre adimensional més important en aerodinàmica es el número de Reynolds. Aquest nombre relaciona les forces inercials i les viscoses que tenen lloc en un fluid, i dona informació sobre el règim del flux (laminar o turbulent). El nombre de Reynolds és molt útil quan es realitzen experiments o simulacions a escala, però no és el cas d'aquest treball. Es defineix com:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

on ρ és la densitat del fluid, v és la seva velocitat, L és una longitud característica que depèn del problema i μ és la densitat dinàmica del fluid.

Un altre nombre important en aerodinàmica és el nombre de Mach. El nombre de Mach dona informació sobre la compressibilitat del fluid. Per tal de simplificar els càlculs durant la simulació, es vol que el fluid sigui incompressible. Això es compleix quan $Ma < 0,3$. Per tant en aquest cas el nombre de Mach serà un valor límit que no es pot superar.

Aquest número es defineix com:

$$Ma = \frac{v}{c}$$

on v és la velocitat del fluid i c és la velocitat del so en l'aire, que aproximadament és de 340 m/s.

2.3. Capa límit

Quan un flux d'aire entra en contacte amb un cos, les partícules que estan en contacte directe amb el cos tenen velocitat 0 degut a la condició de no lliscament. Això crea un gradient de velocitats il·lustrat a la Figura 2.3.1.

Es coneix com a capa límit la zona del fluid afectada per la condició de no lliscament, i on el gradient de velocitats va des de 0 fins al 99% de la velocitat que tindria la partícula si estigués infinitament lluny del cos en qüestió.

Les partícules dins de la capa límit primer es desplacen de forma paral·lela entre elles (règim laminar). A mesura que avancen la trajectòria es va tornant desordenada i caòtica fins arribar a règim turbulent. A la Figura 2.3.1 es pot veure aquesta transició.

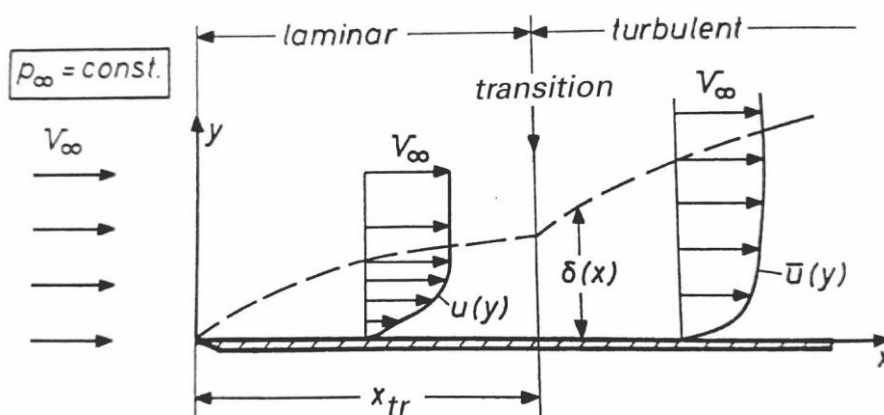


Figura 2.3.1 Transició de capa límit laminar a turbulenta. Font: Hucho

Les partícules dins de la capa límit van perdent velocitat a mesura que avancen fins al punt de ja no poder vèncer la pressió adversa. En alguns casos fins i tot poden retrocedir. Aquest fet es coneix com a desprendiment de la capa límit. Això fa que el flux d'aire deixi d'estar en contacte amb el cos. Si la capa límit està en règim turbulent, el desprendiment té lloc més tard que si estigués en règim laminar.

2.4. Flux extern

En l'estudi aerodinàmic d'un vehicle cal tenir en compte el flux intern i el flux extern. El primer contempla els conductes del vehicle com les preses d'aire, el motor, la cabina, etc. No obstant, en aquest treball només es tindrà en compte el flux extern, que és el que implica la geometria exterior del vehicle.

Donat un vehicle en moviment, els efectes viscosos del flux es restringeixen a l'interior de la capa límit. A fora de la capa límit el fluid es considera no viscos i amb velocitat U , que és la velocitat relativa entre el vehicle i la carretera.

Dins de la capa límit, la velocitat del fluid decreix des de U a la frontera de la capa límit fins a zero a la paret, on el fluid compleix la condició de no lliscament.

Quan el flux es separa del vehicle, la capa límit es dispersa i el fluid es regeix completament pels efectes viscosos.

En la Figura 2.4.1 s'observa com el flux xoca contra el vehicle, es forma la capa límit i aquesta es desprèn a la cua del vehicle, deixant una estela.

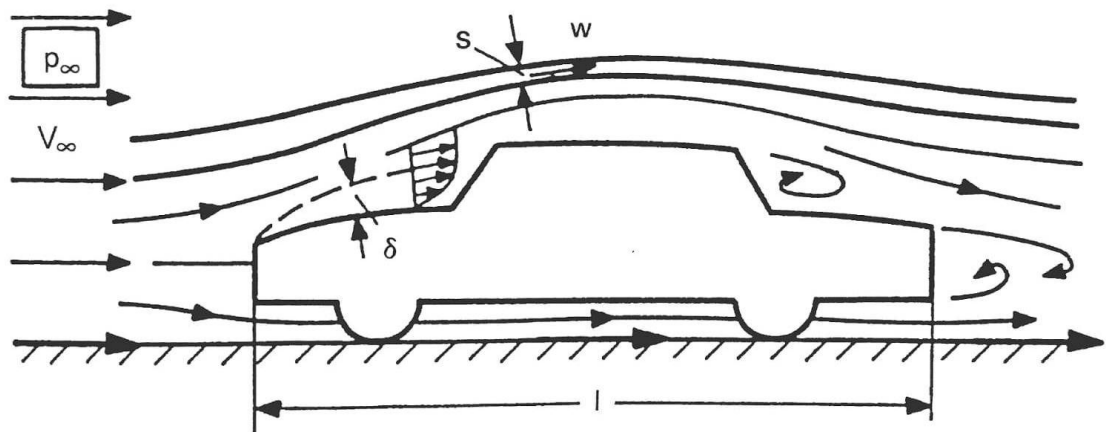


Figura 2.4.1 Flux al voltant d'un vehicle. Font: Hucho

A certa distància del vehicle, la velocitat del flux i la de la carretera coincideixen.

2.5. Equacions governants de la mecànica de fluids

Les equacions governants de la mecànica de fluids representen les lleis de conservació de la física tradicionals. Les d'interès per aquest treball són:

- La massa es conserva.
- El canvi de la quantitat de moviment és igual a la suma de les forces que actuen sobre el fluid.

La primera equació a formular és la de continuïtat de la massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \mathbf{U}) = 0$$

On ρ és la densitat i \mathbf{U} el camp de velocitats.

Suposant fluid incompressible es té:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Per a la conservació de la quantitat de moviment es presenta directament la forma de Navier-Stokes aplicable a qualsevol flux laminar. Per a un fluid incompressible i separada per components queda de la següent forma:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

On ρ és la densitat; u , v i w són les components de velocitat en x , y i z , μ és la viscositat, p és la pressió i g és la gravetat.

Si el flux és turbulent, l'equació de Navier-Stokes es veu modificada, afegint-se a aquesta un terme per als esforços turbulents. L'equació queda:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \Delta \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \Delta \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \Delta \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right)$$

On apareix un terme F de forces externes i el terme de la dreta que inclou els esforços turbulents i es calcula amb les velocitats mitjanes. Aquesta equació rep el nom de RANS de l'anglès *Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*.

La següent equació a presentar és la coneguda com equació de Bernoulli i està relacionada amb l'equació d'energia per un flux estacionari. Segons l'equació, un flux sense fricció conserva l'energia al llarg d'una línia de corrent:

$$p + \frac{\rho}{2} c^2 = \text{constant}$$

Aquesta equació relaciona la pressió estàtica p amb la pressió dinàmica $\rho c^2/2$. Es veu doncs, que donada una línia de corrent, si en algun moment varia la velocitat o la pressió, la pèrdua d'energia s'haurà de veure compensada per una variació en la pressió o la velocitat respectivament.

L'equació de Bernoulli completa inclou també els termes d'energia associats a la cota (altura) i a les pèrdues de càrrega. No obstant per aquest treball s'han negligit al ser un flux exterior i horitzontal.

2.6. Força d'arrossegament

La força d'arrossegament o *drag* és una força aerodinàmica que s'oposa al moviment d'un cos a través d'un fluid.

El *drag* és una força mecànica generada per la interacció i contacte d'un cos sòlid amb un fluid. No és generat per un camp de força com podria ser una força elèctrica. Per tal que es generi la força d'arrossegament, el cos ha d'estar en contacte amb el fluid, i ha d'existir una velocitat relativa entre els dos. No importa si el que es mou és l'objecte o el fluid. Hi ha diversos factors que afecten la magnitud del *drag*.

Es pot entendre el *drag* com una fricció aerodinàmica, i una de les fonts d'aquest és la fricció entre les molècules de l'aire i la superfície del sòlid. Com que el *drag* es deu a la interacció del sòlid i del fluid, la força depèn alhora de les propietats del sòlid i del fluid. Pel que fa al sòlid, la força depèn de la rugositat. Una superfície suau i polida generarà menys força que una de rugosa. Pel que fa al fluid, la magnitud de la força depèn de la viscositat i de la magnitud relativa entre les forces viscoses i el moviment del flux, expressada en el nombre de Reynolds. Al llarg d'una superfície, el *drag* també depèn del règim de la capa límit.

També es pot pensar en el *drag* com una resistència aerodinàmica al moviment. Aquesta font de *drag* depèn de la forma del cos. A mesura que el flux es mou al voltant d'un cos, les velocitats i pressions locals varien, d'acord amb l'equació de Bernoulli. Com que la pressió és una mesura del moment de les molècules del gas, i un canvi en un moment produeix una força, una distribució variant de pressions produirà una força sobre el cos. Es pot determinar la magnitud del *drag* integrant la pressió local per la superfície al voltant del cos sencer. La component en la direcció del moviment del resultat d'aquesta integral serà la força d'arrossegament. El desprendiment de la capa límit és un fenomen que genera *drag* d'aquest tipus.

2.7. Constant d'arrossegament

Així doncs, la suma de les dues maneres d'entendre el *drag* descrites dona lloc a una força d'arrossegament total que rep el cos en qüestió. Aquesta força es quantifica mitjançant la C_D (coeficient de *drag*) que vé descrit per l'equació següent:

$$C_D = \frac{2F}{\rho U^2 A}$$

On F és la força total d'arrossegament, ρ és la densitat del fluid, U és la velocitat fora de la capa límit i A és l'àrea frontal del cos. A tall d'exemple es mostren algunes C_D de vehicles comercials en la Figura 2.7.1.

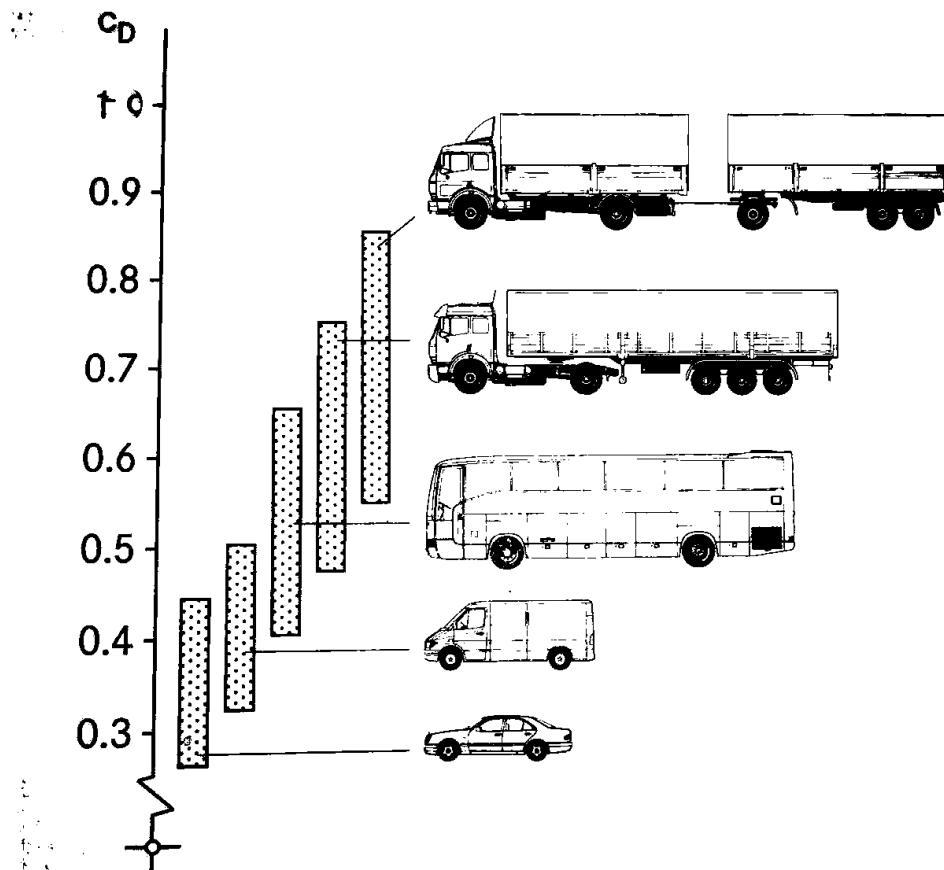


Figura 2.7.1 Constants d'arrossegament de diferents tipus de vehicle Font: Hucho

3. Simulació

En aquest apartat s'expliquen els passos que s'han dut a terme per posar en marxa la simulació, així com els problemes que s'han sorgit durant el procés. Com s'ha dit en la introducció també es pretén que aquest apartat pugui ser entès com un guió de pràctiques per a estudiants d'aerodinàmica.

La simulació consta de tres parts diferenciades:

- Una fase prèvia (*preprocessor*) de definició del problema (definició de la geometria, condicions de contorn, variables del problema, característiques del fluid...).
- La simulació en si, que és bàsicament la fase durant la qual l'ordinador efectua els càlculs.
- Una fase de post processament (*postprocessor*), que ens permet extreure diferents resultats, gràfics i figures.

En aquest apartat s'explicaran les dues primeres. La tercera fase s'explica en l'apartat 4 juntament amb la discussió dels resultats.

3.1. Geometria

El primer pas per a realitzar les simulacions és crear les geometries amb el programa *Solidworks*. S'ha treballat amb aquest programa perquè permet l'exportació directa a l'*ANSYS Fluent* mitjançant el format IGES. Cal recordar que l'*ANSYS Fluent* necessita la geometria del volum d'aire amb el que treballar. Per això primer s'ha fet el sòlid del camió i aquest s'ha restat a un prisma rectangular mitjançant una operació booleana.

Pel que fa a les dimensions del vehicle, no s'ha reproduït cap model de camió existent, sinó que s'han usat valors senzills per facilitar la tasca de creació del sòlid.

També és important remarcar que s'ha fet un arrodoniment de radi 10 cm per a evitar tenir arestes vives i angles aguts, que podrien donar problemes al fer el mallat o causar imprecisions durant la simulació, com podrien ser un despreniment del flux massa aviat, cosa que seria poc realista.

Per al cas sense vent lateral, i degut a la simetria del problema, només s'ha construït la meitat del camió.

En les següents figures es poden veure les dimensions del camió en mil·límetres. En les figures 3.1.2 i 3.1.3 només s'ha posat la cota de separació ja que les altres romanen iguals.

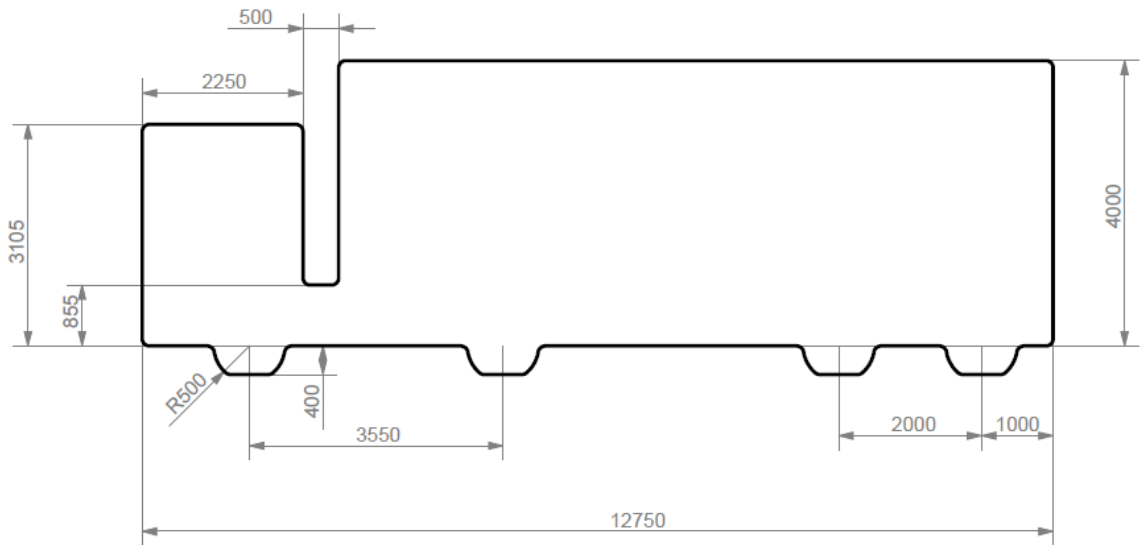


Figura 3.1.1 Dimensions del camió amb separació de 50 cm

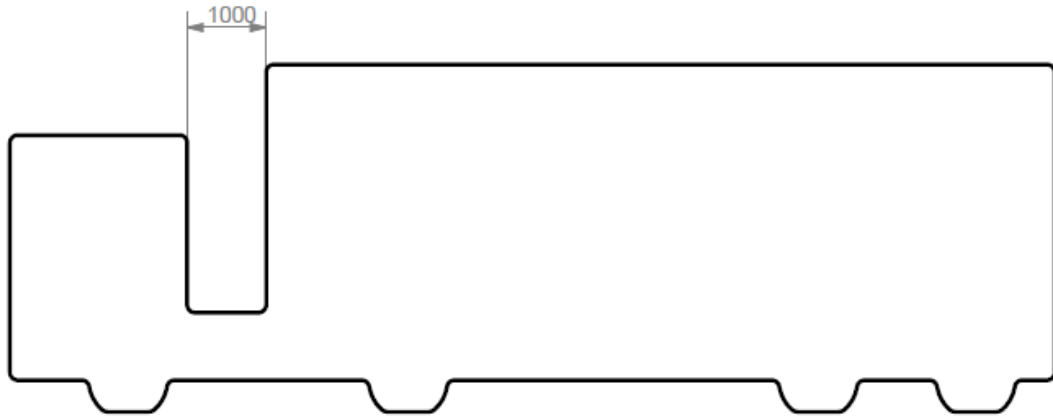


Figura 3.1.2 Dimensions del camió amb separació de 100 cm

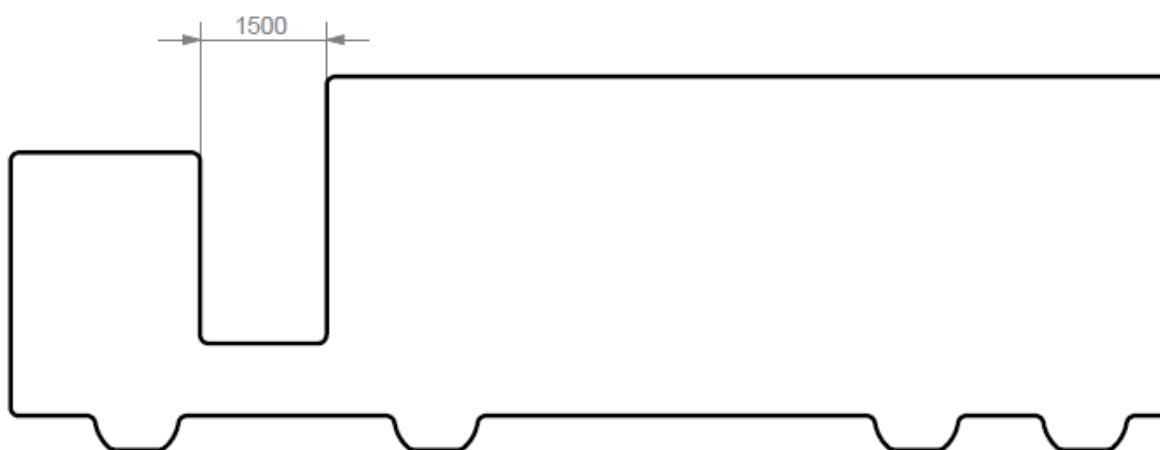


Figura 3.1.3 Dimensions del camió amb separació de 150 cm

En la figura 3.1.4 es poden veure les dimensions, en mil·límetres, del volum de control considerat per als tres casos sense vent lateral.

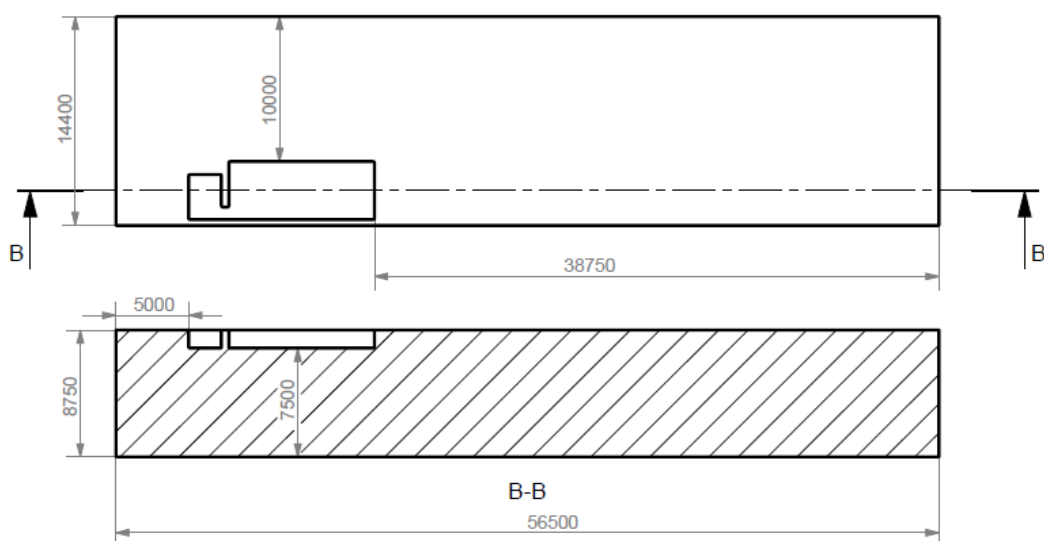


Figura 3.1.4 Dimensions del volum de control per als tres casos sense vent lateral

Pel que fa a les simulacions amb vent lateral, s'ha usat en els tres casos el camió amb una separació de 100 cm. Degut a la manca de simetria, s'ha construït la geometria del problema sencera. En la figura 3.1.5 es pot veure el volum de control considerat pels tres casos (5°, 10° i 15°).

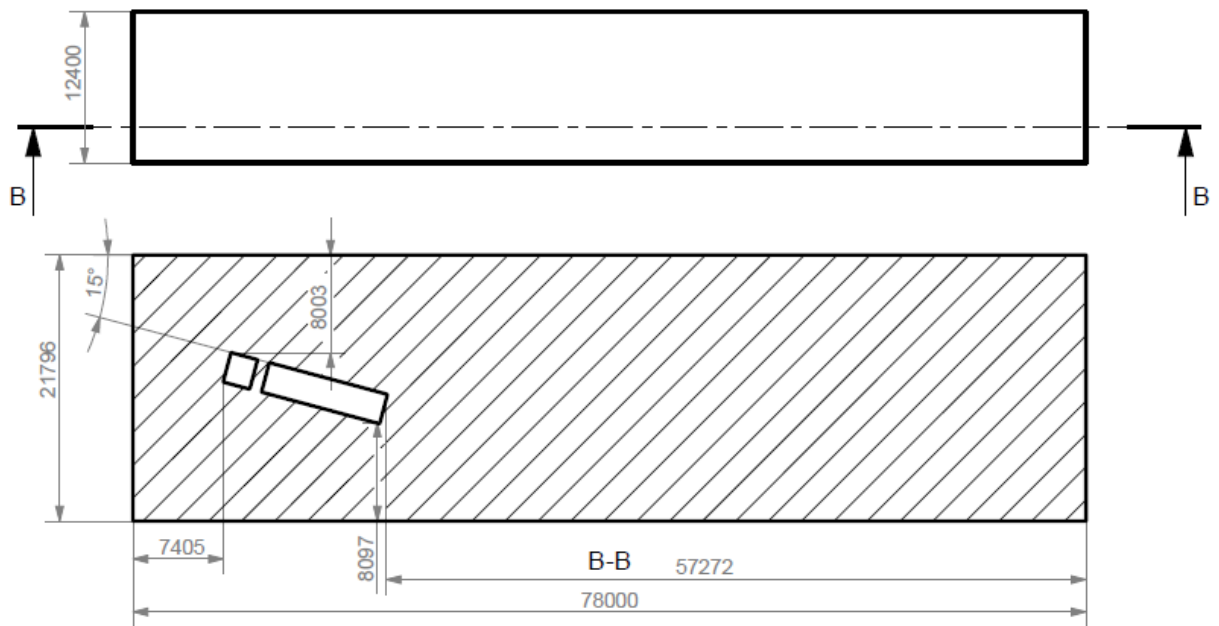


Figura 3.1.5 Dimensions del volum de control per als tres casos amb vent lateral

Cal remarcar que les dimensions finals d'aquests volums de control són el resultat d'un procés iteratiu de prova i error. El fet de tenir una limitació en el nombre d'elements ha fet que s'hagin hagut de provar diferents dimensions de volum de control fins a trobar el que semblava més òptim.

D'una banda es vol que sigui llarg de darrere perquè el deixant es pugui desenvolupar correctament. El deixant té una gran influència en la resistència a l'avanç, degut a les pressions baixes que s'hi generen. Un espai massa curt podria falsejar els resultats.

D'altra banda també es vol resolució en les zones d'interès com la capa límit o els espais entre parets. Per tant si el volum de control és massa llarg, els elements han de ser més grans per no passar el límit de 512.000 elements. En aquest cas el nombre d'elements en les zones d'interès seria més petit i es perdria informació.

També es vol que les cares laterals i superior estiguin prou lluny com per no afectar el flux d'aire al voltant del camió però no massa lluny per no malgastar elements.

S'han donat per vàlides les dimensions finals ja que la solució convergeix i el deixant sembla desenvolupar-se bé i no s'interromp molt aviat per la cara posterior del volum de control.

3.2. Mallat

Aquesta fase ha estat, segurament, la més complicada del treball. Igual que amb el volum de control, el fet de tenir un límit de mig milió d'elements ha fet que s'haguessin de fer moltes simulacions i proves per tal d'optimitzar el mallat i tenir la màxima resolució possible en les zones d'interès (espais entre el camió i el terra, espai entre la cabina i el remolc, capa límit, deixant, etc). Les dimensions dels elements i altres configuracions que es mostren a continuació són les que s'han donat per vàlides després d'aquest procés iteratiu de prova i error.

El procediment a l'hora de fer el mallat ha estat molt similar en tots els casos a simular, és per això que en aquest apartat es mostrarà el cas de separació de 150 cm.

Es parteix del volum de control sense mallar. El primer pas és generar un mallat amb unes dimensions que s'apliquen a tot el volum de control.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	0,150 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	0,150 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	2,0 m
<input type="checkbox"/> Max Size	2,0 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,10
Minimum Edge Length	7,2273e-002 m

En particular es configura el mallat de manera que el programa apliqui unes determinades mesures en mallar zones properes a parets i a corbes. Es demana que en els espais entre parets hi hagi com a mínim cinc elements. També es demana que les dimensions mínimes de l'element siguin de 15 cm i les més grans de 2 metres. Per acabar es configura un rati de creixement de 1,10 per garantir que els elements més grans queden allunyats de la zona d'interès.

Figura 3.2.1 Configuració del mallat inicial

A la figura 3.2.2 es pot observar el resultat d'aquest primer mallat.

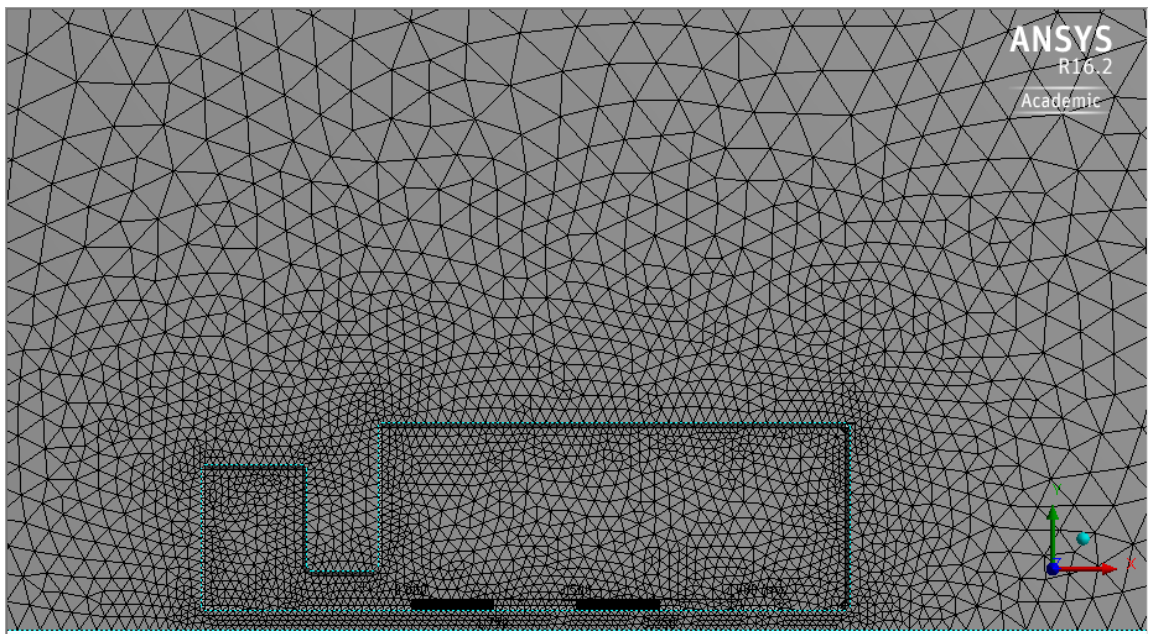


Figura 3.2.2 Mallat inicial

És evident que aquest mallat té poca resolució. Convé fer un refinat a les parets del camió i en el deixant, ja que són zones on es produiran gradients de pressió i efectes viscosos. També cal fer una *Inflation*, que és una capa per sobre del camió on els elements són plans, per tal de captar el comportament i influència de la capa límit.

Així doncs es configura un refinat a les parets del camió i es força que els elements siguin de 15 cm. A més, es col·loca el que es coneix com una esfera d'influència de 4 metres a la cua del camió i es refina forçant una dimensió d'element de 18 cm.

Pel que fa a la *Inflation* per captar la capa límit, es configura que el gruix total sigui de 30 cm i inclogui 10 elements (Figura 3.2.3).

Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named ...
Named Selection	truck
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	0,3 m
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Figura 3.2.3 Configuració de la Inflation

El resultat final dels refinats es pot veure en les següents figures:

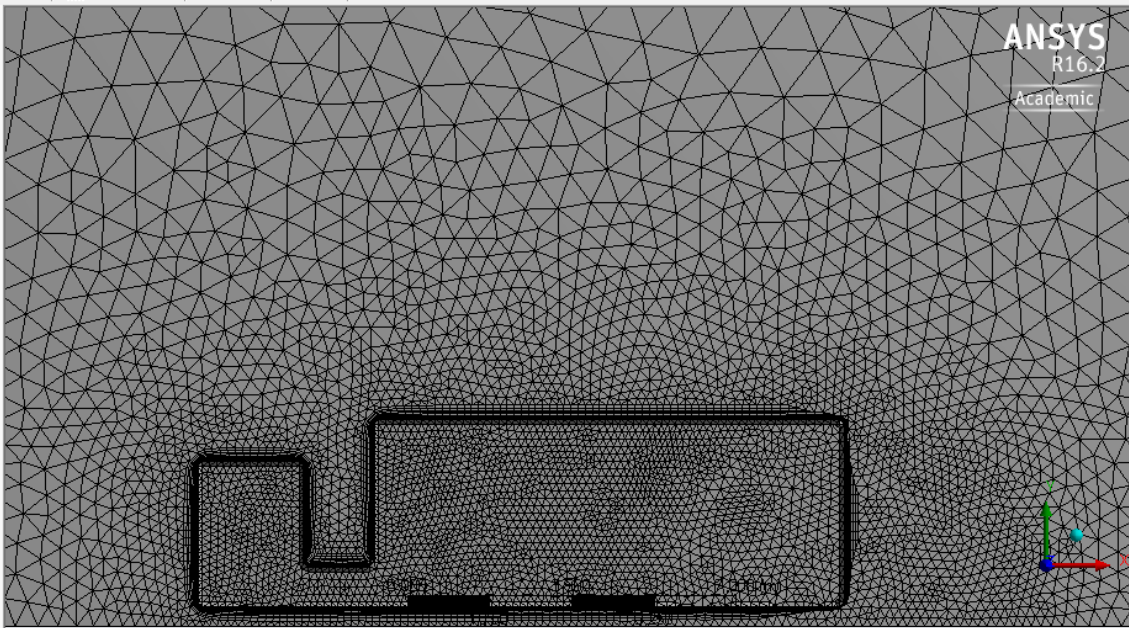


Figura 3.2.4 Mallat final

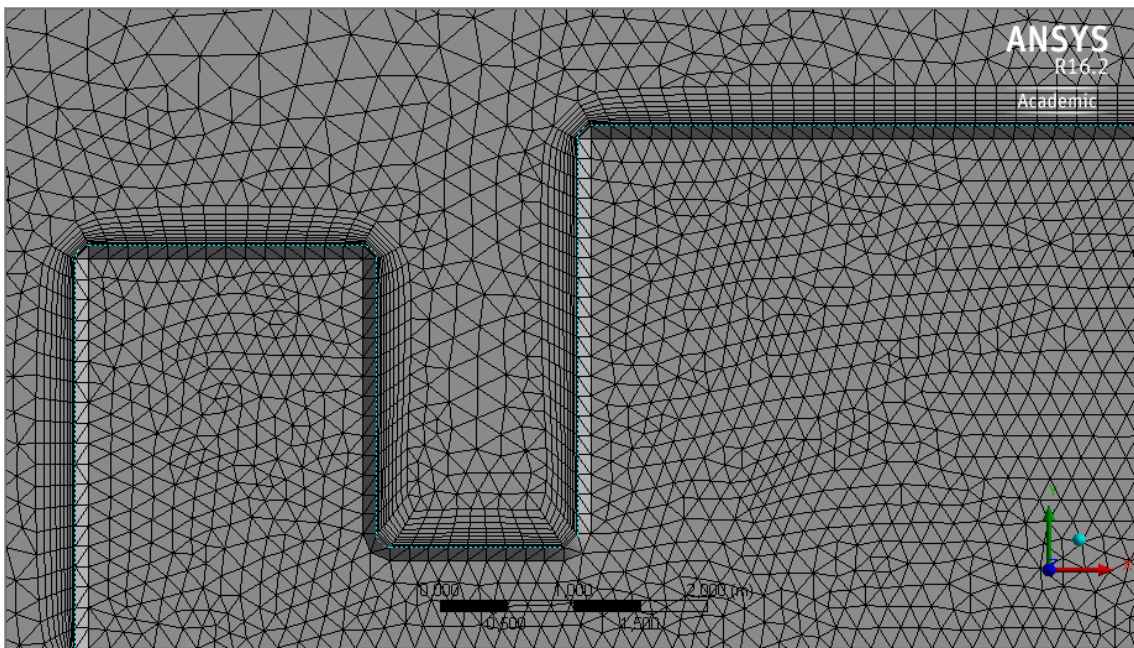


Figura 3.2.5 Detall de la Inflation i del refinat del camió

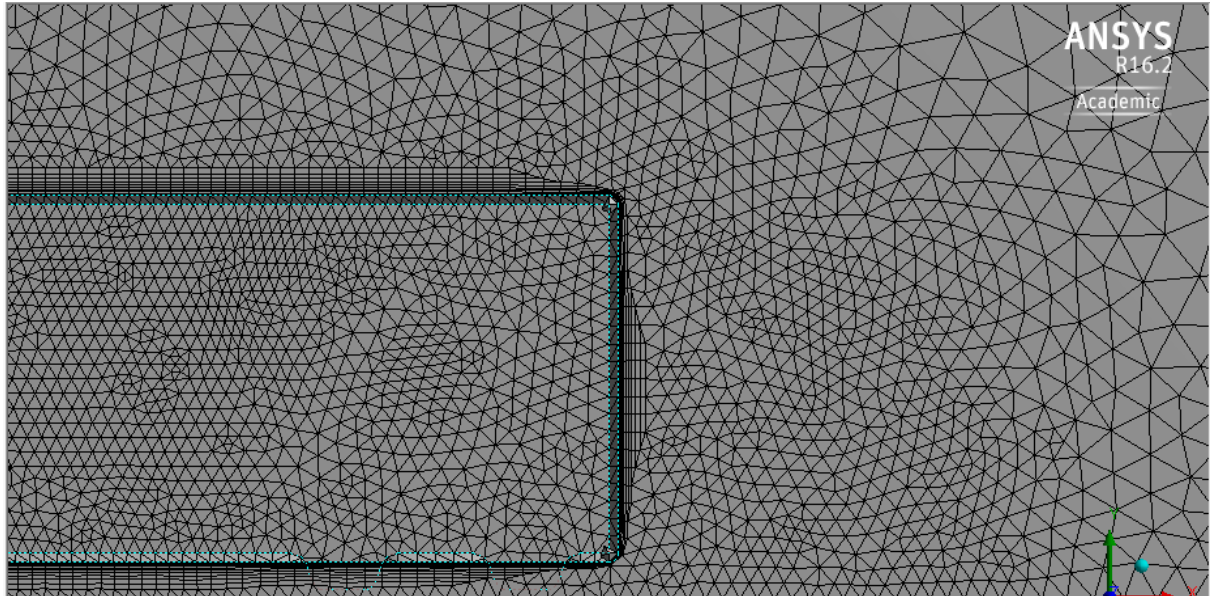


Figura 3.2.6 Detall del refinat del deixant

En aquesta mateixa etapa s'anomenen les cares del volum de control, i es fa amb una nomenclatura que el programa detecta i utilitza per aplicar algunes condicions de contorn directament. A la taula 3.2.1 s'estableix quin nom rep cada cara i què reconeix l'ANSYS *Fluent*.

Cara	Nom	Funció
Entrada d'aire	velocity_inlet	El programa detecta que és la cara per on injectar l'aire
Sortida d'aire	pressure_outlet	El programa detecta que serà la sortida d'aire
Terra	road	Paret normal
Pla de simetria	symmetry	Paret sense esforços tallants
Cos del camió	truck	Paret normal
"Sostre" del VC ¹	symmetry_top	Paret sense esforços tallants
Límit lateral del VC	symmetry_side	Paret sense esforços tallants

Taula 3.2.1 Nomenclatura de les cares del volum de control

¹ Volum de control

3.3. Configuració de la simulació

La pantalla de configuració de la solució d'ANSYS Fluent presenta un esquema a seguir molt intuïtiu. En aquest apartat s'explica el procediment a seguir des de que es té el mallat fins que s'inicien els càlculs.

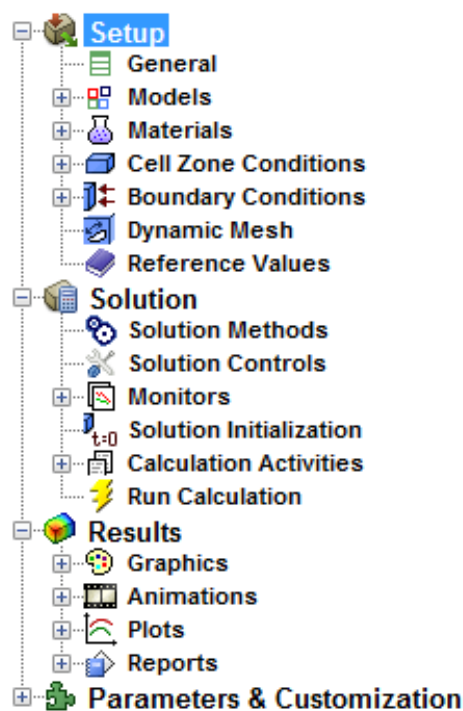


Figura 3.3.1 Menú de configuració de l'ANSYS Fluent

3.3.1. Configuració general

Aquesta pestanya permet escollir el tipus de simulació que es vol dur a terme. En el cas estudiat es vol un càlcul basat en la pressió. L'alternativa és un càlcul basat en la densitat. Aquesta opció seria d'interès en fluids compressibles. No obstant en el problema en qüestió no es supera el límit de $Ma=0,3$. Pel que fa al temps de simulació, volem simular el règim estacionari. Pel que fa a la gravetat, la casella ha de romandre desmarcada. El fet de tenir un flux horitzontal i de buscar resultats qualitius ens permet negligir els efectes de la gravetat.

3.3.2. Model

El següent pas és escollir un model de turbulència. En aquest cas s'ha optat per un model k-èpsilon del tipus “*Realizable*” amb tractament a prop de paret del tipus “*Non-equilibrium Wall Function*”. Aquest model treballa bé quan apareixen gradients de pressions adversos, separacions de flux, “reenganxaments”, etc. típics en simulacions de vehicles. El model es basa en la resolució de dues equacions (k per a l'energia cinètica i èpsilon per a la dissipació). Aquestes equacions igualen la suma la variació de k/èpsilon més el transport de k/èpsilon per convecció amb el transport de k/èpsilon per difusió més la producció de k/èpsilon menys la destrucció de k/èpsilon. Les explicacions més exhaustives sobre la resolució d'aquestes equacions queden fora de l'abast d'aquest treball, igual que els altres paràmetres que es poden canviar.

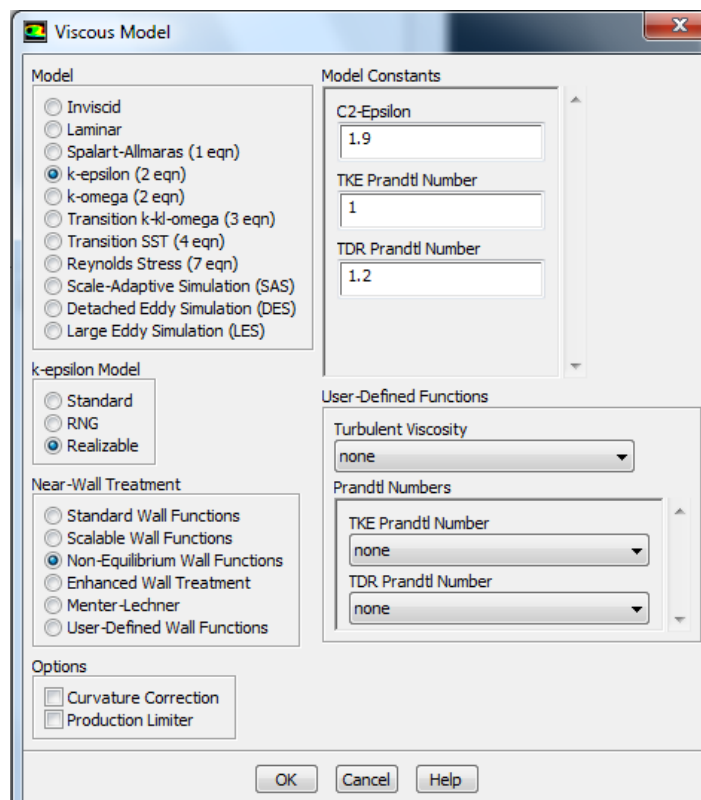


Figura 3.3.2 Configuració del model de turbulència

3.3.3. Materials

El fluid utilitat és, evidentment aire. S'han usat els valors de densitat i viscositat predeterminats de l'ANSYS *Fluent*:

Densitat	1,225 kg/m ³
Viscositat dinàmica	1,7894e-05 kg/m·s

Taula 3.3.1 Propietats de l'aire considerades

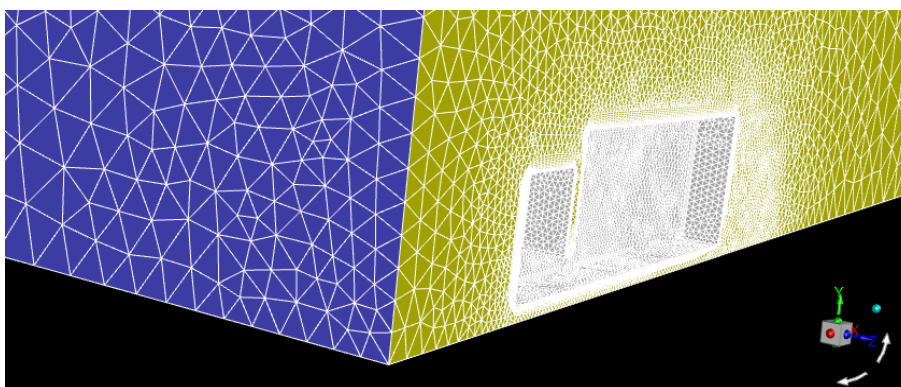
3.3.4. Condicions de contorn

En l'apartat 3.2 s'ha vist com s'anomenaven algunes cares del volum de control de manera que l'ANSYS *Fluent* els hi assigni la funció pertinent.

Així doncs en aquesta fase només cal definir la velocitat de l'aire i la seva direcció² en la cara *velocity_inlet*, que serà de 20 m/s i en la direcció *x*. A més, es reduirà la turbulència, que per defecte està al 5%, fins a l'1% suposant que l'aire està calmat abans del camió.

Per que fa a la cara *pressure_outlet*, per defecte el programa força una pressió relativa de 0. Aquest valor serveix ja que s'assumeix que la cara està prou lluny del vehicle com per haver recuperat les propietats del flux d'entrada i, per tant, no es modifica.

El *Fluent* assigna un color a cada tipus de condició de contorn essent blava l'entrada d'aire, vermella la sortida, blanques les parets i grogues les simetries. Això es pot veure a la figura següent:



3.3.3 Colors de les condicions de contorn

3.3.5. Malla dinàmica

Aquest apartat seria d'interès si hi hagués alguna part mòbil en la geometria, com per exemple, les rodes rodant. No obstant per aquest treball s'ha simplificat el model i s'han modelat les rodes com cilindres estàtics.

3.3.6. Valors de referència

En aquest apartat s'introdueixen aquells valors amb els que el programa calcularà, entre altres, la força d'arrossegament. Cal, doncs, calcular l'àrea frontal del vehicle per introduir-la. En el cas d'aquest treball, l'àrea frontal de mig camió és de $5,1235 \text{ m}^2$. Per tant l'àrea frontal del camió sencer es de $10,247 \text{ m}^2$. Aquestes àrees s'usaran per calcular la força d'arrossegament sobre el camió. La resta de propietats es poden omplir automàticament amb la instrucció "*Compute from/velocity_inlet*".

3.3.7. Solution methods

El Fluent permet triar entre dos tipus de mètodes per resoldre les equacions que governen el moviment del fluid: el *solver* segregat i el *solver* acoblat. En els dos casos el procediment es basa en:

- Integrar les equacions de govern sobre els elements per construir un sistema d'equacions algebraiques per a les variables incògnita (velocitat, pressió...).
- Linealitzar les equacions discretes i resoldre el sistema resultant per obtenir el valor de les variables.

Els dos mètodes usen aproximacions diferents a l'hora de linealitzar.

En el cas del *solver* segregat, es resolen les equacions de govern de manera seqüencial. Donat que les equacions de govern són no lineals, és necessari un procés iteratiu perquè es convergeixi en una solució final. Primer es resolen les tres components de l'equació de la quantitat de moviment simultàniament i s'obté el camp de velocitats. Seguidament es comprova si el camp de velocitats obtingut satisfà l'equació de continuïtat. En cas de que no es satisfaci l'equació de continuïtat, es corregeixen els valors i es repeteix el procés. Aquest mètode requereix de més temps que el mètode acoblat, que resol les equacions de continuïtat i quantitat de moviment de manera simultània, estalviant-se el pas de correcció de resultats.

² S'ha considerat que 20 m/s o 72 km/h és una velocitat raonable per un camió.

El *solver* acoblat consumeix més memòria de l'ordinador que el *solver* segregat, però arriba a la convergència més ràpidament.

Per aquest problema s'ha emprat el *solver* acoblat.

En aquesta pestanya també es poden modificar paràmetres pel que fa a la discretització de l'espai. La modificació d'aquests paràmetres influeix en la precisió dels resultats. Bàsicament el que canvia quan es modifiquen aquests paràmetres són els valors de les diferents magnituds dins d'un mateix element. No obstant les diferents opcions que hi ha queden fora de l'abast d'aquest projecte i s'usaran les opcions per defecte.

3.3.8. Solution controls

En aquesta pestanya el Fluent ens permet modificar uns valors anomenats "factors de relaxació" que com el seu nom indica permeten "relaxar" la solució.

El funcionament normal d'un procés iteratiu seria substituir les variables en un estat per les variables en l'estat següent al finalitzar la iteració. El que fan aquests paràmetres és multiplicar la variació de cada magnitud per un coeficient inferior a la unitat abans d'usar els resultats d'una iteració per a la següent iteració. D'aquesta manera la solució evoluciona més lentament i això pot evitar divergències que es puguin donar per canvis massa bruscs de les variables.

Els valors que venen per defecte són òptims per un gran nombre de casos possibles. No obstant el alguns casos pot ser bo reduir-los abans de començar a iterar.

El que es recomana fer és iniciar els càlculs amb els valors que venen per defecte. Si els residus augmenten durant les primeres 4 o 5 iteracions és convenient reduir-los.

A mesura que avança la simulació i la solució va convergint, els valors d'aquests paràmetres es poden anar canviant i fent més grans.

Els factors de relaxació actuen segons la següent fórmula:

$$\phi_p = \phi_{p,old} + \alpha \Delta\phi_p$$

D'acord amb aquesta fórmula, el valor de les variables en la iteració n són les de la iteració n-1 més el factor de relaxació multiplicat per la variació d'aquesta variable.

3.3.9. Monitors

Per tal de tenir un control visual de l'estat de la solució, es poden visualitzar el que es coneix com a monitors. Per defecte, el *Fluent* mostra els residus, que són les diferències entre una solució i la solució de la iteració anterior de cada magnitud. En la simulació del problema en qüestió mostra els residuals de continuïtat, k, èpsilon i les tres components de velocitat. S'espera que els residuals vagin disminuint per tal de que la solució convergeixi. En la Figura 3.3.4 es mostren els residuals d'una de les simulacions realitzades en aquest treball.

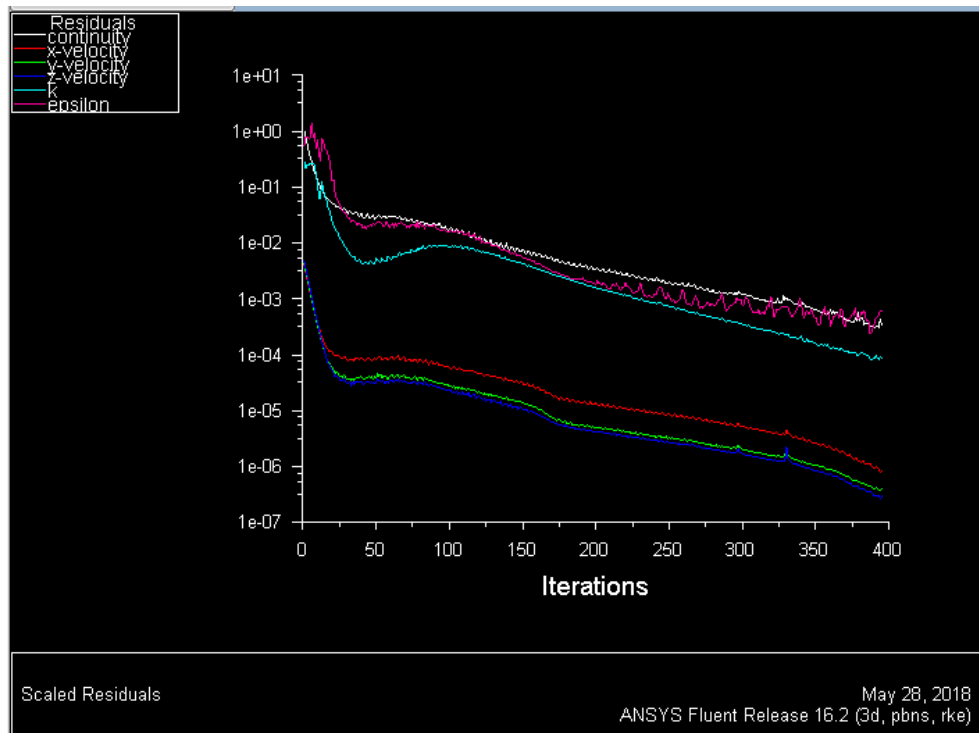


Figura 3.3.4 Residuals de la simulació de 100 cm

Durant la realització d'aquest treball hi ha hagut molts casos en els que la solució no convergia i els residus oscil·laven de manera descontrolada. Una vegada la solució es descontrola no té massa sentit modificar els factors de relaxació. La solució ha estat modificar el mallat tal com s'explica en l'apartat 3.2.

Un altre monitor que es pot visualitzar és el valor que pren C_D en cada iteració. Això ens permet veure si el valor d'aquesta constant convergeix o no. En la Figura 3.3.5 es mostra l'evolució de C_D en una de les simulacions d'aquest treball. És important tenir en compte que en configurar aquest monitor, cal introduir-ne la direcció mitjançant les components en x, y i z. En els casos sense vent lateral només cal introduir un 1 en x. En les simulacions de vent lateral, cal introduir en x el cosinus de l'angle i en z el sinus. La direcció y és la vertical.

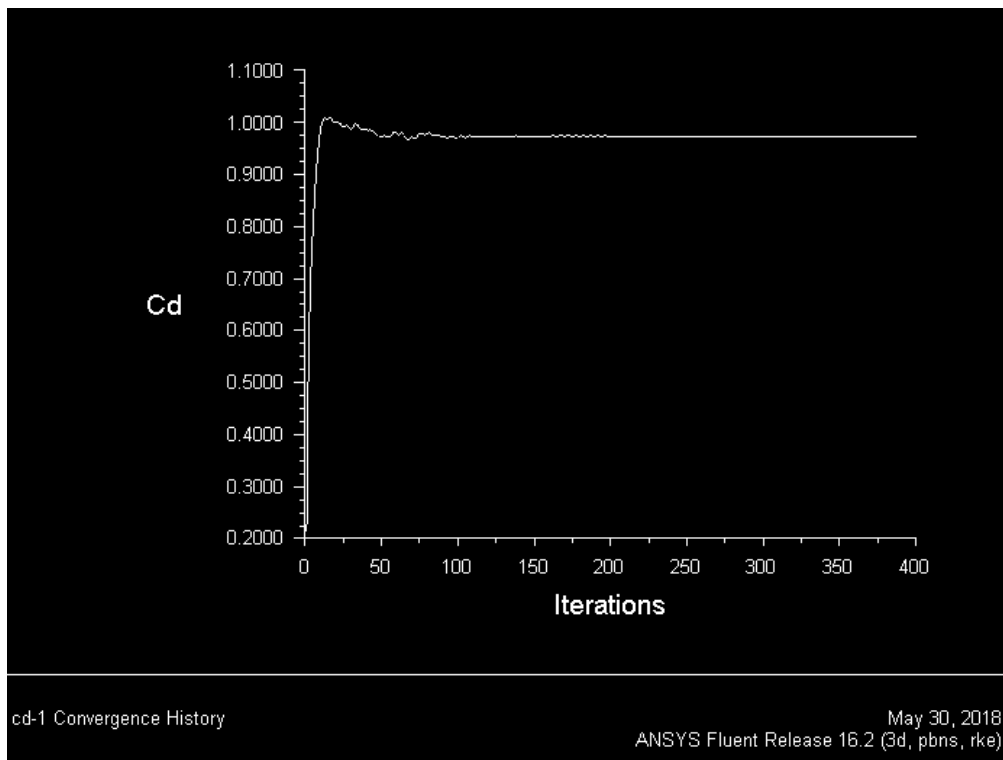


Figura 3.3.5 Evolució de C_d en la simulació de 5°

3.3.10. Inicialització de la solució

Com en tot procés iteratiu, cal introduir els valors a partir dels quals començar a iterar. L'ANSYS Fluent permet fer-ho de dues maneres diferents.

La primera consisteix en introduir manualment els valors inicials. Aquest mètode rep el nom de "inicialització *standard*".

La segona consisteix en dur a terme 10 iteracions emprant un model laminar d'una equació i usar la solució d'aquestes per començar a iterar en la simulació del problema. Aquest mètode rep el nom de "inicialització híbrida", i pot estalviar fins a unes 50 iteracions.

En la següent figura es mostra com queden les velocitats després d'aquestes 10 iteracions.

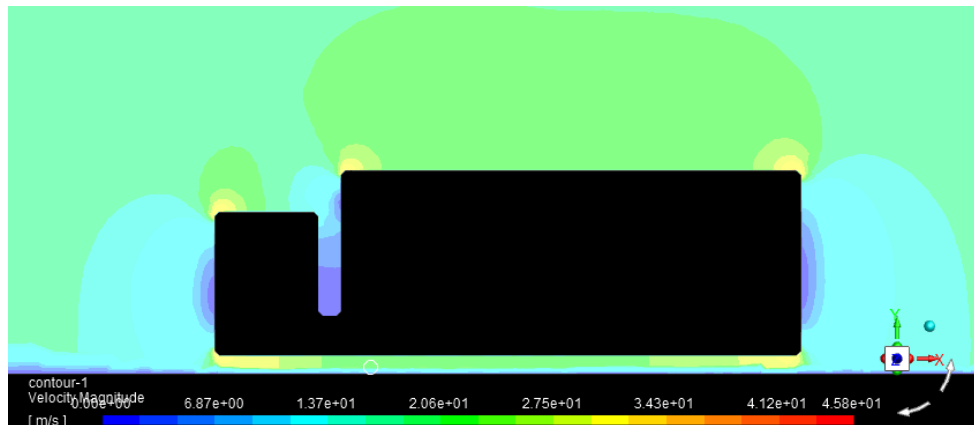


Figura 3.3.6 Velocitats després d'inicialitzar la solució amb el mètode híbrid

Com es pot veure, les magnituds de les velocitats no s'assemblen als que s'esperen per la solució final. No obstant, són un bon punt de partida ja que en aquestes 10 iteracions el fluid s'ha accelerat allà on es redueix la secció de pas i s'ha frenat en punts d'estancament. Aquest procés no dura més de 15 segons.

3.3.11. Calculation activities i Run calculation

Els últims dos passos s'expliquen de manera conjunta degut a la seva senzillesa. La pestanya "calculation activities" permet configurar esdeveniments durant el càlcul de la solució, com per exemple guardar cada 100 iteracions o guardar captures de pantalla per fer una animació a posteriori.

L'apartat "Run calculation" senzillament ens permet introduir el nombre d'iteracions que es volen fer i iniciar el càlcul.

4. Resultats i *post processing*

El Fluent ofereix un gran ventall de possibilitats a l'hora de mostrar els resultats, que poden ser velocitats, pressions, energia, densitat, etc. Això inclou dibuixar contorns i gràfics sobre qualsevol superfície del volum de control. També permet dibuixar vectors i línies de corrent, i crear geometries auxiliars per a facilitar la interpretació dels resultats.

En el següents apartats s'exposen les solucions obtingues i es mostres alguns gràfics interessants.

4.1. Resultats de les simulacions sense vent lateral

Com es definia en els objectius del treball, primer es vol veure com canvia C_D en modificar la distància entre la cabina i el remolc. S'ha calculat per cada cas la força d'arrossegament que actua sobre el camió emprant la fórmula introduïda en l'apartat 2.7. Per fer-ho s'ha considerat l'àrea frontal de $10,247 \text{ m}^2$, una velocitat de 20 m/s i una densitat de l'aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Els resultats obtinguts han estat els següents:

Separació [cm]	C_D	Força resultant [N]	Força de fricció [N]	Força de pressió [N]
50	0,9209	2311,93	54,58	2257,35
100	0,9878	2479,89	53,91	2425,98
150	1,0025	2516,79	54,47	2462,32

Taula 4.1.1 Resultats de les simulacions sense vent lateral

Per valorar els resultats d'una manera més visual s'han representat en un gràfic separació- C_D i s'han unit els tres resultats amb línies. Val a dir que les línies són només perquè sigui més fàcil veure l'evolució de C_D i que en cap cas significa que es puguin interpolat valors intermedis.

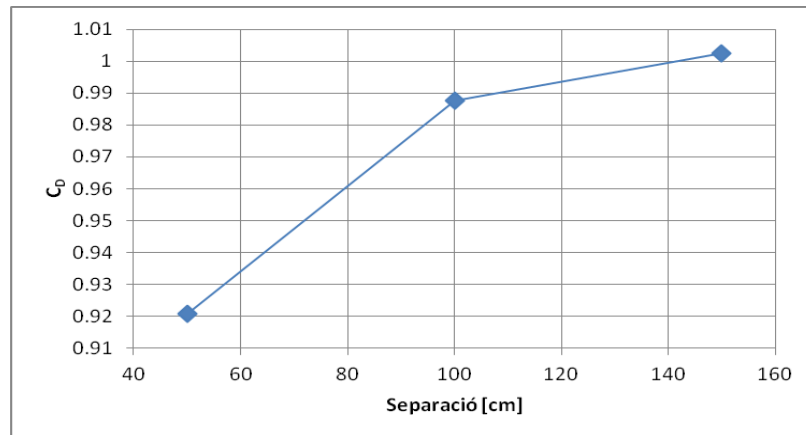


Figura 4.1.1 C_d vs separació

Hucho presenta en el seu llibre un gràfic de C_D parcials, separades per a cada part del camió.

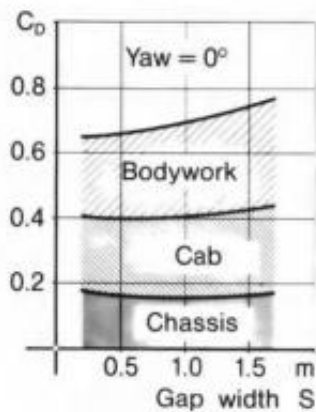


Figura 4.1.2 C_d vs separació segons Hucho

Tot i que en l'estudi d'aquest treball no s'han calculat les constants d'arrossegament parcials, els resultats obtinguts són comparables amb els d'Hucho.

Es pot observar clarament una tendència a l'alça en augmentar la distància entre la tractora i el remolc. Això és degut a que les diferents parts del vehicle interaccionen entre si augmentant les forces d'arrossegament. Com més properes siguin les parts del camió, més s'assimilarà aquest a un únic cos i per tant menor serà la influència sobre C_D .

En les següents imatges es pot observar la velocitat del flux en el pla de simetria i la distribució de pressions en el camió.

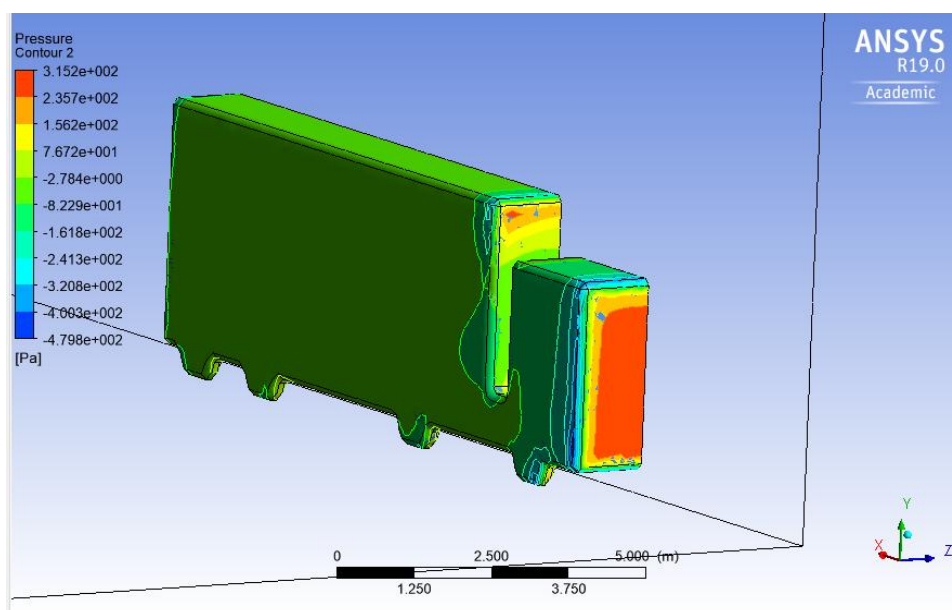


Figura 4.1.3 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 50 cm

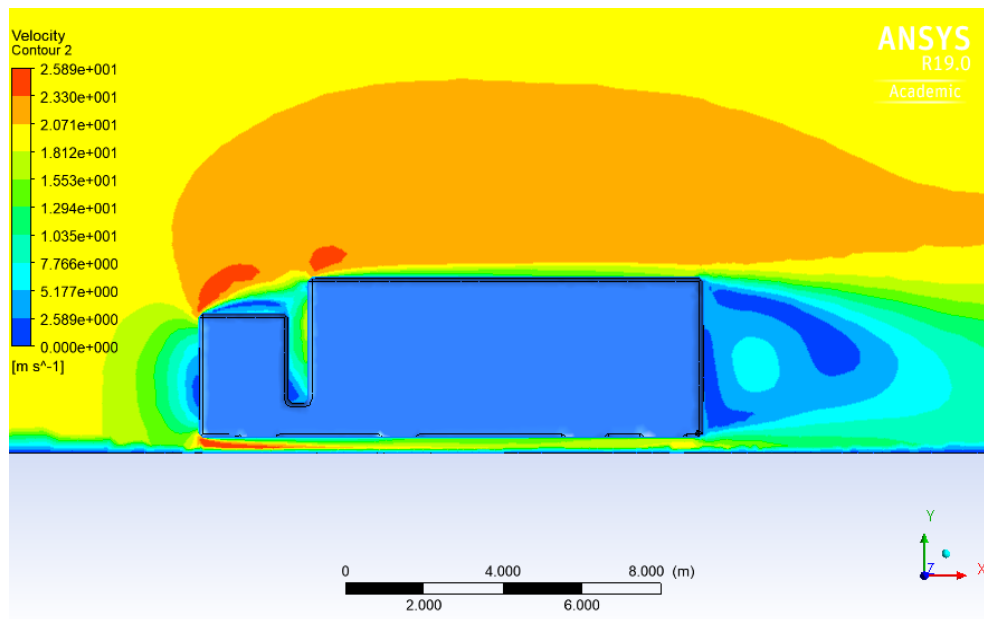


Figura 4.1.4 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 50 cm

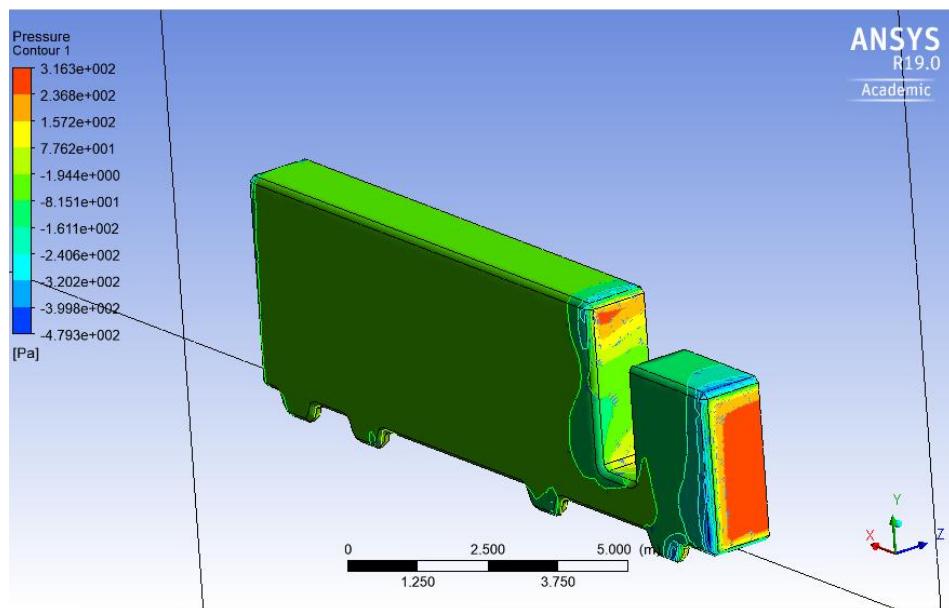


Figura 4.1.5 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 100 cm

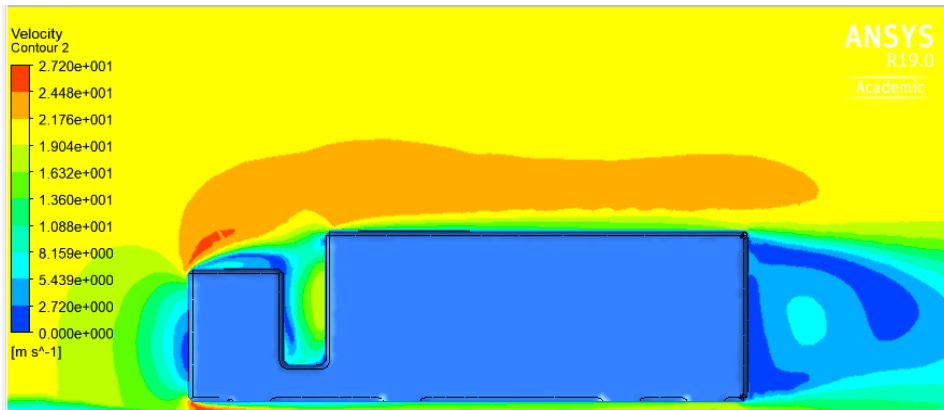


Figura 4.1.6 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 100 cm

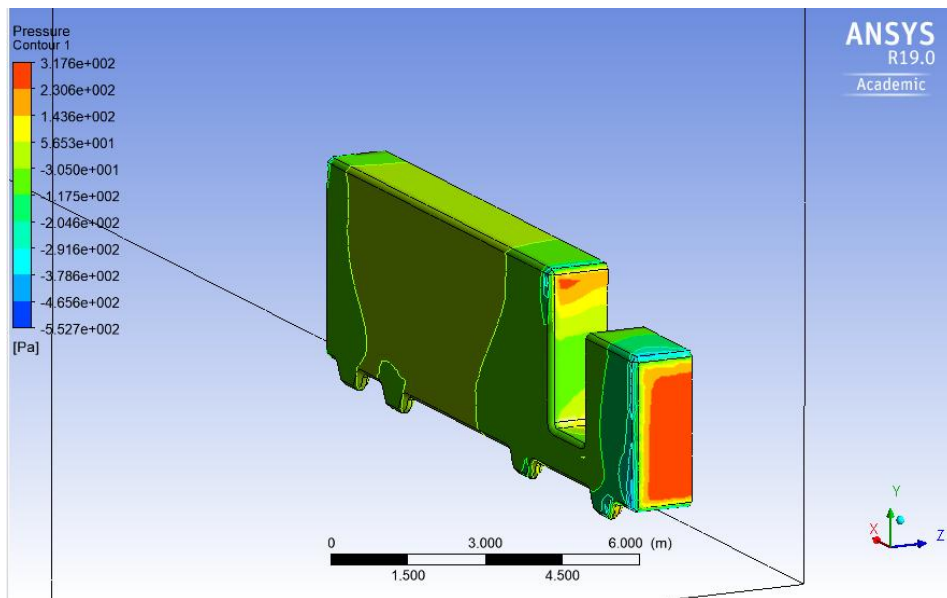


Figura 4.1.7 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 150 cm

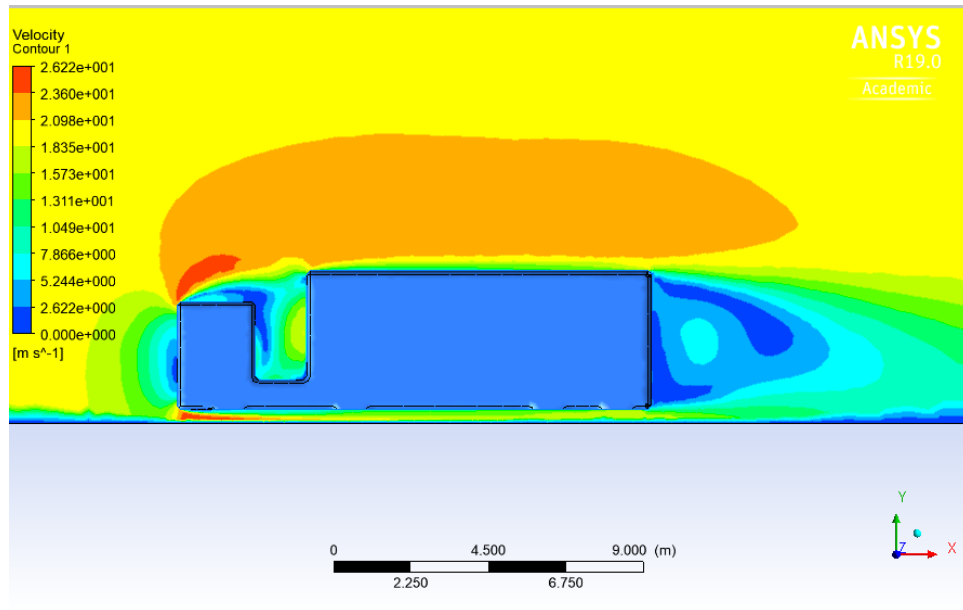


Figura 4.1.8 Distribució de velocitats en el pla de simetria en la simulació de 150 cm

Es pot observar com, segons el teorema de Bernoulli, l'aire s'accelera quan es redueix la secció de pas. Es pot veure també com la contribució majoritària al *drag* es deu a les forces de pressió.

De les figures que mostren la distribució de pressions sobre el camió s'extreu també que com més gran és l'espai entre la cabina i el remolc, major és la pressió en el remolc i, per tant, major la força. S'aprecia també un deixant considerable en tots els casos.

En la següent figura es mostra la turbulència generada a l'espai entre la cabina i el remolc i al deixant.

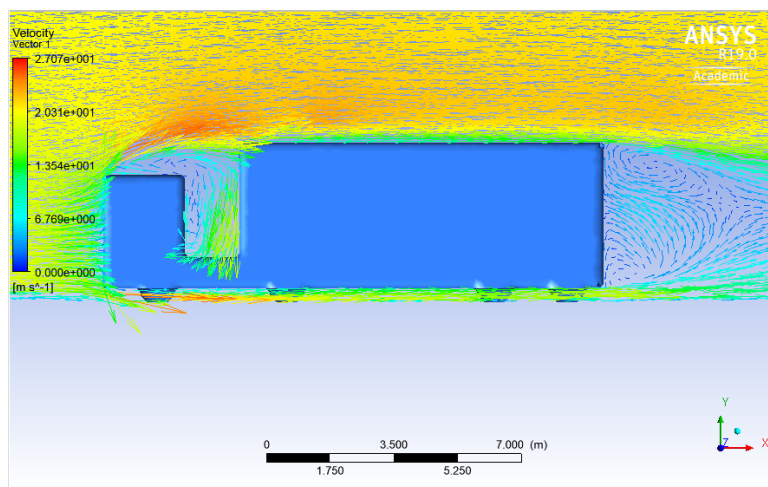


Figura 4.1.9 Vectors velocitat en la simulació de 50 cm

Finalment es vol mostrar, en la següent figura, el desenvolupament de la capa límit a sobre el remolc en la simulació de 50 cm. Es pot apreciar en la següent figura com existeix el gradient de velocitats. Tal com s'ha explicat en l'apartat 2.1, aquest gradient genera forces de fricció.

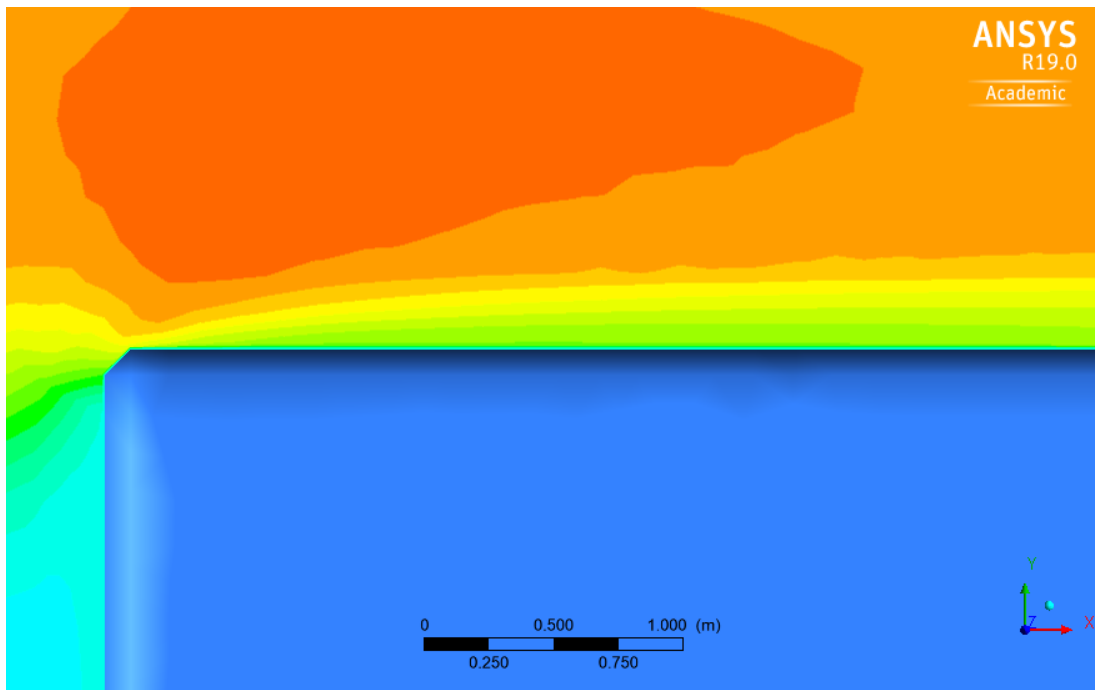


Figura 4.1.10 Detall de la capa límit

4.2. Resultats de les simulacions amb vent lateral

Anàlogament, es presenten els resultats de les simulacions amb vent lateral.

Angle [°]	C_D	Força resultant [N]	Força de fricció [N]	Força de pressió [N]
5	0,9727	2443,85	51,79	2392,07
10	1,1608	2912,33	63,16	2849,16
15	1,2719	3195,38	69,63	3125,75

Taula 4.2.1 Resultats de les simulacions amb vent lateral

La representació dels resultats en un gràfic C_D -angle queda de la següent forma:

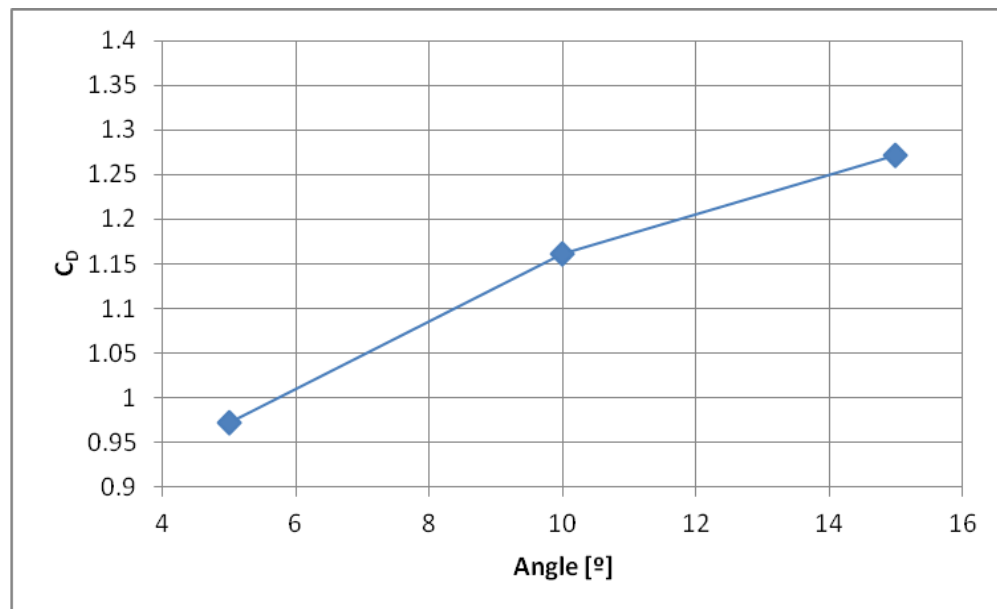


Figura 4.2.1 C_d vs angle

Els resultats esperats segons Hucho haurien de tenir la forma següent:

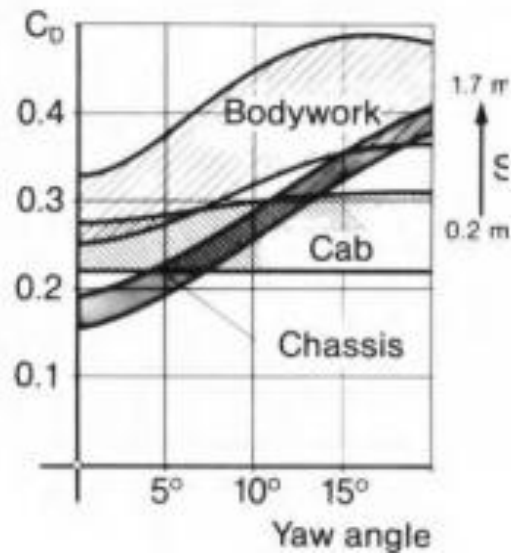


Figura 4.2.2 C_D vs angle segons Hucho

Es veu, doncs, que els C_D augmenten en augmentar l'angle d'incidència del vent. Es pot veure també com segons Hucho la C_D que canvia més en variar l'angle és la del remolc.

En les següents figures es mostra la distribució de pressions sobre el camió en cada simulació així com la velocitat de l'aire en un pla paral·lel al terra a una altura de 2 metres.

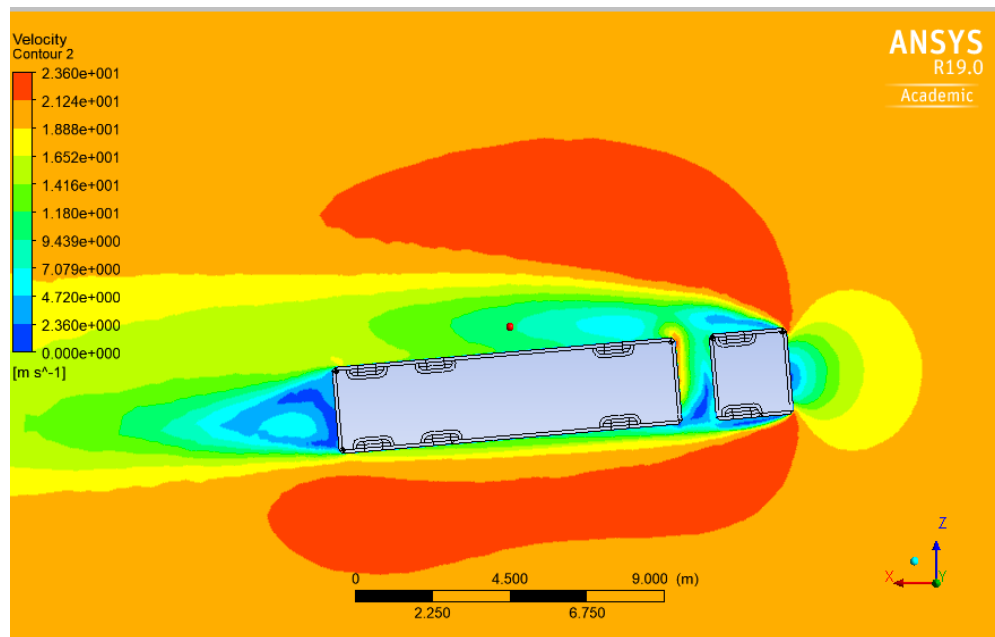


Figura 4.2.3 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 5 graus

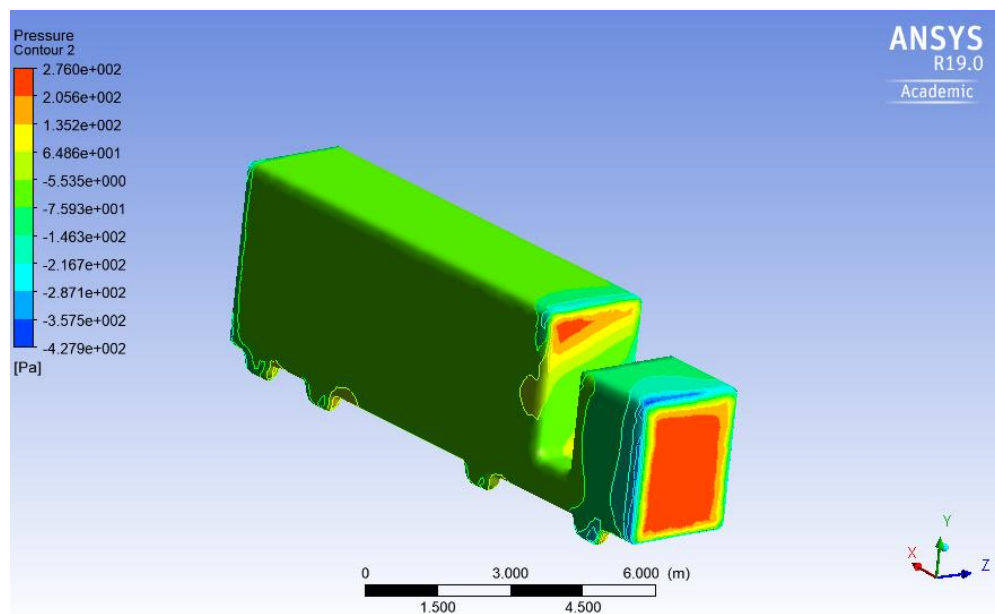


Figura 4.2.4 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 5 graus

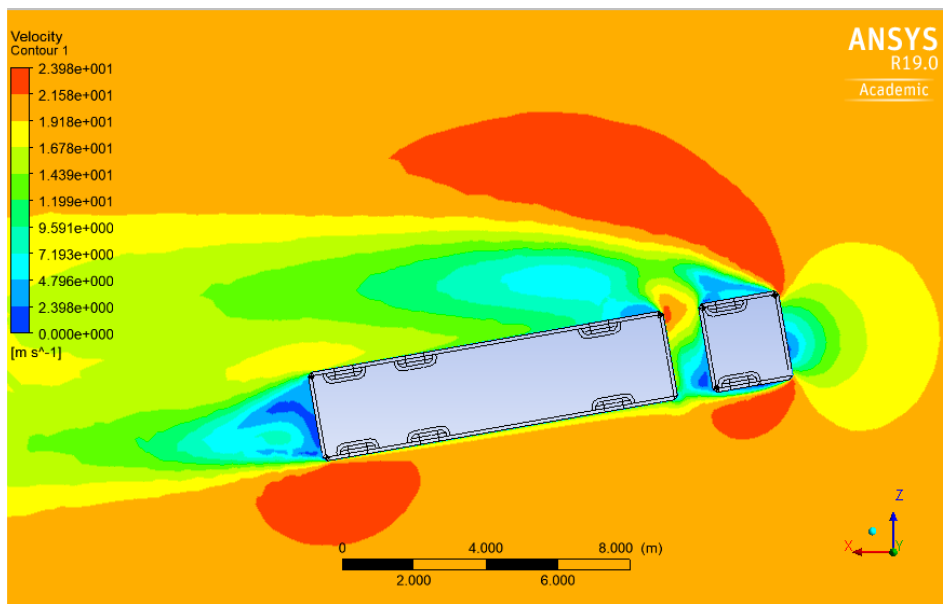


Figura 4.2.5 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 10 graus

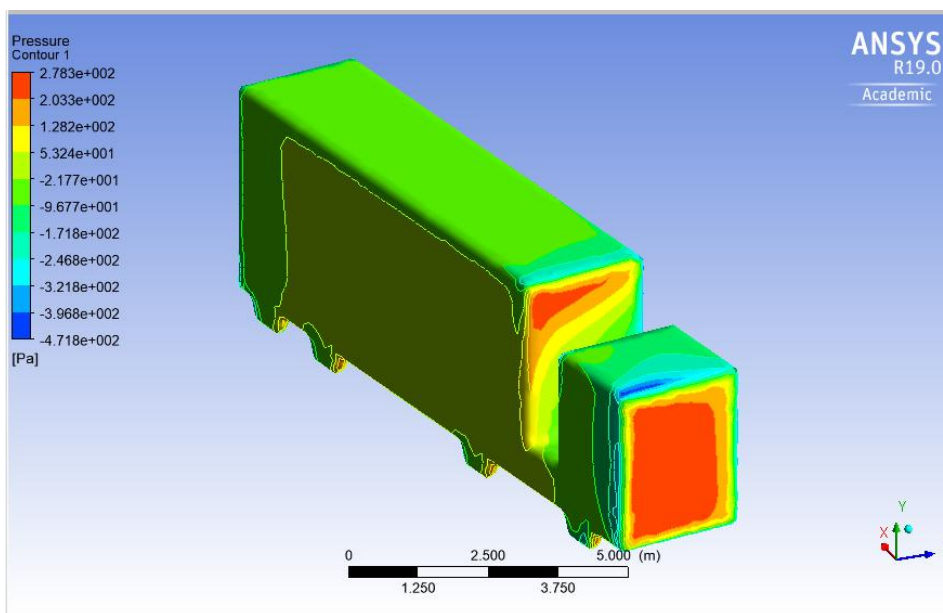


Figura 4.2.6 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 10 graus

Per mostrar una de les utilitats del *post processor*, es mostra una de les opcions per visualitzar línies de corrent. S'ha definit una línia horitzontal davant del camió a dos metres d'alçada i s'ha fet que d'aquesta línia neixin les línies de corrent. El resultat es pot veure a la següent figura.

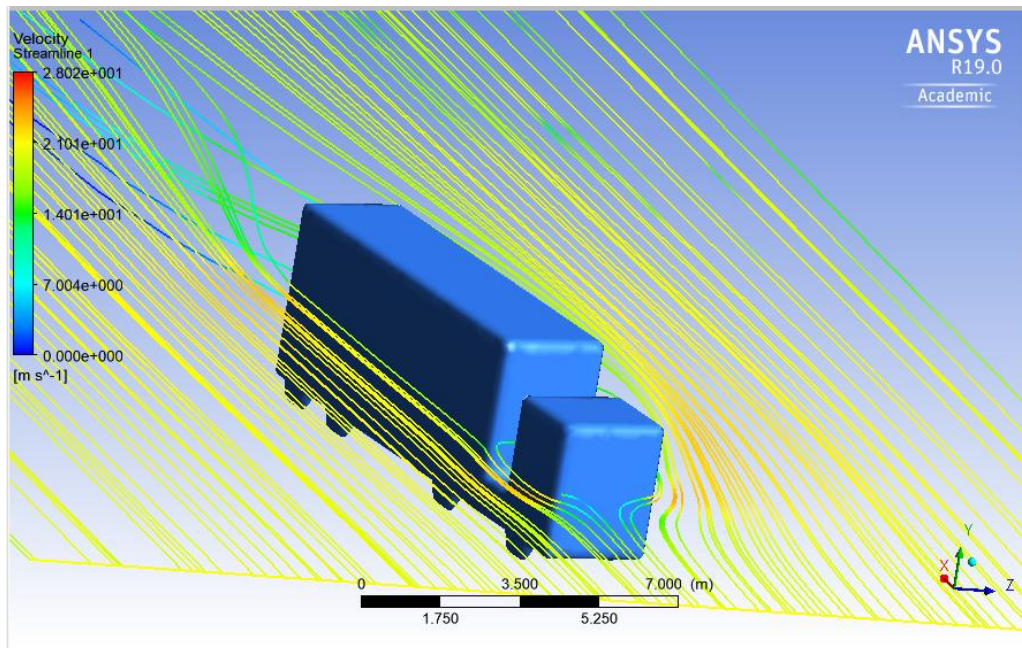
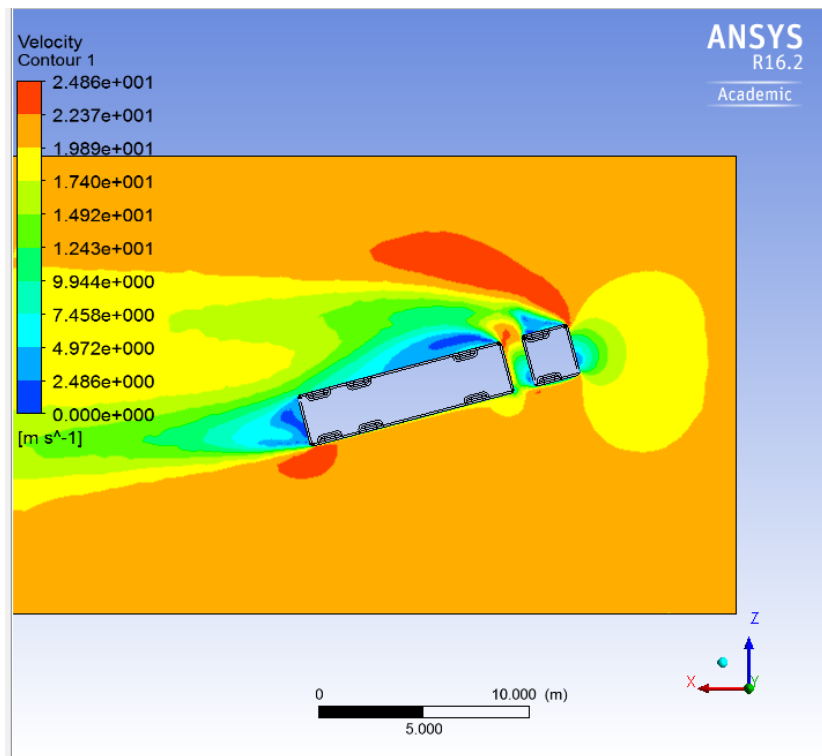


Figura 4.2.7 Línies de corrent en la simulació de 10 graus



4.2.8 Distribució de velocitats en un pla a 2 metres del terra en la simulació de 15 graus

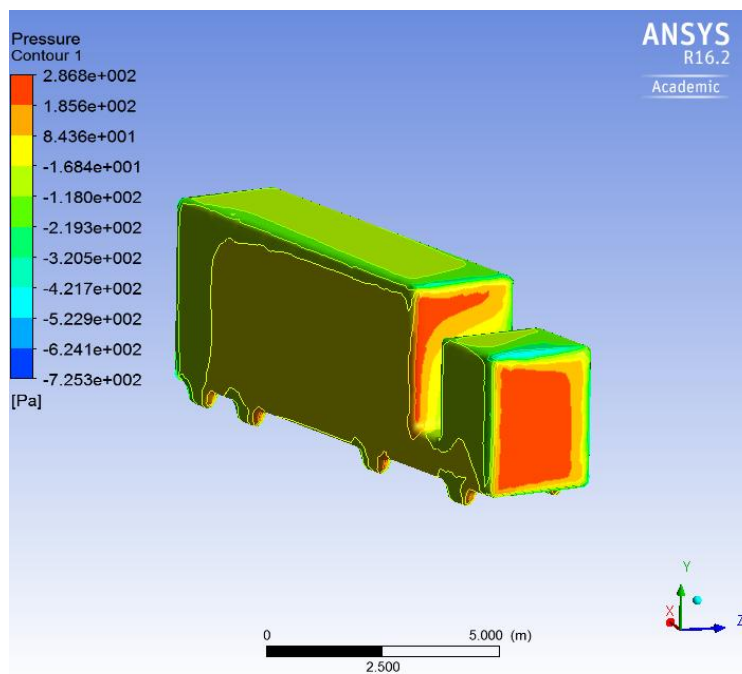


Figura 4.2.9 Distribució de pressions sobre el camió en la simulació de 15 graus

S'observa com en augmentar l'angle d'incidència del vent, major és l'àrea del remolc sobre la que xoca el vent, produint en la paret una pressió. A més la magnitud de les pressions també augmenta amb l'angle.

A més, com més gran és l'angle, més gran és la separació del flux, i com s'ha vist en el punt 2 això també és una font de força d'arrossegament.

La següent figura mostra els vectors de velocitat en un pla paral·lel al terra a 2 metres d'aquest. També mostra, sobre les parets del camió, els vectors de l'esforç que pateixen. Tot pel cas de 5 graus.

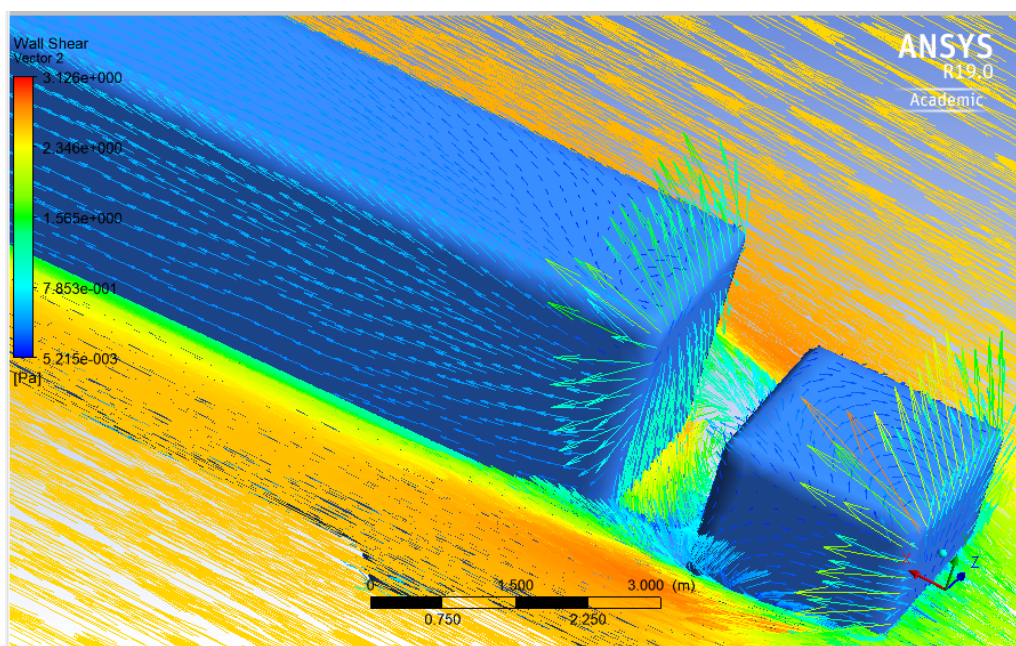


Figura 4.2.10 Vectors de velocitat i tensió a la paret de la simulació de 5 graus

Es veu, doncs, que per petit que sigui l'angle ja hi ha una part del flux que passa per l'espai entre la cabina i el remolc, generant turbulències i esforços sobre la paret del remolc.

5. Conclusions

Un cop acabada tota la feina, és hora de valorar si s'han acomplert els objectius que es proposava el treball.

Pel que fa al primer, que era comprovar com la C_D augmentava en augmentar la distància entre la tractora i el remolc i l'angle d'incidència del vent, es pot afirmar que s'ha aconseguit. Tot i haver realitzat l'estudi amb finalitats docents i per tant amb una geometria molt senzilla, s'han aconseguit uns resultats que s'assimilen als d'Hucho.

Això demostra la potència del CFD i reafirma que la simulació aerodinàmica, tot i ser complicada i cara si és amb finalitats professionals, suposa un estalvi de temps i diners respecte a l'experimentació a escala real.

Tot i que el túnel de vent és el lloc idoni on fer treball de desenvolupament, quan s'ha de fer amb vehicles comercials pot ser problemàtic degut a les dimensions d'aquests. Això implica que s'han de fer experiments a escala, cosa que implica, al mateix temps, una pèrdua de detalls superficials en el model. Això fa que la simulació CFD sigui, doncs, una bona alternativa.

Un altre objectiu, tot i que potser quedava amagat darrere el primer, era intentar que aquest treball servís de guia per a la utilització del programa *ANSYS Fluent*. Si bé és cert que no s'ha aprofundit en el funcionament més matemàtic del programa, si que s'han explicat els passos a seguir per posar en marxa una simulació. Per tant, i assumint una vegada més les finalitats docents d'aquest treball, es pot donar l'objectiu per acomplert.

Com a valoració personal puc dir que tot i usar la major part del temps en aprendre a fer funcionar el programa, he après molt sobre aquest i sobre l'aerodinàmica en general. A més he mirat més enllà dels objectius del treball i m'he donat compte de la importància d'estudiar l'aerodinàmica.

Optimitzant el disseny dels vehicles per tal de reduir la C_D , es pot aconseguir reduir el consum de combustible dels vehicles, així com les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Segons Hucho, si s'aconsegueix reduir C_D en un 35% es pot tenir un estalvi de fuel de fins a un 12%.

En un món on el vehicle elèctric encara no té prou protagonisme, la investigació i desenvolupament per reduir l'impacte ambiental dels vehicles amb motor d'explosió ha de ser prioritari, igual que ho ha de ser l'ús d'eines com el CFD.

Pel que fa a la finalitat docent d'aquest treball, ha quedat demostrat que la simulació mitjançant ANSYS és un bon recurs. No només per veure com un programa mitjançant càlculs amb elements finits pot obtenir resultats que es poden assimilar a la realitat, sinó per comprovar fenòmens aerodinàmics la teoria dels quals es pugui haver estudiat.

El treball sencer com a pràctica docent seria una feina excessiva i impossible de dur a terme en el temps que solen durar les sessions de pràctiques. Malgrat això, si que es podrien proporcionar als alumnes els fitxers amb les malles ja fetes, o amb els càlculs ja realitzats, i que aquests hagin de respondre a preguntes sobre els resultats utilitzant l'eina de post processament.

Amb els resultats d'aquest treball també es pot anar una mica més lluny i intentar veure, d'acord amb els coneixements adquirits en assignatures d'aerodinàmica, quins canvis podrien millorar l'avanç del camió, o en altres paraules: com es podria reduir la pressió que rep la paret del remolc quan la separació és gran, o com aconseguir que l'efecte del deixant sigui menor, entre altres.

Ja per concloure afegir que, segons el parer de l'autor d'aquest treball, s'ha realitzat una bona feina i malgrat totes les complicacions trobades durant el trajecte, al final s'ha aconseguit assolir els objectius del projecte.

6. Impacte ambiental

La totalitat d'aquest treball ha estat feta usant un ordinador, per tant a l'hora d'intentar mesurar l'impacte ambiental pot ser complicat trobar equivalències. No obstant, segons MANAGEMENT GREEN IT, les emissions de CO2 equivalent durant la utilització d'un ordinador poden anar de 7 fins a 75 kg l'any, depenent del país [3].

Considerant un valor mig, de 44,5 kg de CO2 l'any, i tenint en compte que l'ordinador ha estat funcionant unes 268 hores, podem estimar que les emissions de CO2 equivalent han estat d'uns 1,5 kg.

Malgrat això, el fet de simular els problemes d'aerodinàmica suposa un estalvi energètic molt gran respecte a l'experimentació en túnel de vent.

S'ha estimat que un ordinador consumeix uns 30 Watts.

No s'ha pogut aconseguir informació sobre el consum dels túnels de vent per a experimentació aerodinàmica. No obstant s'han trobat dades sobre un túnel de vent per a entrenaments de paracaigudisme, i aquest consumeix 1300 kW [4].

Així doncs, queda clar que el consum energètic i conseqüentment l'impacte ambiental són molt més petits en fer simulacions enlloc d'experimentacions en projectes de l'abast i complexitat com els d'aquest treball.

7. Pressupost

En relació a l'estudi econòmic del projecte, s'ha estimat el cost global del projecte, suposant que és dut a terme per un estudiant fent pràctiques en una empresa o a la universitat. Donat que aquest estudi ha estat realitzat usant solament un ordinador, no hi ha hagut despeses de construcció ni de compra de materials. Les despeses considerades han estat el sou de l'estudiant en pràctiques, el cost del consum elèctric de l'ordinador, a més del cost de desplaçament de l'estudiant fins al lloc de treball. També s'ha considerat l'hipotètic lloguer d'un espai per treballar que es considera de 500 €/mes.

Pel que fa al sou de l'estudiant, s'ha considerat de 15 €/hora.

El cost de desplaçament s'ha calculat suposant que l'estudiant es desplaça en transport públic i assumint que ha anat i tornat del lloc de treball 4 dies per setmana. Això són 8 viatges cada setmana, que multiplicat per les 12 setmanes que ha durat aquest projecte aproximadament són uns 100 viatges, o 10 abonaments de transport de TMB del tipus T-10. Aquest abonament té un preu de 10,20 €.

Pel que fa al consum de llum, s'ha suposat un preu de 0,14 €/kWh i un consum de 0,15 kWh/hora. Segons la planificació, s'ha usat l'ordinador durant 268 hores. Per tant el consum ha estat de 40,2 kWh.

També s'ha considerat un cost un 5% més elevat per tenir en compte la incertesa present en tots els projectes d'enginyeria.

Així doncs el cost total del projecte és el que es mostra a la següent taula.

Concepte	Preu unitari	Unitats	Total (€)
Sou Enginyer	15 €/hora	268	4020
Transport	10,20 €/abonament	10	102
Consum energètic	0,14 €/kWh	40,2	5,6
Lloguer espai	500 €/mes	4	2000
Cost total			6127,6
Incertesa (5%)			306,4
Total sense IVA			6434
Total amb IVA (21%)			7785,1

Taula 7.1 Pressupost del projecte

8. Agraïments

Primer de tot voldria agrair als meus pares tot el suport que m'han donat durant tots els mesos que ha durat la confecció d'aquest Treball de Fi de Grau. L'escalf i els ànims que m'han aportat sobretot durant l'última etapa de l'elaboració del TFG han estat vitals per seguir motivat fins el final.

També agrair al tutor i director d'aquest treball, Esteve Jou Santacreu, la paciència i el temps dedicat a orientar-me i a transmetre'm els seus coneixements sobre la simulació de fluids i la mecànica de fluids en general. El meu primer contacte amb la mecànica de fluids va ser en les seves classes, i la seva manera amena d'impartir va despertar en mi un interès en la matèria. Aquest interès és el que m'ha portat a realitzar el Treball de Fi de Grau sobre l'aerodinàmica.

També he d'agrair a l'usuari de *Youtube* SIRIUS CFD el fet d'haver creat un vídeo [2] on s'explica molt detalladament com utilitzar el *Fluent* des de zero.

Així mateix, m'agradaria donar gràcies a totes les persones que de manera directa o indirecta han contribuït en l'elaboració d'aquest treball.

9. Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich (ed.). *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. Elsevier, 2013.
- [2] SIRIUS CFD, *ANSYS Fluent for Vehicle Aerodynamics* [Vídeo] [<https://www.youtube.com/user/eoescipy/videos>, 28 de febrer de 2018]
- [3] MANAGEMENT GREEN IT, *¿Sabes cuánto CO2 emite tu computador?* 2013 [<http://www.mgreenit.co/2013/03/sabes-cuanto-co2-emite-tu-computador.html>, 18 de juny de 2018]
- [4] iFLY, *Vertical Wind Tunnels - Just how do they work?* [<https://downunder.iflyworld.com/what-is-ifly/technology>, 18 de juny de 2018]

Bibliografia consultada

- [5] WILCOX, David C., et al. *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, CA: DCW industries, 1993.
- [6] NASA, *What is drag?* EEUU, 2015 [<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drag1.html>, 10 de juny de 2018]
- [7] ANSYS, Inc, *Introductory FLUENT Notes*. 2006 [<http://www.engr.uconn.edu/~barbertj/CFD%20Training/Fluent/4%20Solver%20Settings.pdf>, 15 de març de 2018]

Bibliografia complementària

- [8] LO, Kin Hing; KONTIS, Konstantinos. Flow around an articulated lorry model. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82: 58-74.
- [9] COYAGO, Abel Remache, et al. 2. Análisis aerodinámico regional mediante cfd de un semirremolque cisterna para transporte de cemento. *APORTE SANTIAGUINO*, 2017, 8.2.

- [10] SOLOCAMION.ES, *La aerodinàmica en los camiones.* 2016
[<https://www.solocamion.es/la-aerodinamica-los-camiones/>, 5 de març de 2018]