

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

MEMÒRIA

Autor: Konstantin Bulantsev
Director/s: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Setembre 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUM

La força del vent és molt important a considerar a l'hora de construir tant estructures (ponts per exemple) com també edificis. Per consegüent és necessari estudiar els efectes aerodinàmics que produeix el vent ja que té influència directa sobre l'estabilitat i el vinclament d'aquestes estructures i per tant també sobre la seguretat dels usuaris habituals d'aquestes. Dit d'una altra forma, la vida de moltes persones pot dependre d'aquests efectes.

Aquest treball pretén fer un estudi aerodinàmic d'una maqueta d'un edifici fent èmfasi només en aquesta part.

Per l'estudi es farà servir un túnel de vent i la mecànica de fluids computacional (CFD).

ÍNDEX

RESUM.....	2
1 GLOSSARI	6
2 PREFACI.....	8
2.1 Origen del projecte	8
2.2 Motivació	8
2.3 Requeriments previs.....	9
3 INTRODUCCIÓ	10
3.1 Objectius del projecte.....	10
3.2 Abast del projecte.....	10
3.3 Metodologia.....	10
4 AERODINÀMICA	11
4.1 Fonaments aerodinàmics.....	11
4.1.1 Què és l'aerodinàmica?.....	11
4.1.2 Nombres adimensionals.....	12
4.1.3 Equacions i principis utilitzats.....	14
4.1.4 Forces aerodinàmiques.....	18
4.1.5 Capa límit.....	20
4.2 Túnel de vent.....	21
4.2.1 Definició i parts principals	21
4.2.2 Naixement del túnel de vent	24
4.2.3 Classificació de túnels de vent.....	27
5 PROPOSTA DE RESOLUCIÓ.....	31
5.1 Construcció de la maqueta	31
5.2 Problema inesperat i simulació experimental.....	35
5.2.1 Mesura de la velocitat i la pressió	36
5.2.2 Simulació línies de corrent	37
5.3 Preparació de la simulació amb CFD	38
5.3.1 Creació de la geometria principal	38
5.3.2 Modificació de la geometria.....	39
5.3.3 Definició del mallat	40
5.3.4 Configuració de les propietats.....	41

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

6	RESULTATS I COMPARACIÓ	43
6.1	Resultats del túnel de vent (ventilador axial)	43
6.2	Resultats simulació CFD	44
7.	PLANIFICACIÓ TEMPORAL	54
8.	PRESSUPOST	55
9.	IMPACTE AMBIENTAL.....	57
10.	CONCLUSIONS.....	58
11.	AGRAÏMENTS	60
	BIBLIOGRAFIA	61
	ANNEX.....	64
	Annex 1: teorema π de Buckingham.....	64
	Annex 2: plànols.....	65

1 GLOSSARI

- **Aerodinàmica:** branca de la mecànica de fluids que estudia la interacció entre els cossos sòlids i l'aire a través del qual es desplaça o està situat aquest sòlid.
- **Àrea frontal:** és l'àrea del prototip vista des del davant i és la que es veu afectada per la força de resistència a l'avanç.
- **Capa límit:** és la regió d'un fluid en moviment a les proximitats d'una superfície sòlida que es veu influenciada per la presència de dita superfície. A la capa existeixen importants gradients de velocitat i pot haver-ne també de temperatura, tot concentrant-se en ella la major part de la resistència de quantitat de moviment, energia o matèria.
- **Coefficient de resistència a l'avanç C_D :** coeficient que indica la resistència que pateix un cos al moviment en la direcció d'aquest.
- **Fluid incompressible:** és aquell fluid la densitat del qual roman constant amb el pas del temps i té la capacitat d'oposar-se a la compressió del mateix sota qualsevol condició, és a dir, ni la massa ni el volum poden canviar.
- **Flux laminar:** moviment d'un fluid en el que les partícules es mouen de manera ordenada o suau. Les lamines del fluid es mouen en paral·lel sense barrejar-se les unes amb les altres.
- **Flux turbulent:** moviment d'un fluid en el que les partícules es mouen desordenadament i formant trajectòries similars a la dels remolins.
- **Força de resistència a l'avanç:** força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid amb direcció paral·lela a la de la velocitat del corrent incident.
- **Força de sustentació:** força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid de direcció perpendicular a la de la velocitat del corrent incident.
- **Línia de corrent:** línia que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt.
- **Mecànica de fluids Computacional (CFD):** és una de les branques de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes sobre el flux de substàncies.
- **Nombre adimensional:** nombre que no té unitats físiques de mesura que el defineixin.
- **Nombre de Mach:** és una mesura de velocitat relativa que es defineix com el quocient entre la velocitat d'un objecte i la del so en el mitjà en el que es mou l'objecte.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

- **Nombre de Reynolds:** és un nombre adimensional utilitzat en mecànica de fluids, disseny de reactors i fenòmens de transport per caracteritzar el moviment d'un fluid.
- **Principi de Bernoulli:** descriu el comportament d'un fluid. D'aquí es dedueix que els punts amb màxima velocitat són els que tenen menor pressió i al revés.
- **Sonda de Prandtl:** aparell que mesura la diferència entre la pressió total (pressió dinàmica + pressió estàtica) i la pressió estàtica en un punt d'una corrent fluida, és a dir, dona la pressió dinàmica, partint de la qual es calcula la velocitat del fluid.
- **Trajectòria:** camí real seguit per una partícula fluida.
- **Túnel de vent:** és una eina d'investigació desenvolupada per ajudar en l'estudi d'efectes del moviment de l'aire al voltant d'objectes sòlids.

2 PREFACI

2.1 Origen del projecte

Després de buscar durant un cert temps un tema pel treball de fi de grau que m'agradi i que el pugui desenvolupar amb ganes i il·lusió, el vaig trobar en la borsa de treballs de l'escola: estudiar l'aerodinàmica d'una part d'un cotxe de fórmula 1. Però quan vaig anar a parlar amb el tutor, Enric Trillas, per tal d'enllestir els tràmits em va dir que ja tenia molts alumnes i que pràcticament tots els alerons possibles per estudiar ja estaven agafats.

No obstant, em va proposar el tema el qual estic desenvolupant en aquest treball: estudiar l'acció del vent sobre edificis. El primer que se'm va passar pel cap respecte a aquest tema va ser un "acudit" que el mateix Enric va explicar en una classe de mecànica de fluids: fa uns quants anys les finestres de l'ETSEIB situades a la part posterior de l'edifici respecte l'impacte del vent, es trencaven per culpa de les turbulències que es produïen i per això es va haver d'instal·lar certs reforços en l'estructura.

Òbviament com a futur enginyer em va semblar interessant estudiar aquest tema per poder veure quin és el veritable paper del vent i quina magnitud d'impacte té. Tot i que l'Enric em va deixar temps per fer una recerca més profunda sobre aquest tema o trobar un altre que m'agradi, jo ja havia decidit que aquest seria el tema del meu treball de fi de grau.

2.2 Motivació

Tal com he mencionat en l'apartat anterior, el món de l'aerodinàmica (sobretot a la fórmula 1) m'ha interessat molt durant bastant de temps. Per això era una opció segura a l'hora de triar un tema pel treball de fi de grau.

Tot i que al final el tema no tracta ben bé del món de l'automoció i la competició, segueix sent molt interessant i important. La construcció de grans estructures com ponts i edificis (sobretot gratacels) es veu implicada directament pel vent. L'aire en moviment pot arribar a ser molt perillós i pot arribar a destruir completament estructures mal dissenyades. Fins i tot la vida de moltes persones, usuàries d'aquestes edificacions, depèn directament del disseny de l'estructura per combatre l'acció del vent.

En definitiu és un projecte interessant des del punt de vista aerodinàmic.

2.3 Requeriments previs

Per a poder desenvolupar i entendre aquest projecte es recomana tenir uns coneixements mínims pel que fa a la mecànica de fluids i concretament en l'aerodinàmica.

A més seria necessari conèixer els principis bàsics de simulacions per elements finits encara que no s'ha de saber a fons el funcionament del software de CFD utilitzat per a la simulació.

3 INTRODUCCIÓ

3.1 Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és comprendre la importància de l'aerodinàmica en el sector de construcció a través de l'estudi de l'impacte del vent sobre edificis i quines conseqüències porta això.

L'estudi no es farà sobre un edifici real en concret sinó sobre una maqueta i amb l'ajuda del túnel del vent de l'escola (posteriorment es veurà que al final s'ha fet amb un ventilador axial) i a través de la simulació per elements finits. Per tant dos dels objectius implícits són aprendre el funcionament del túnel i ampliar els coneixements dels elements finits adquirits anteriorment en assignatures de la carrera al camp de mecànica de fluids (aprenent a utilitzar el software corresponent).

Amb els resultats obtinguts s'haurà de fer una comparació entre els 2 mètodes per tal d'extrapolar resultats que s'ajustin més a la realitat.

3.2 Abast del projecte

En primer lloc s'introduirà el concepte de l'aerodinàmica i de on prové i s'explicaran els conceptes necessaris per entendre el projecte.

En segon lloc, es construirà una maqueta predimensionada segons les dimensions màximes i mínimes del túnel de vent. Seguidament, es farà la simulació utilitzant el túnel i també una altre simulació per ordinador (CFD). La maqueta, com s'ha dit amb anterioritat, no serà d'un edifici en concret degut a les restriccions de dimensions imposades pel túnel.

Per últim cal afegir que no s'estudiaran altres conceptes com els materials, estructurals o altres associats a l'edificació.

3.3 Metodologia

Mitjançant el programa *Catia v5* es crearà la geometria de l'edifici estudiat i posteriorment es simularà amb el software *Ansys Fluent 17*. Cal dir que s'ha escollit 2 posicions edifici-vent, una de les quals és la més desfavorable (vent en direcció perpendicular a la superfície més gran). Aquesta posició ens indicarà les pressions màximes que hauria de suportar l'estructura amb una velocitat de l'aire determinada.

4 AERODINÀMICA

4.1 Fonaments aerodinàmics

4.1.1 Què és l'aerodinàmica?

L'aerodinàmica[20] és la part de la mecànica de fluids que estudia el moviment dels gasos (no inclou líquids ja que la ciència que estudia els líquids s'anomena hidrodinàmica) sobre els cossos estacionats i el comportament dels cossos que es mouen en l'aire. L'estudi aerodinàmic consisteix en determinar les forces que realitza el fluid sobre el cos.

La importància de l'aerodinàmica resideix en el fet de que tota l'escorça terrestre està envoltada per aire i l'estudi del moviment d'aquest és vital. És probable que la funció principal d'un estudi aerodinàmic sigui conèixer el comportament dels cossos en l'aire de cara a obtenir o bé, un major rendiment, o bé una diferència de pressions que permeti l'elevació d'un cos.

No obstant això, hi ha altres usos en els que no es busca cap d'aquests objectius, com en el cas dels paracaigudes, en el qual es busca disminuir la velocitat de descens d'una persona o també l'estudi de l'efecte del moviment de l'aire sobre els cossos estàtics, que és important a l'hora de dissenyar edificis i estructures que poden estar afectades per l'efecte del vent, que és, al cap i a la fi, aire en moviment. L'aerodinàmica ha ajudat a prevenir grans accidents, a millorar la seguretat dels edificis i a permetre grans obres arquitectòniques que no haguessin estat possibles sense un bon estudi previ de l'efecte del vent sobre elles.

Hi ha diverses alternatives per a poder fer l'estudi aerodinàmic d'un cos. La primera opció, molt pràctica, consisteix en construir una maqueta a escala del cos que es vol estudiar i fer assajos en un túnel de vent. L'altre alternativa és l'assaig per ordinador mitjançant simulacions. Com s'ha mencionat anteriorment, en aquest projecte es duran a terme les dues alternatives.

Per últim cal mencionar que l'aerodinàmica no contempla moviments o deformacions del cos. Per tant, el cos immers en un fluid sempre rep la mateixa corrent a la mateixa velocitat i no es deforma ni plàsticament ni elàsticament.

Per descriure les forces aerodinàmiques que actuen sobre els cossos d'estudi i entendre els apartats posteriors del treball és important introduir conceptes fonamentals de la mecànica de fluids i descriure les equacions que es faran servir durant tot el projecte.

4.1.2 Nombres adimensionals

Els nombres adimensionals[21], per definició, són nombres que no tenen unitats físiques de mesura que els defineixin. Són importants a mecànica de fluids perquè amb cada nombre adimensional es poden controlar diferents característiques aerodinàmiques (veure annex 1 teorema π de Vaschy-Buckingham). Actualment hi ha molts nombres adimensionals però en aquest projecte es definirà només 2 que estan directament relacionats amb els efectes de la compressibilitat i la viscositat de l'aire:

1) **Nombre de Reynolds (Re):**

És un nombre adimensional utilitzat en mecànica de fluids, disseny de reactors i fenòmens de transport per caracteritzar el moviment d'un fluid. Rep el seu nom en honor d'Osborne Reynolds (1842-1912), qui el va descriure en 1883. El nombre de Reynolds relaciona la densitat, viscositat, velocitat i dimensió típica d'un flux en una expressió adimensional. Aquest nombre o combinació adimensional està directament relacionat amb el fet que el flux pugui ser considerat laminar o turbulent:

- Si $Re \leq 2300$ el flux és laminar.
- Si $2300 < Re \leq 10000$ es considera un flux de transició.
- Si $Re > 10000$ el flux és turbulent.

Però que vol dir exactament que un flux sigui laminar o turbulent?

- Direm que un flux és laminar quan el moviment d'un fluid és perfectament ordenat, suau, de manera que el fluid es mou en làmines paral·leles sense entremesclar. Es diu que aquest flux és aerodinàmic, és a dir, cada partícula de fluid segueix una trajectòria suau, anomenada línia de corrent. El perfil de velocitats d'un flux laminar té forma parabòlica (figura 4.1), on la velocitat màxima es troba en l'eix del tub i la velocitat és igual a zero a la paret del tub.

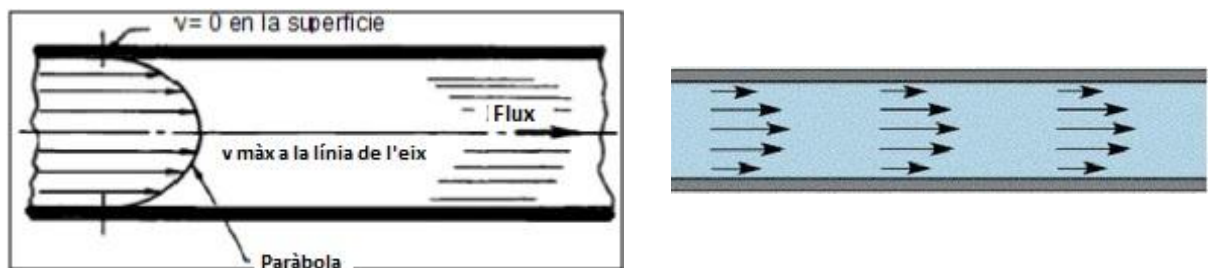


Fig.4.1: representació del flux laminar[1]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

- El flux turbulent és més comú a causa de que la natura té tendència cap al desordre i això en termes de fluxos significa tendència cap a la turbulència. Aquest tipus de flux es caracteritza per trajectòries circulars erràtiques, semblants a remolins (figura 4.2). El flux turbulent passa quan les velocitats de flux són generalment molt altes o en fluids en els quals les forces viscoses són molt petites. La turbulència pot originar-se per la presència de parets en contacte amb el fluid o per l'existència de capes que es moguin a diferents velocitats. A més, un flux turbulent pot desenvolupar-se bé sigui en un conducte llis o en conducte rugós.

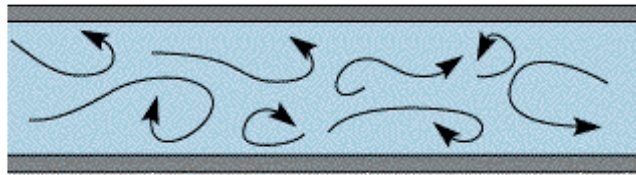


Fig.4.2: representació del flux turbulent[1]

Tornant al nombre de Reynolds, des d'un punt de vista matemàtic es defineix per mitjà de la següent equació:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Eq.4.1[17]

O equivalentment:

$$Re = \frac{v_s D}{\vartheta}$$

Eq.4.2[17]

On:

ρ : densitat del fluid

v_s : velocitat característica del fluid

D : diàmetre de la canonada a través del qual circula el fluid o longitud característica del fluid

μ : viscositat dinàmica del fluid

ϑ : viscositat cinemàtica del fluid

2) Nombre de Mach (Ma):

És una mesura de velocitat relativa definida com el quocient entre la velocitat d'un fluid i la velocitat del so en aquest mateix fluid, és a dir:

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

Eq.4.3[17]

On:

v : velocitat del fluid

c : velocitat del so en aquest fluid

Si $Ma < 0,3$ es considera que el fluid és incompressible simplificant molt els càlculs que s'hagin de fer. En el nostre estudi amb el túnel de vent, la màxima velocitat a la que arribaríem seria d'uns 30m/s i per tant tenint en compte que la velocitat del so dins l'aire (a 25°C) és de 341m/s [23] podem dir que el fluid d'estudi és incompressible.

A més a més, el nombre de Mach és una de les mesures importants que té un flux determinat. En el sentit de forces, el nombre de Mach és la relació existent entre les forces inercials i les forces originades per la compressibilitat del fluid.

4.1.3 Equacions i principis utilitzats

Per explicar la raó de perquè es crea la força aerodinàmica s'han d'explicar 3 principis físics: la equació de la continuïtat, el principi de Bernoulli i l'efecte Venturi que deriva dels dos primers.

1) Equació de la continuïtat:

La massa en un sistema ni es crea ni es destrueix sinó que es conserva:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Eq.4.4[17]

En mecànica de fluids s'escriu de la següent forma (per a un flux tridimensional i tridireccional):

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

Eq.4.5[17]

On:

ρ : densitat del fluid

t : temps

$\vec{u} = u_x\vec{i} + u_y\vec{j} + u_z\vec{k}$: velocitat del fluid

Si és un flux incompressible (tant estacionari com no), que és el cas d'aquest estudi, tenim que l'equació anterior (eq.4.5) queda:

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

Eq.4.6[17]

Aquesta equació (eq.4.6) és una de les tres equacions d'Euler i descriu el comportament d'un flux dins un conducte. Si el conducte no té entrades addicionals o més d'una sortida, la massa que entra és la que surt.

2) Principi de Bernoulli:

El teorema de Bernoulli[21] afirma que l'energia total d'un sistema de fluids amb flux uniforme roman constant al llarg de la trajectòria del flux. L'equació de Bernoulli és un cas particular del principi de la conservació de l'energia per fluids incompressibles entre dos punts que pertanyen a una mateixa línia de corrent. L'equació determina que la pressió estàtica més la pressió dinàmica més l'alçada del fluid en el punt 1 és igual a la pressió estàtica més la pressió dinàmica més l'alçada del fluid en el punt 2, més unes pèrdues degudes a la fricció, a elements singulars i al treball mecànic de vàlvules i bombes:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f1-2} + h_m$$

Eq.4.7[17]

On:

P_1, P_2 : pressions estàtiques dels punts 1 i 2 respectivament

$\gamma = \rho g$: pes específic del fluid

z_1, z_2 : altures per sobre del nivell de referència dels punts 1 i 2 respectivament

v_1, v_2 : velocitat del fluid en els punts 1 i 2 respectivament

h_{f1-2} : pèrdues degudes a fricció i a elements singulars

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

h_m : pèrdues degut al treball mecànic de vàlvules i bombes

g : acceleració de gravetat a la superfície terrestre ($g=9,81\text{m/s}^2$)

En la figura 4.3 ho podem veure també en forma gràfica:

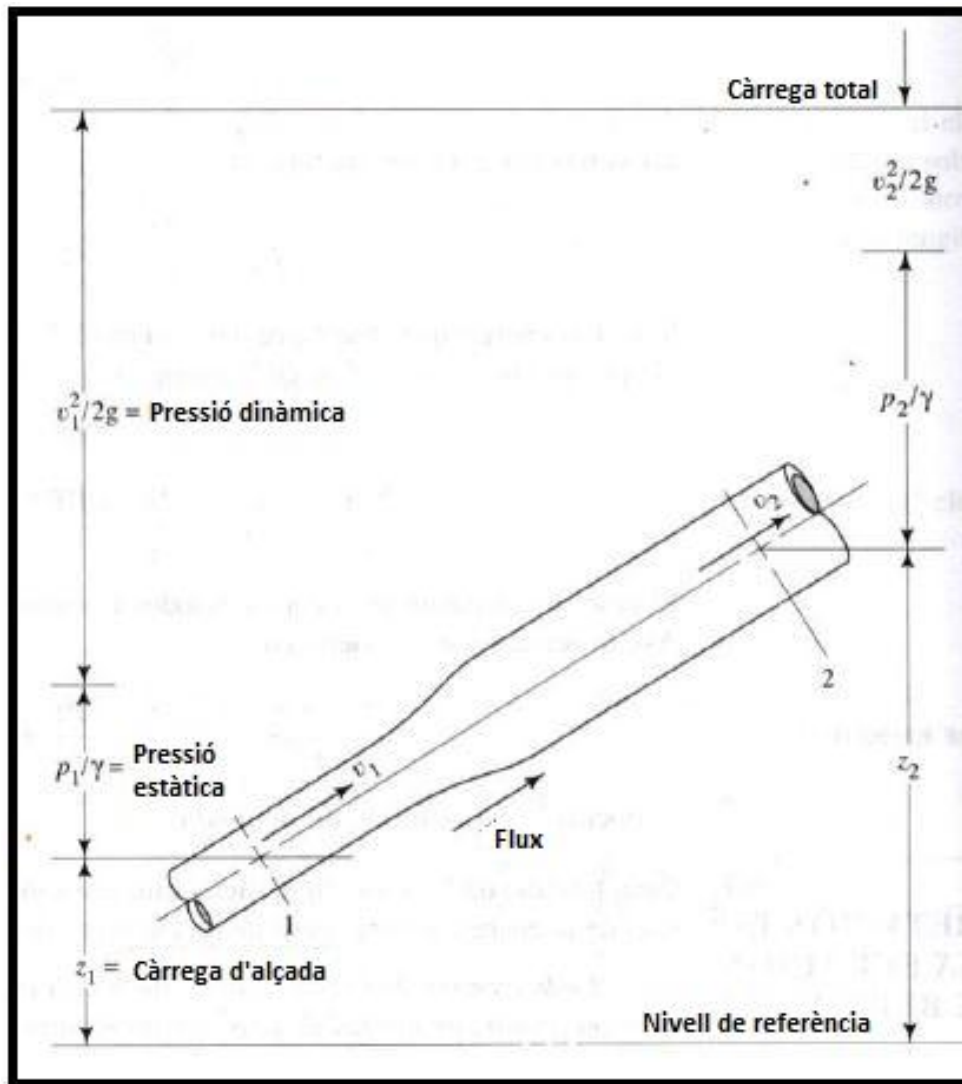


Fig.4.3: representació del principi de Bernoulli[2]

Tenint present que no hi ha pèrdues, no hi ha cap dispositiu que aporti treball mecànic i que les propietats de l'aire no varien amb l'altura, l'equació queda:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Eq.4.8[17]

Per tant, en trams on la velocitat sigui més gran la pressió serà menor, i al revés.

3) Efecte Venturi:

Aquest efecte s'explica a partir dels dos principis anteriors. Quan el desnivell és zero, la canonada és horitzontal. Tenim llavors, l'anomenat tub de Venturi (figura 4.4), l'aplicació pràctica del qual és la mesura de la velocitat del fluid en una canonada. El manòmetre mesura la diferència de pressió entre les dues branques de la canonada.

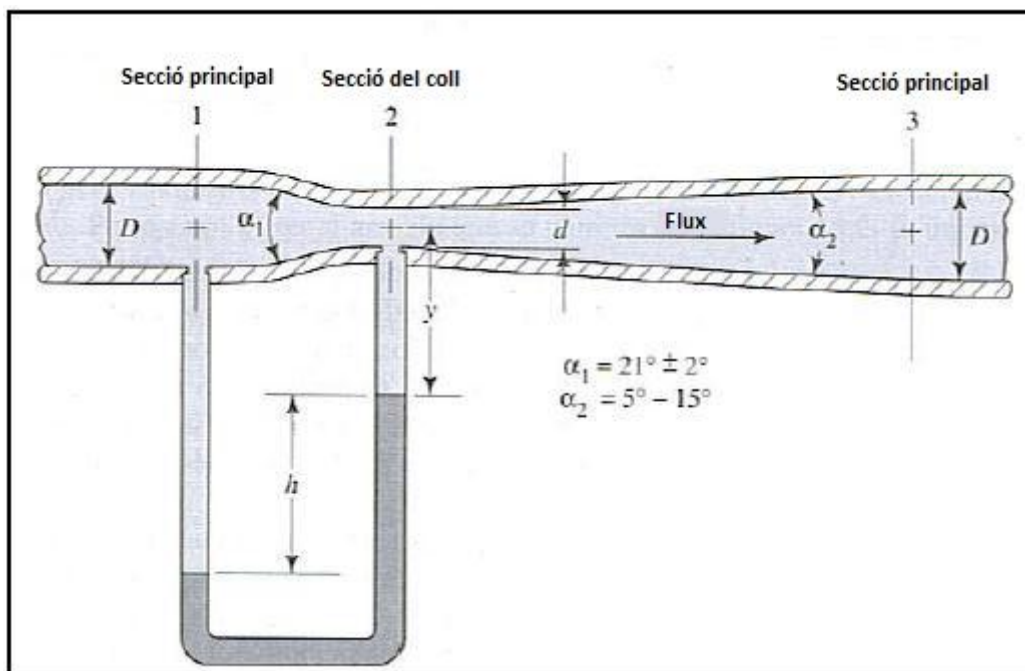


Fig.4.4: tub de Venturi[2]

L'equació de la continuïtat estableix que, en règim estacionari, el cabal màssic del principi del tub és igual que el cabal màssic al final del tub ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$):

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$$

Eq.4.9[17]

On:

v_1, v_2 : velocitats del fluid en els respectius punts 1 i 2

S_1, S_2 : seccions del tub en els punts 1 i 2

ρ_1, ρ_2 : densitats del fluid en els punts 1 i 2 respectivament

En la majoria de casos la densitat del fluid amb el que es treballa no varia (fluid incompressible) i per tant l'equació anterior (eq.4.9) es pot reescriure com:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

Eq.4.10[17]

Aquesta equació (eq.4.10) bàsicament ens diu que la velocitat del fluid en el tram de la canonada que té menor secció és més gran que la velocitat del fluid en el tram que té major secció.

4.1.4 Forces aerodinàmiques

La força aerodinàmica[21] està composta principalment per 2 components: la força de sustentació (*lift* en anglès) i la força de resistència a l'avanç (*drag* en anglès). La figura 4.5 mostra aquestes dues components representades en un objecte.

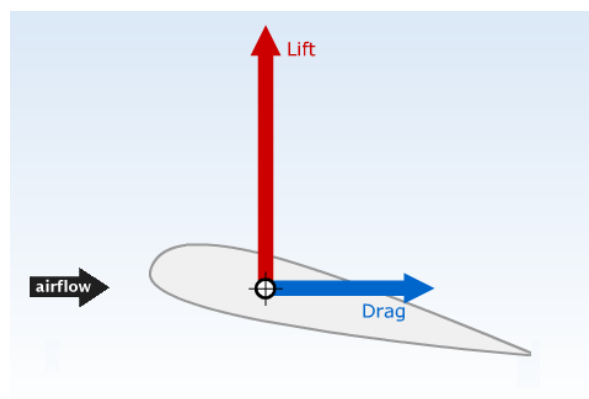


Fig.4.5: les 2 components de la força aerodinàmica [3]

Aquestes dues forces es combinen per donar la força aerodinàmica total resultant, i aquest és el principi bàsic de totes les pressions que actuen sobre un cos com pot ser un aleró o una estructura. En aquest projecte, es centrarà en l'estudi de la component de resistència a l'avanç ja que la sustentació no s'utilitza en la fase de construcció d'edificis.

La força de resistència a l'avanç té la direcció de la corrent d'aire, tal com s'aprecia a la figura 4.5). Té associat un coeficient adimensional, el C_D . La utilitat d'aquest coeficient resideix en el fet de que és independent de la velocitat del cos, només depèn de la geometria d'aquest i ajuda a l'hora de comparar vèries formes quan es busca una millor eficiència. En la majoria de casos, es busca reduir aquest coeficient per tal de reduir la força que s'oposa al moviment encara que en cas dels edificis no és així. La força de resistència a l'avanç, en canvi, sí que depèn de la velocitat com es pot veure a continuació a l'equació 4.11:

$$D = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D$$

Eq.4.11[17]

On:

D : força de resistència a l'avanç

ρ : densitat del fluid

A : àrea frontal

v : velocitat del fluid

C_D : coeficient de resistència

A la figura 4.6 es representen alguns d'aquests coeficients teòrics. El paral·lelepípede i el cub són els que més podrien assemblar-se al nostre cas d'estudi, encara que és obvi que el C_D no tindrà exactament els valors que es mostren.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

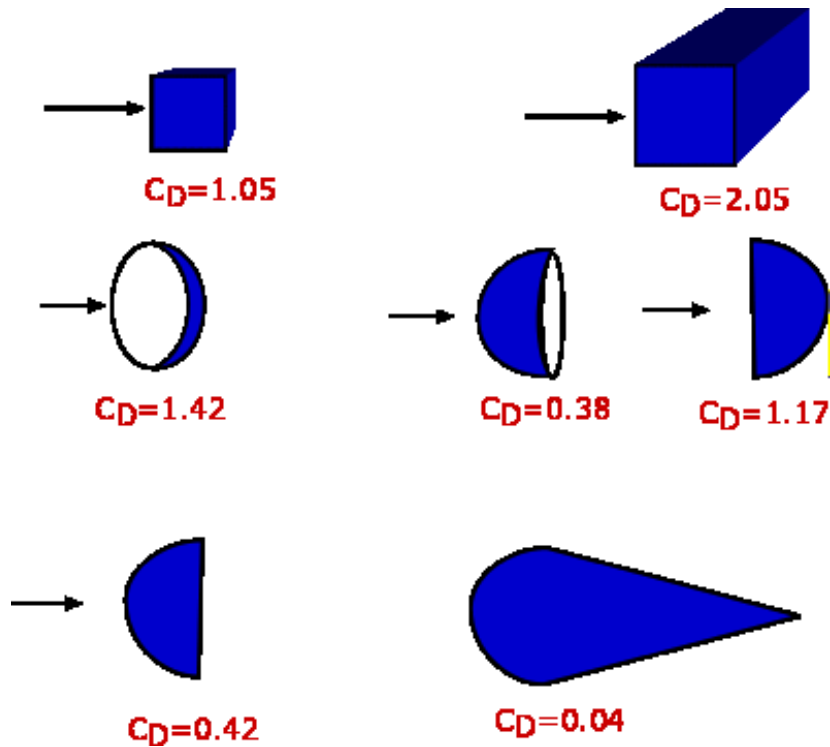


Fig.4.6: coeficients de resistència teòrics d'algunes geometries [4]

4.1.5 Capa límit

En mecànica de fluids, la capa límit[21] d'un fluid és la zona on el moviment d'aquest és pertorbat per la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. S'entén com aquella zona on la velocitat del fluid respecte al sòlid en moviment és de zero fins al 99% de la velocitat (veure figura 4.7) de la corrent no pertorbada. El gruix d'aquesta capa es representa per δ .

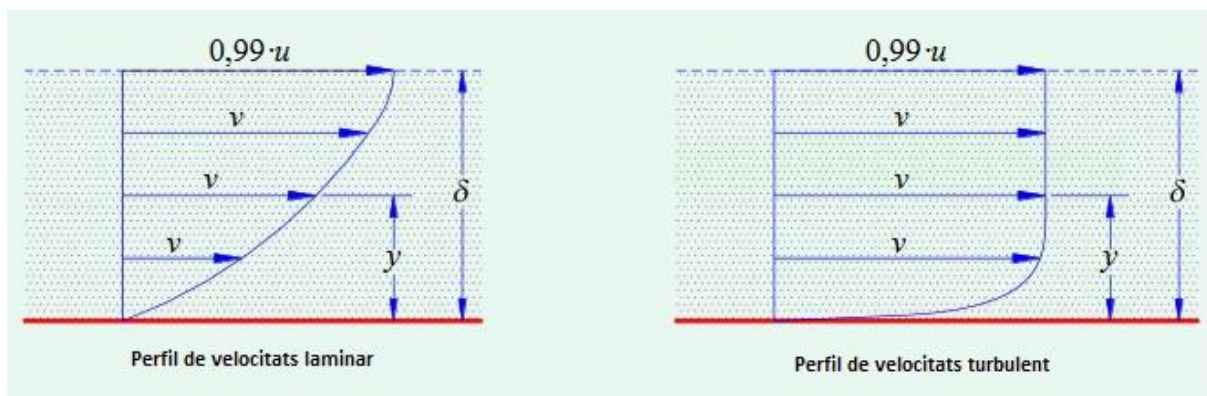


Fig.4.7: perfils de velocitats en la capa límit[5]

La capa límit pot ser laminar o turbulenta, encara que també poden coexistir zones amb flux laminar i flux turbulent. El desprendiment de la capa límit provoca remolins i zones de turbulència i per això és important considerar-la en aquest estudi. A la figura 4.8 es representa els remolins que es formen deguts al desprendiment de la capa límit i al canvi bruscat en la geometria dels edificis. S'espera observar aquests remolins en la simulació amb CFD.

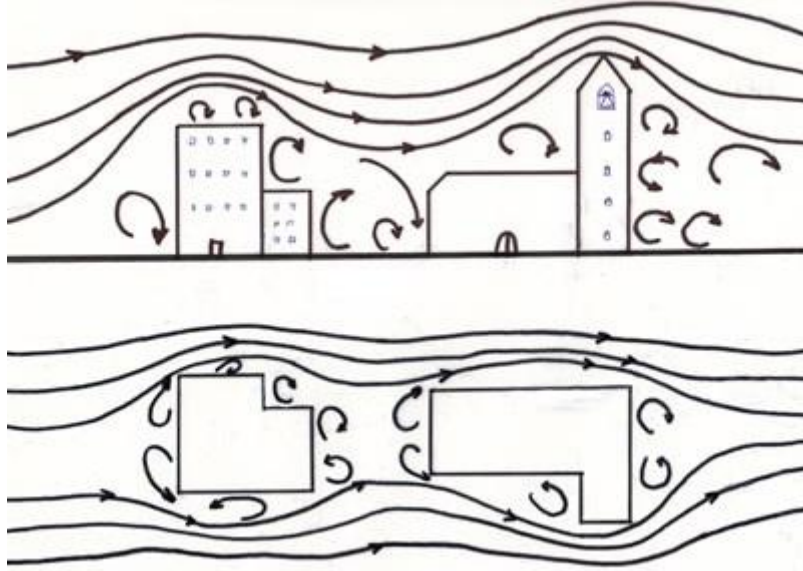


Fig.4.8: remolins provocats per canvi bruscat de geometria en edificis[6]

4.2 Túnel de vent

4.2.1 Definició i parts principals

Un túnel de vent o túnel aerodinàmic és una eina experimental que serveix per estudiar els efectes del flux d'aire sobre objectes o cossos sòlids. El túnel de vent és el sistema de simulació per excel·lència, i encara que el seu funcionament és més complex del que sembla, es basa en conceptes bastant simples que s'expliquen a continuació.

En un túnel de vent, l'objecte d'estudi roman estacionari mentre es força el pas d'aire o gas al voltant d'ell. L'aire es bufa o s'aspira per mitjà d'una turbina o ventilador a través d'un conducte equipat amb una finestra i altres aparells en els quals els models o formes geomètriques es munten per l'estudi. Després s'utilitzen diverses tècniques per estudiar el flux d'aire real al voltant de la geometria i es comparen amb els resultats teòrics, que també han de tenir en compte el nombre de Reynolds i el nombre de Mach per al seu règim de funcionament.

En la seva topologia més elemental, un túnel de vent és una instal·lació formada per un conducte tubular de secció arbitrària i regular, capaç de sotmetre el model sota

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

assaig d'un flux fluid amb determinades propietats, per tal de caracteritzar els fenòmens produïts durant la seva interacció.

L'experimentació en túnels de vent resulta sovint el mètode més ràpid, econòmic i precís per a la realització d'estudis aerodinàmics. Ofereixen capacitats de treball amb models a escala en fases inicials de desenvolupament, representen completament la complexitat del comportament d'un fluid real, i proporcionen grans quantitats d'informació fiable que serveix de base per a diferents decisions de disseny.



Fig.4.9: túnel de vent de Ferrari[7]

La topologia concreta d'un túnel de vent varia segons la utilització determinada que es consideri donar a la instal·lació (com es veurà posteriorment). No obstant, la majoria d'ells presenten quatre components comuns (veure figura 4,10), que constitueixen els eixos de disseny de qualsevol infraestructura d'aquest tipus:

- 1) **Secció de test o zona de proves:** aquesta secció és el component més important d'un túnel de vent ja que és el lloc físic on es realitzen els assajos. S'hi instal·la el model a estudiar controlant que el flux fluid presenti unes característiques de turbulència i velocitats idònies per a una correcta reproducció de la situació que es pretén simular. Els seus paràmetres de disseny es defineixen a partir de requisits operatius, principalment accessibilitat per a la manipulació del model i els diferents instruments de mesura necessaris per a l'assaig, així com la correcta caracterització del flux per reproduir l'entorn desitjat. A més normalment hi ha sensors de mesura precisos que serveixen per generar dades. Amb aquestes dades i observacions, els enginyers treballen amb les variables de l'aerodinàmica com ara pressió, velocitat, temperatura i densitat. Es mesura la sustentació, la resistència a l'avanç, les ones de xoc i

altres condicions depenent del propòsit de l'estudi. En el cas d'aquest projecte, el túnel serveix per ajudar als enginyers a entendre com el vent interactua amb una estructura fixa, un edifici, per tal de trobar maneres de fer-lo més fort i segur.

2) Zona de condicionament del flux: aquesta part té per propòsit dotar el flux dels paràmetres de qualitat necessaris (direcció, turbulència, perfil de velocitats, etc.) per a una correcta realització de l'assaig. Tal condicionament s'aconsegueix fent circular el fluid a través d'una sèrie de dispositius que li confereixen una turbulència isòtropa (la fluctuació mitjana del corrent turbulent és igual en totes direccions, fins i tot en escales de longitud petites) i eliminen els vòrtex més grans, deixant passar únicament aquells de petita magnitud que s'extingiran ràpidament en seccions posteriors. Aquests dispositius són, principalment:

- **Panell d'abelles:** elements en forma de panell mallat la funció del qual és la de dotar el flux de la direcció desitjada. El fluid circula a través dels diferents elements de la malla adoptant una disposició de filaments paral·lels al seu pas.
- **Pantalles de turbulència:** dispositius encarregats d'uniformar el perfil de velocitats del fluid, a costa però, d'una considerable pèrdua de pressió. En la realització d'aquesta funció introdueixen, a més, petites turbulències en el flux.

3) Con de contracció i el difusor: la secció del con de contracció (o con d'acceleració) es situa entre la zona de condicionament i la càmera d'assaig. La seva missió consisteix en dotar al flux, adequadament condicionat, de la velocitat necessària per realitzar l'assaig. Aquesta acceleració és generada mitjançant una reducció gradual de la seva secció recta, produint així un increment continu i proporcional de la velocitat. S'observa mitjançant l'equació de Bernoulli per a fluids ideals, que l'augment de velocitat a la sortida d'aquesta secció, va acompanyat d'una reducció de pressió de la mateixa.

L'etapa del difusor es situa a continuació de la secció de test, realitzant la tasca oposada que executa el con de contracció: disminueix la velocitat i incrementa la pressió del flux mitjançant un augment progressiu de la seva secció recta, possibilitant així l'ús de propulsors menys potents per mantenir la velocitat del flux.

El con de contracció i el difusor resulten seccions crítiques de disseny d'instal·lacions de túnel de vent, a causa de la seva missió d'assegurar que el flux tingui unes característiques de velocitat òptimes a la cambra d'assaig.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

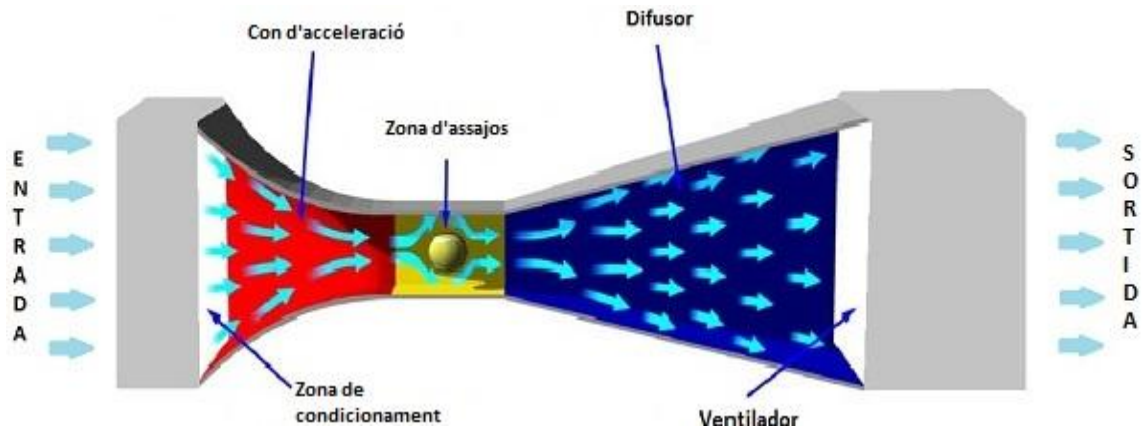


Fig.4.10: parts d'un túnel de vent[8]

4.2.2 Naixement del túnel de vent

La utilitat del túnel de vent és òbvia avui en dia, però no va ser el primer dispositiu de proves aerodinàmiques. El naixement del túnel de vent està directament relacionat amb la invenció dels primers aparells voladors i avionetes posteriorment.

Els primers experimentadors[22] es van adonar que necessitaven una màquina que reemplaci vents capritxosos de la natura amb un flux constant i controlable d'aire. Van reconèixer que o bé podien moure el seu model de prova a través de l'aire a la velocitat requerida o podrien bufar l'aire a través d'un model estacionari. Tots dos enfocaments van ser emprats en els primers dies de l'aeronàutica. L'artefacte més simple i barat per moure models a altes velocitats era un braç-remolí, una espècie de centrífugadora aeronàutica.

Benjamin Robins (1707-1751), un brillant matemàtic anglès (figura 4.11), va ser el primer en usar un braç-remolí (figura 4.12). La seva primera màquina tenia un braç de 4 peus (uns 1,22m) de llargària. La rotació del braç és produïda per un pes que cau actuant sobre una disposició de politja i eix. La punta del braç només arriba a velocitats de uns pocs peus per segon (menys de 1m/s).

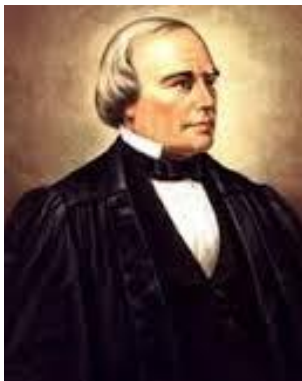


Fig.4.11: Benjamin Robins [9]

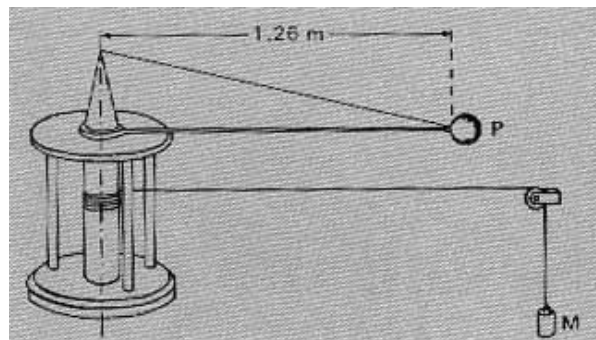


Fig.4.12: braç-remolí[9]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

Robins va muntar diverses formes piramidals, plaques rectangulars, etc. en la punta del braç i els va fer girar en diferents orientacions. Va arribar a la conclusió que totes les teories de la resistència establertes fins aquell moment eren extremadament errònies. Les diferents formes, tot i tenir la mateixa àrea de contacte amb el corrent d'aire, no presentaven la mateixa resistència o arrossegament.

El braç remolí va proporcionar la major part de les dades aerodinàmiques reunides fins al final del segle XIX. Els seus defectes però, no van passar desapercebuts. Els resultats dels tests van ser influenciats negativament per l'acció del braç que feia que tot l'aire dels voltants estigués en un moviment rotatiu. En efectes, els models d'avions situats a l'extrem del braç volaven en les seves pròpies esteles. Amb tanta turbulència, els experimentadors no podien determinar la vertadera velocitat relativa entre el model i l'aire. A més, era extremadament difícil muntar instruments i mesurar les petites forces exercides sobre el model quan estava girant a altes velocitats. Es necessitava alguna millora en el sistema.

Aquesta millora era un "túnel de vent". Aquest simple dispositiu consistia en un tub de pas tancat a través del qual circulava l'aire impulsat per un ventilador o per qualsevol sistema d'accionament apropiat. El cor del túnel de vent és la secció de proves, en la qual es recolza un model a escala en un corrent d'aire acuradament controlada. Les característiques aerodinàmiques del model i el seu camp de flux són mesurades directament per instruments adequats. La gran capacitat del túnel de vent per a assajos sistemàtics i controlats va deixar ràpidament el braç-remolí obsolet. El paper i les capacitats d'un túnel de vent es poden apreciar millor quan aquest permet el reconeixement de les forces i moments aerodinàmics que actuen sobre una aeronau en vol. Les tres forces bàsiques (figura 4.13) són sustentació (*lift*), arrossegament (*drag*) i força lateral i es representen en un sistema d'eixos que fa referència a la direcció de vol de l'aeronau. La força d'arrossegament és longitudinal (però de sentit contrari) a la trajectòria del vol; les forces de sustentació i lateral formen un angle recte amb la d'arrossegament. En un túnel de vent, la línia central-axial de la secció de proves defineix la direcció del vent, essent aerodinàmicament equivalent a la trajectòria del vol. La facilitat de mesurar les forces aerodinàmiques respecte a l'eix del túnel en un model estacionari exposat a un corrent d'aire va obrir una nova era en l'experimentació aerodinàmica.

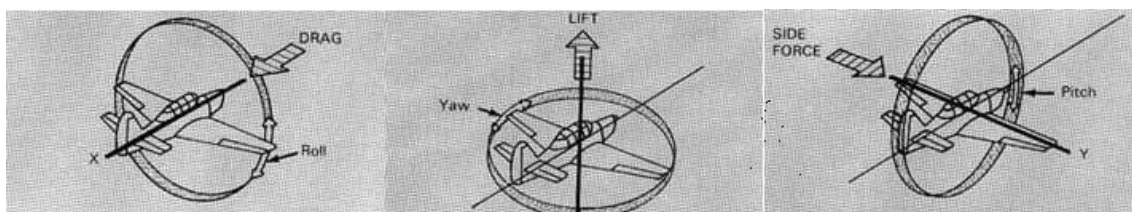


Fig.4.13: les 3 components de la força aerodinàmica[9]

Frank H. Wenham (1824-1908), un membre del Consell de la Societat Aeronàutica de Gran Bretanya, és generalment acreditat per dissenyar i operar el primer túnel de vent en 1871. Wenham va muntar diverses formes al túnel, i va poder mesurar les forces de sustentació i arrossegament creades pel corrent d'aire. Tot i ser un experiment tan simple, els resultats obtinguts van ser de gran importància per a l'aeronàutica. Wenham i els seus col·legues van quedar sorpresos al trobar que, en petits angles d'incidència l'eficiència aerodinàmica (en anglès s'anomena *lift to drag ratio*) de les superfícies de la prova podrien ser sorprenentment alts: aproximadament 5 en un angle de 15º d'atac.

Amb l'adveniment del túnel de vent, els experimentadors d'aerodinàmica finalment van començar a comprendre els factors que controlen la sustentació i l'arrossegament, però encara quedava per resoldre la qüestió de l'escalat del model. Podien els resultats obtinguts experimentalment amb un model a escala 1:10 aplicar-se a un avió real, de mida completa? Gairebé totes les proves en túnels de vent van ser (i ho continuen sent) realitzades amb models a escala ja que construir un túnel de vent capaç de manipular avions de mida completa era simplement massa car.

En un conjunt clàssic d'experiments, Osborne Reynolds (1842-1912) de la Universitat de Manchester va demostrar que el patró de flux d'aire sobre un model a escala seria el mateix per a un vehicle a gran escala si un cert paràmetre del flux fos el mateix en ambdós casos. Aquest factor, conegut avui en dia com el nombre de Reynolds, és un paràmetre fonamental en la descripció de totes les situacions de flux de fluids, incloent les formes dels patrons de flux, la facilitat de la transferència de calor i l'inici de la turbulència.

La importància del túnel de vent la trobem també amb els germans Wilbur (1867-1912) i Orville (1871-1948) Wright, que es consideren els primers en fer volar un avió amb èxit. Van construir el seu primer planador tripulat sense alimentació el 1900. Dotze vols de prova amb aquest planador van demostrar que els seus controls de capcineig i balanceig van funcionar. El planador, però, generava molta menys sustentació i més resistència a l'avanç del que esperaven.

Per saber per què el seu primer planador no va funcionar com s'havia predit, els Wright van decidir construir el seu propi túnel de vent (a l'any 1901) ja que creien que la informació en la que es basaven a l'hora de dissenyar els seus planadors era errònia. Van construir el següent túnel de vent (figura 4.14) amb el qual van realitzar més de 200 assajos de tot tipus de forma d'ala per tal d'obtenir la seva pròpia informació.



Fig.4.14: túnel de vent dels germans Wright[10]

En el curt lapse de 3 mesos aquestes proves van produir les dades bàsiques necessàries per a la construcció del seu planador de 1902 i l'avió propulsat posteriorment. Durant aquest temps, els Wright van superar a altres especialistes en aerodinàmica de tot el món.

La culminació dels seus experiments va arribar El 1903 amb el famós *Wright Flyer*. Va seguir el disseny del planador de 1902 de prop, a excepció de l'addició de 2 hèlixs bessones de gairebé 2,6 metres de diàmetre impulsats per un motor de gasolina de 12 cavalls de força. En el matí del 17 de desembre de 1903, amb Orville en els controls, el *Flyer* es va elevar en l'aire pels seus propis mitjans i va volar uns 120 peus (36 metres). Es van realitzar altres tres vols, amb la distància recorreguda més llarga de 862 peus (262 metres). El *Flyer* va ser lleugerament danyat en l'últim aterratge i abans que es poguessin fer reparacions, una ràfega de vent va donar-li la volta i el va destruir. Mai va volar de nou.

Amb aquesta breu explicació podem descriure el naixement del túnel de vent i les seves primeres aplicacions en el món de l'aerodinàmica.

4.2.3 Classificació de túnels de vent

Es pot classificar els túnels de diverses formes:

- 1) **Segons el rang de velocitats d'operació:** tenint en compte la velocitat del flux d'aire, els túnels de vent es poden classificar en:

TIPUS	VELOCITAT [km/h]	NOMBRE MACH
Subsònic	Menor que la del so	$0 < M < 0,7$
Transsònic	980-1230	$0,7 < M < 1,2$
Supersònic	>1230 (més que la del so)	$1,2 < M < 5$

Taula4.1: túnels de vent segons la velocitat[7]

*La velocitat del so a l'aire està al voltant dels 330-340 m/s (que correspon a uns 1200 km/h) depenent de la temperatura de l'aire [23].

2) **Segons el tipus de retorn:** segons la geometria física i la forma de circular de l'aire podem classificar els túnels en:

- **Retorn obert (o circuit obert):** el flux d'aire que circula pel seu interior descriu una trajectòria recta; s'introdueix en el circuit des de l'exterior a través de la secció d'entrada, que sol albergar la zona de condicionament de flux. Arriba al con de contracció on perd pressió i guanya velocitat, entrant posteriorment a la cambra d'assaig. A continuació, circula a través del difusor i la secció del propulsor, per tornar finalment a l'exterior per mitjà de la secció de sortida. En general, aquest tipus de túnels tenen costos de construcció més baixos, i són atractius quan han de ser purgats materials com el fum (per a la visualització de flux), o productes de gas d'escapament (d'un motor en marxa). A més a més, si les condicions ambientals són constants, llavors la temperatura de la zona de proves no canvia durant una prova llarga. Hi ha però 2 inconvenients importants a aquest disseny. El primer és l'efecte de les condicions ambientals. Si el túnel es col·loca a l'exterior, el vent pot tenir un fort efecte en la qualitat de flux i el perfil de velocitat a la zona de proves. A més a més, el soroll de la zona d'assaig irradia directament a l'exterior i això fa que sigui una font de contaminació acústica i per tant limita les hores de funcionament i/o necessita la instal·lació de costosos processos d'insonorització. El segon desavantatge és que es requereix més energia per impulsar aquest tipus de túnel de vent d'un disseny equivalent en circuit tancat.

- **Retorn tancat (o circuit tancat):** el flux descriu en el seu moviment una trajectòria tancada per l'interior del túnel, circulant de forma contínua pel circuit de retorn, amb poc o cap contacte amb l'exterior. Aquest tipus de túnels requereixen menys energia per treballar que els túnels de circuit obert i tenen millor control de la qualitat del flux de l'interior ja que la influència de l'entorn és mínima. Aquestes dues raons fan que els túnels de circuit tancat siguin més emprats a gran escala. Els principals desavantatges són el seu alt cost degut principalment a una major necessitat d'infraestructura i l'augment de temperatura a l'interior (a causa de la fricció) durant els estudis llargs que comporta la instal·lació de dispositius refrigeradors o intercanviadors de calor. També existeix la complexitat en el disseny per possibilitar la utilització de tècniques de visualització (mitjançant fum, pintura, etc.).

3) **Segons la configuració de la cambra d'assajos:** la cambra d'assajos pot estar configurada de dues formes:

- **Zona de proves oberta:** tal com diu el seu nom, la zona de proves està comunicada amb l'exterior per algun o tots els seus límits. És molt comú trobar aquests túnels en el sector d'automoció ja que es poden muntar els models més grans degut a una accessibilitat més fàcil. A més a més, la pressió estàtica fora del raig varia molt menys que en el cas d'una àrea de proves tancada (on pot aparèixer un canvi de pressió longitudinal) i, per tant, les mesures del *drag* es consideren més exactes. D'altra banda, el raig obert es tendeix a dissipar, barrejant-se amb l'aire circumdant, i la longitud de la zona de proves és per tant més curta i es requereix més potència per impulsar l'aire en comparació amb una zona d'assaig tancada.
- **Zona de proves tancada:** la secció d'assajos posseeix parets sòlides que aïllen el flux interior de l'exterior. S'utilitzen normalment per a models de gran escala o fins i tot vehicles sencers de grans dimensions. Les condicions de la zona de proves tancada es poden controlar més fàcilment ja que no hi ha contacte amb l'exterior, des d'un punt de vista energètic és bastant més eficient.

Segons el tipus de retorn i la configuració de la cambra d'assajos que posseeixi una instal·lació en concret, es classifica els túnels de vent per la seva topologia física com:

Zona de proves/Retorn	Circuit obert	Circuit tancat
Zona de proves oberta	Eiffel	Prandtl
Zona de proves tancada	NPL	Göttingen

Taula4.2: tipus de túnels segons la zona de proves i el retorn[7]

Aquestes 4 combinacions queden representades a la figura 4.15:

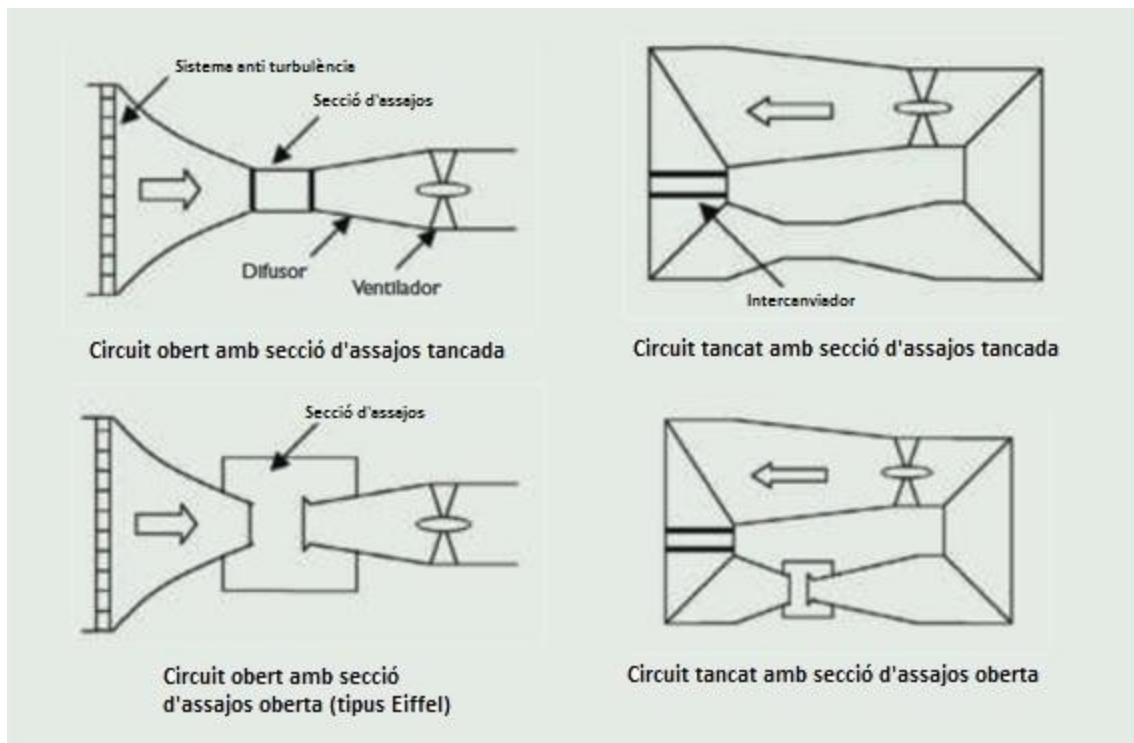


Fig.4.15: túnels de vent segons la cambra d'assajos[11]

5 PROPOSTA DE RESOLUCIÓ

5.1 Construcció de la maqueta

En aquest apartat s'explicarà detalladament els passos a seguir per a construir la maqueta. Primerament, s'exposa el llistat de materials utilitzats:

Material	Quantitat	Descripció
Llistó de fusta DINA4	4	És la base de la maqueta. Millor si la fusta és reciclada. El gruix ha de ser d'uns 8-9mm per garantir l'estabilitat i la no deformació.
Cola "superglue"	1	Ha de ser especial per enganxar tant fusta com plàstics. Amb un pot de 3g ha de ser suficient.
Claus de 15x1,1mm	20-30	Serviran per reforçar l'estructura principal.
Paper de vidre	1	No es necessitarà eliminar gran quantitat de material per tant amb un bastant fi ja n'hi ha prou.
Serra de marqueteria	2-3	No està inclòs el suport de la serra ja que es disposava d'un. Per tant només es necessita un parell de serretes (en espiral van bé) en cas de si es trenqués alguna.
Cúter	1	Servirà per tallar extrems de mànegues
Pintura negra "acualux" amb base d'aigua	1 pot de 100 ml	La pintura en base d'aigua és barata, s'adapta bé a la fusta i s'asseca bastant ràpid.
Pinzell	1	Com no s'ha de tenir una precisió molt acurada ni s'ha de pintar detalls, un pinzell bastant gruixut és recomanable.
Canonada d'alumini de 10- 15mm de llarg i 16- 18mm de diàmetre	1	S'acoblarà a la base de la maqueta i servirà de recollidor de mànegues. També és farà servir per fixar la maqueta al suport del túnel.
Mànega de 2 i 5mm de diàmetre exterior i 0,1-1mm de gruix	30 cm aprox. (gruixuda) i 8m aprox. (prima)	La mànega més prima servirà per a prendre mesures de pressions/velocitats dels punts de les cares de la maqueta i la més gruixuda servirà simplement de transmissió.
Martell	1	Per clavar claus.
Regla i joc d'escaires	1 de cada	Per traçar paral·leles/perpendiculars per tal que la geometria quedi ben definida.
Llapis	1	Per dibuixar per sobre la fusta.
Trepant	1	Per fer forats a les cares. Es necessita una broca de 2mm de diàmetre (igual que la mànega més prima).

Taula 5.1: descripció del material utilitzat [19]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

La maqueta no pot superar unes dimensions màximes (veure figura 5.1) imposades pel túnel de vent (tant d'amplada com d'alçada) però la seva geometria pot ser qualsevol mentre sigui la de un edifici.

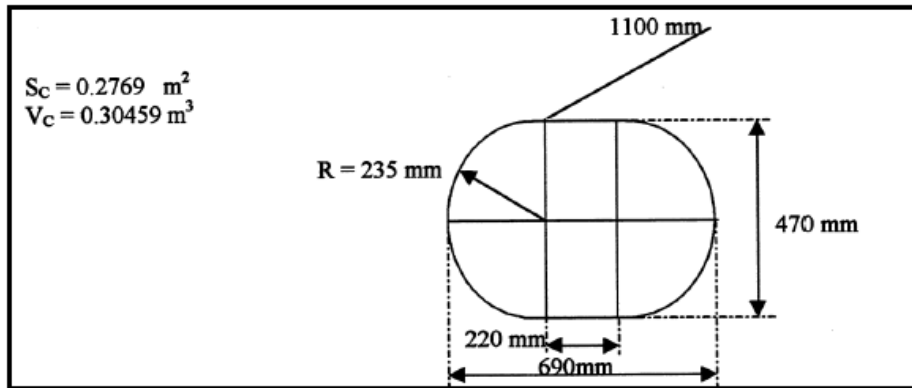


Fig.5.1: secció de proves del túnel de vent de l'Etseib[12]

Procés de construcció seguit:

- 1) El primer pas és el disseny del model de la maqueta a construir definint les dimensions (sempre respectant les dimensions del túnel) i realitzant els plànols de construcció corresponents (veure annex 2). A la figura 5.2 es representa el disseny final que s'ha pensat:

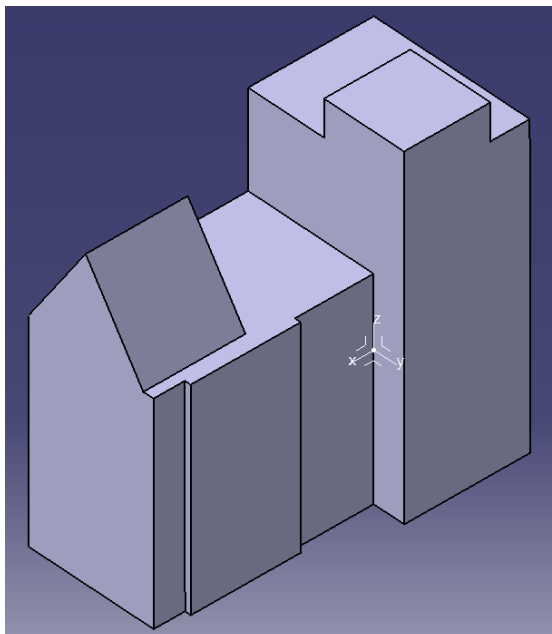


Fig.5.2: maqueta de l'edifici feta amb Catia v5 [13]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

- 2) Amb un llapis i regla/escaires traçar la geometria sobre els llistons de fusta. Retallar les formes resultants amb la serra i amb l'ajuda del paper de vidre realitzar l'operació d'acabat (polir) per tal de deixar totes les superfícies lises eliminant l'excés de material.
- 3) Amb l'ajuda de la cola enganxar només les parets dels edificis deixant obert tant el sostre com el terra per facilitar la posterior instal·lació de mànegues a l'interior de la maqueta. Al ser els llistons de fusta bastant prims, utilitzar suports per tal que les fustes es quedin en una posició concreta i no es caiguin. Deixar temps suficient per que la cola s'assequi i després clavar els claus per tal de reforçar la maqueta.
- 4) Amb l'ajuda d'un trepant, foradar totes les cares de la maqueta en 2 o 3 llocs diferents (la mida del forat ha de ser la corresponent al diàmetre de les mànegues). S'ha de mantenir almenys 3cm de distància respecte el punt més baix (base) de la maqueta. Instal·lar les mànegues de la següent forma (tal com es veu a la figura 5.3): introduir un dels extrems pel forat acabat de fer i enganxar-lo amb cola. L'altre extrem, de moment, ha de quedar lliure sortint per la base (recordem que per ara no hi ha el terra de la maqueta). El tros de mànega ha de ser lo suficientment llarg per tal que sobresurtin uns 15 cm per la base.



Fig.5.3: maqueta amb extrems de les mànegues sobresortint[14]

- 5) El següent pas és pintar la maqueta de color negre (figura 5.4). També pintar el que serà la tapa o el sostre. Es va triar la pintura negra per després enganxar fils de perlé i durant l'experimentació poder veure, amb llum ultraviolada, quin és el seu comportament quan estan exposats al flux d'aire (com si fossin línies de corrent).



Fig.5.4: maqueta pintada de negre[14]

- 6) Per construir la base utilitzem també el trepant per realitzar el forat de diàmetre igual o fins i tot una mica més petit que el tub d'alumini (per tal que quan l'introduïm es produeixi un ajustament fix i no amb joc). El forat s'ha de realitzar just en el punt mig de la base de fusta. Agrupar tots els extrems lliures de les mànegues i introduir-los pel tub d'alumini. Després enganxar tant la base com la tapa a la maqueta (figura 5.5).

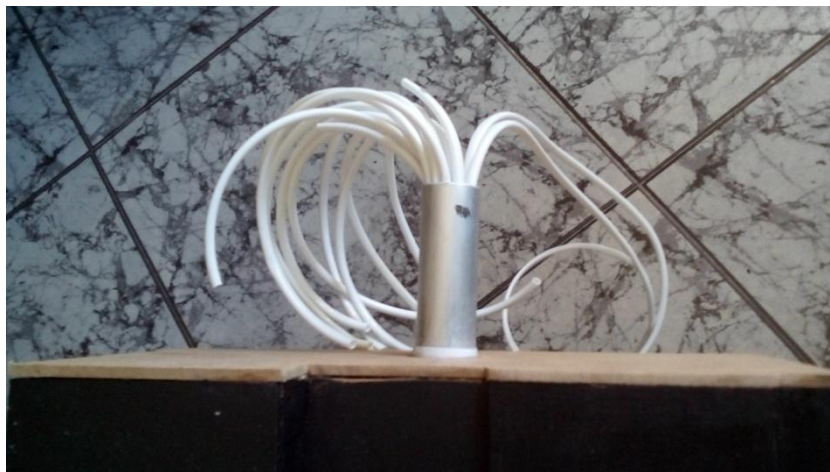


Fig.5.5: tub d'alumini amb els extrems de les mànegues[14]

- 7) El següent pas és tallar amb el cúter els extrems de les mànegues que sobresortien pels forats. No els hem tallat abans per tal que la pintura no entri dins de les mànegues i per tant no obstrueixi el pas del fluid durant la experimentació.
- 8) Per últim hem d'enumerar els extrems de les mànegues (veure figura 5.6) que sobresurten pel tub d'alumini per tal de saber quina mànega correspon a cada forat. Per saber quin és quin simplement cal bufar per un l'extrem i veure per quin forat surt l'aire. S'han enumerat els forats segons la figura 5.7.



Fig.5.6: mànegues enumerades[14]

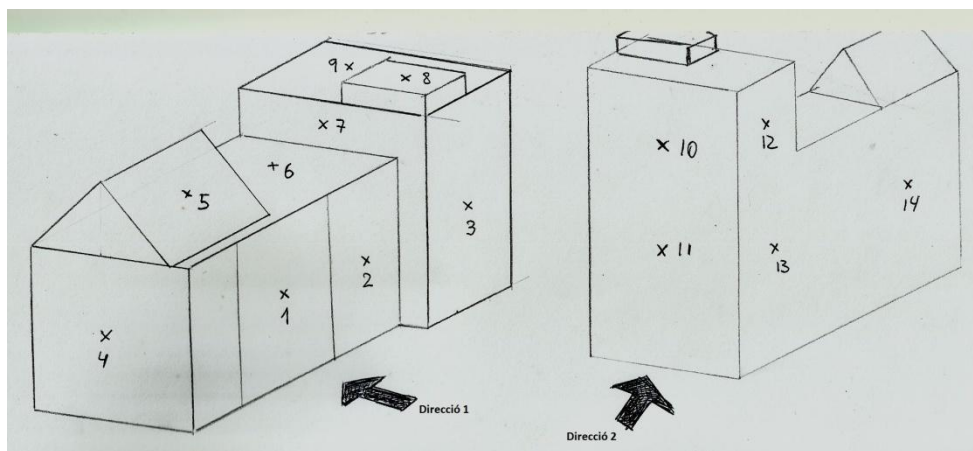


Fig.5.7: posició dels forats i les 2 direccions d'estudi[14]

5.2 Problema inesperat i simulació experimental

Quan la maqueta estava acabada, vaig avisar a l'Enric per tal de decidir un dia per fer la simulació amb el túnel de vent de l'escola. La meua sorpresa va ser quan em va respondre que el túnel s'havia trencat i havíem de buscar una altra solució. Després de discutir què es podria fer, es va decidir intentar fer la simulació amb un ventilador també ubicat a l'escola tot i sabent que els resultats obtinguts no serien tan bons ja que les dimensions de la maqueta no corresponien amb la secció del ventilador i la velocitat del ventilador és molt menor i no es pot variar, però era l'única alternativa ja que no hi ha cap altre túnel pels voltants que tingui unes dimensions iguals o semblants.

La simulació amb el túnel de vent/ventilador consisteix en posar la maqueta en front de la corrent d'aire generada i amb l'ajuda de la sonda de Prandtl calcular la velocitat a la que arriba l'aire (Bernoulli) i determinar les pressions (i forces posteriorment) en els forats de la maqueta per tal de veure com es distribueixen. S'ha agafat una direcció concreta (és la que després s'estudiarà per CFD) del flux d'aire que impacta contra la

maqueta: la més crítica, és a dir, la que xoca contra l'àrea de contacte més gran. També però s'ha pres dades en una altra direcció, perpendicular a la anterior. Aquestes 2 direccions es veuen representades amb una fletxa negra a la figura 5.7.

5.2.1 Mesura de la velocitat i la pressió

Per a mesurar la velocitat del flux que incidia sobre la maqueta s'ha utilitzat l'equip de mesura anomenat sonda de Prandtl. La sonda de Prandtl mesura la diferència entre la pressió total (pressió dinàmica + pressió estàtica) i la pressió estàtica en un punt d'una corrent fluida, és a dir, dóna la pressió dinàmica, partint de la qual es calcula la velocitat del fluid mitjançant l'expressió:

$$h(\text{mc aire}) = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P}{\gamma} = \frac{v^2}{2g}$$

Eq.5.1[17]

Aïllant la velocitat obtenim:

$$v = \sqrt{2gh} \cong 4\sqrt{H(\text{mmc aigua})}$$

Eq.5.3[17]

S'ha pres mesures dels mm de columna d'aigua en 3 punts de la maqueta (en tots 3 punts s'ha obtingut una mesura de 3 mmc d'aigua) i amb aquestes dades es calcula la velocitat que proporciona el ventilador, que és única ja que el ventilador no permet variar-la.

A la figura 5.8 es veu representada la sonda de Prandtl.



Fig.5.8: Sonda de Prandtl[12]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

D'una forma semblant, amb un altre aparell es va prendre mesures de les pressions en tots els punts de la maqueta que s'havien establert. Per això es va haver de connectar mànegues successives per arribar al diàmetre del tub del corresponent aparell de mesura (veure figura 5.9).



Fig.5.9: mànegues encadenades[14]

L'aparell proporcionava les dades en mbar. A la taula 5.2 podem veure aquestes mesures corresponents als punts 1-14 de la figura 5.7).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,7	0,65	0,75	0,05	0,3	-0,15	-0,15	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,15	-0,1	-0,1
0	-0,05	-0,15	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,3	-0,3	0,45	0,45	-0,3	-0,35	-0,15

Taula5.2:valors de pressió en mbar[19]

Posteriorment s'utilitzaran aquestes dades per trobar la força exercida pel vent sobre la maqueta. També es compararan amb les pressions obtingudes en la simulació per elements finits.

5.2.2 Simulació línies de corrent

Tal com s'ha mencionat anteriorment, es va pintar la maqueta de color negre per enganxar fils de perlé i veure, amb l'ajuda de la llum ultraviolada, el seu comportament quan estan exposats a la corrent d'aire. Aquests fils representen el que serien les línies de corrent, és a dir, les trajectòries que seguirien les partícules d'aire. A la figura 5.10 es veu com fluctuen aquest fills en presència del vent. Posteriorment es veurà també aquestes línies obtingudes en la simulació per elements finits.



Fig.5.10: fils de perlé enlluernats amb llum ultraviolada[14]

5.3 Preparació de la simulació amb CFD

El software emprat per realitzar la simulació per elements finits ha estat el *Ansys Fluent 17*, el qual s'ha aconseguit de forma gratuïta degut a ser una versió incompleta per a estudiants.

Seguidament s'explicarà la metodologia emprada en la simulació pas per pas. Cal dir que s'explicarà tot el procés en general un cop, encara que pot haver petites modificacions entre diverses simulacions.

5.3.1 Creació de la geometria principal

En primer lloc, s'ha modelat la peça amb *Catia v5*, software que ha estat proporcionat per l'empresa on el tutor treballava en aquell moment. Per tal de poder importar la peça a *Ansys*, s'ha desat amb el format *.igs*. Tota la maqueta acotada es pot trobar en el plànol de l'annex 2. El resultat es pot observar en la figura 5.11.

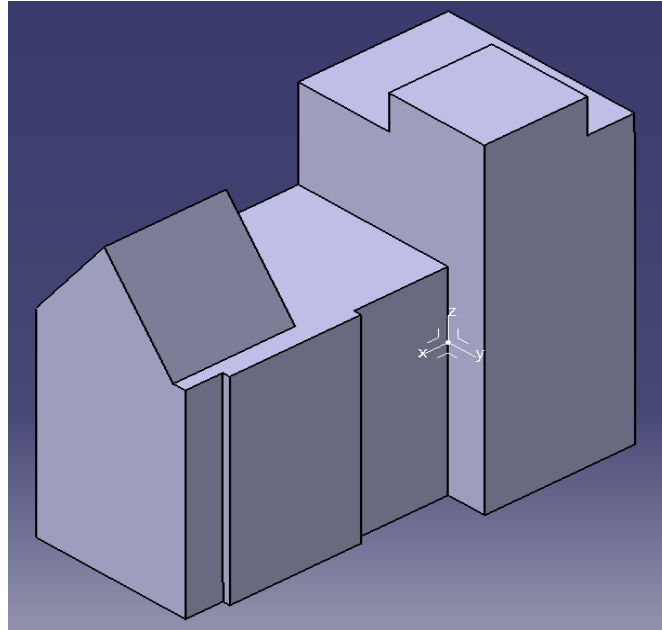


Fig.5.11: geometria principal de la maqueta[13]

5.3.2 Modificació de la geometria

El següent pas és obrir el Workbench d'Ansys (la versió 17.0 concretament), seleccionar quina anàlisi es vol dur a terme i completar els passos que s'indiquen. Aquest software ofereix moltíssimes possibilitats, però en aquest projecte només s'emprarà la simulació d'un fluid al voltant d'un cos (s'anomena *Fluid Flow (Fluent)* en el Workbench). En seleccionar aquesta opció, apareix un menú compost per 5 parts que s'aniran explicant en aquest apartat 5.3. Es pot observar el Workbench i el menú del Fluid Flow (Fluent) a la figura 5.12.

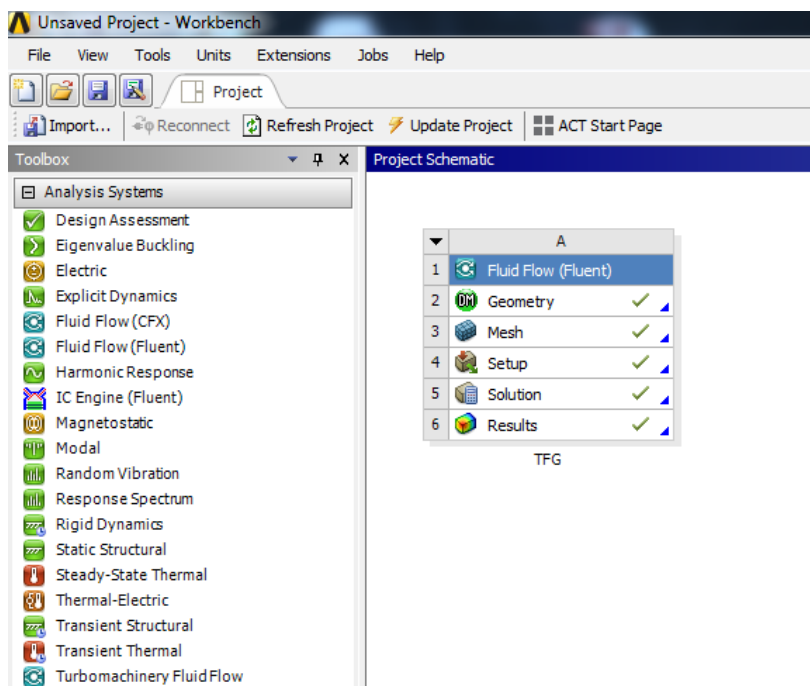


Fig.5.12: Workbench d'Ansys[15]

Com es pot observar, el primer pas fa referència a la geometria, la qual s'importa directament del directori on tenim guardada la nostra peça de *Catia v5* en format *.igs* i es prepara per la simulació. Per a poder completar aquest pas és necessari la creació d'una capsa que contingui la peça i per on flueixi el fluid. El software permet realitzar aquesta acció amb una simple comanda *Enclosure*. L'últim pas que queda per fer és restar el volum de la peça del volum total de la capsa per tal de que no es sobreposin. Aquesta operació s'aconsegueix amb una comanda anomenada *Boolean Operation, Subtract*. El resultat es pot observar a la figura 5.13.

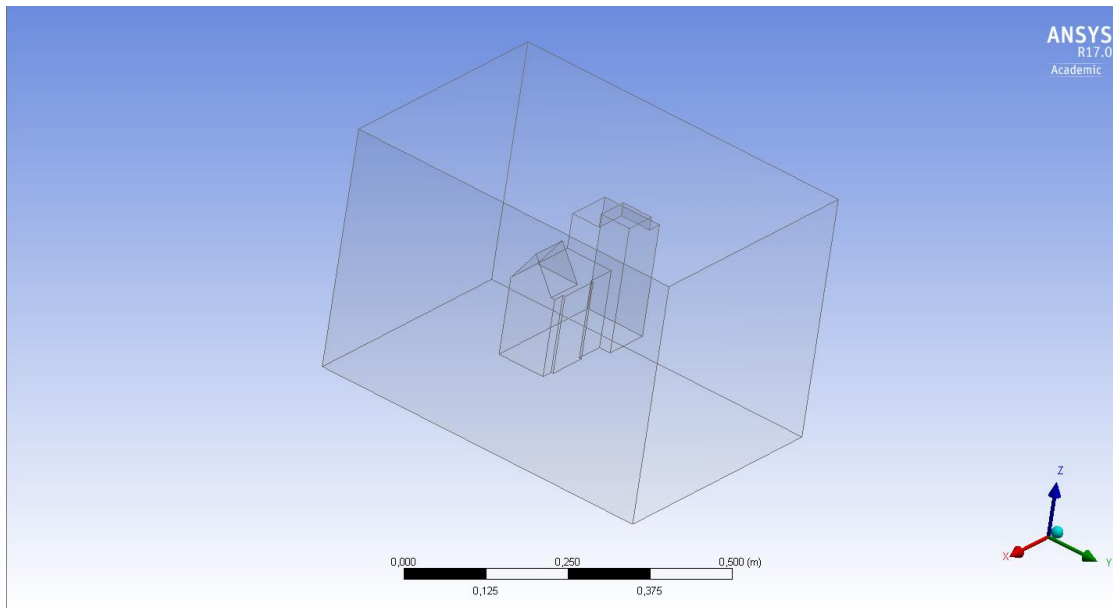


Fig.5.13: geometria de la maqueta dins la capsa[15]

5.3.3 Definició del mallat

Es clica sobre la segona opció que ofereix el menú del Workbench i s'obre una finestra relativa al mallat. Abans de definir el mallat s'ha d'anomenar les superfícies que tenim en la nostra geometria amb la comanda *Create Named Selection*. La superfície d'entrada d'aire l'anomenarem *inlet*, la de la sortida d'aire *outlet*, les altres 4 cares de la capsa les anomenarem *wall* i per últim les superfícies de la nostra peça les podem anomenar com vulguem, per exemple *building* (ja que es tracta d'un edifici). No és obligatori anomenar totes les superfícies (només la d'entrada i sortida del fluid) però és recomanable per tal que sigui més fàcil i entenedor.

Amb les superfícies anomenades, el següent pas és realitzar un mallat bàsic de tot el conjunt. Quan el software ha acabat, s'introdueixen uns canvis per refinar el mallat en les zones d'interès. Emprant la comanda *face sizing* es seleccionen les cares pertanyents a l'edifici i es tria una mida dels elements inferior a la que es donava per defecte anteriorment (s'ha triat una mida de 5mm per a tots els elements que formen part de les superfícies de l'edifici) amb una transició suau per tal de que no hagi canvis

bruscs en la mida dels elements. Cal tenir en compte de no posar una mida massa petita ja que al ser una versió incompleta del software, existeix un límit d'elements i nodes que hi pot haver. La resta de la capça es deixa amb el mallat per defecte precisament per la raó de la limitació de nodes i elements. El resultat del mallat es pot observar a la figura 5.14.

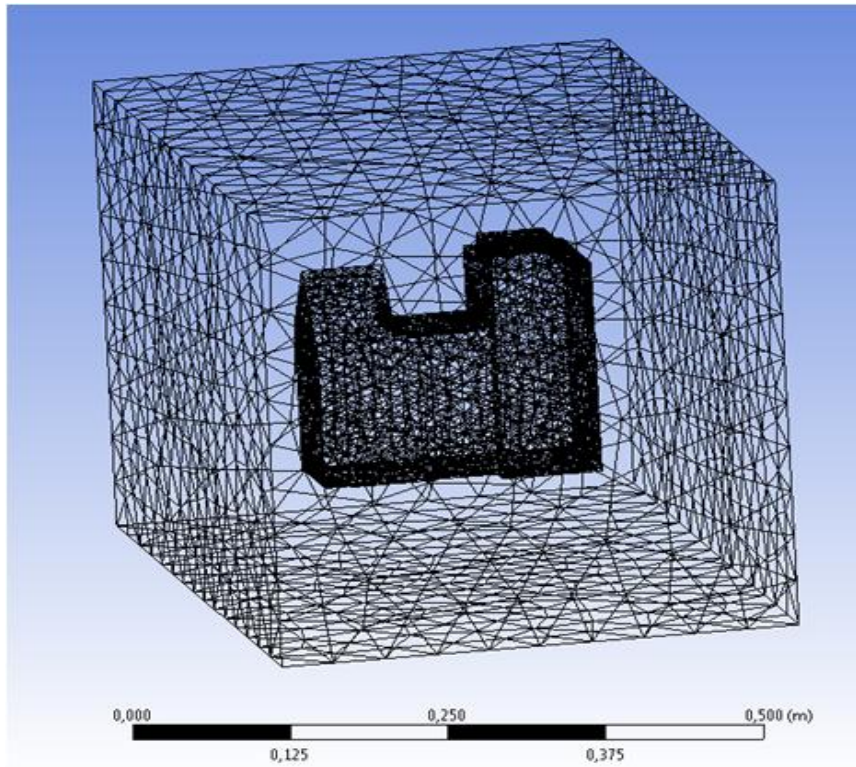


Fig.5.14: el mallat de la maqueta[15]

5.3.4 Configuració de les propietats

La tercera part del menú de Workbench és la de la configuració de les propietats de la simulació. En aquesta part s'obre el *Fluent* amb el cos mallat. A mà esquerra hi ha un arbre (veure figura 5.15) que s'ha de seguir pas a pas per tal de definir les característiques de la simulació i de la visualització dels resultats. A la taula 5.3 que es mostra a continuació s'exposen les opcions triades per a la simulació.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

General	Marcar la opció Pressure-Based i Steady (règim estacionari).
Model	S'ha agafat el model k-ε que és un model de 2 equacions força exacte.
Material	Aire (ja té definides per defecte la viscositat i la densitat).
Condicions de contorn (Boundary Conditions)	Editar la superfície <i>inlet</i> definint la velocitat d'entrada de l'aire, que en el nostre cas és de 7 m/s.
Valors de referència (Reference Values)	Marcar la pestanya d'importar les dades de <i>inlet</i> per tal que la velocitat sigui la correcta i també hem d'indicar l'àrea frontal. Aquesta àrea es pot calcular manualment o trobar-la dins de <i>Reports</i> de la penúltima branca de l'arbre <i>Results</i> .
Mètode de solució	Es deixa el que hi ha per defecte
Monitors	S'ha de configurar per tal que ens mostri els valors i la gràfica del coeficient de resistència (C_D). No oblidar de seleccionar <i>building</i> per tal que calculi el coeficient en l'edifici.
Solució inicial	Híbrida

Taula 5.3: condicions de simulació[19]

Per últim dins de la branca *Run Calculation* s'introdueix les iteracions que ha de fer el software. Després de fer diverses proves, s'ha establert el nombre de iteracions a 500 ja que la majoria de cops la solució convergia i s'establí el valor de C_D (es considera que s'estableix quan ja no hi ha variació en els 3 primers decimals).

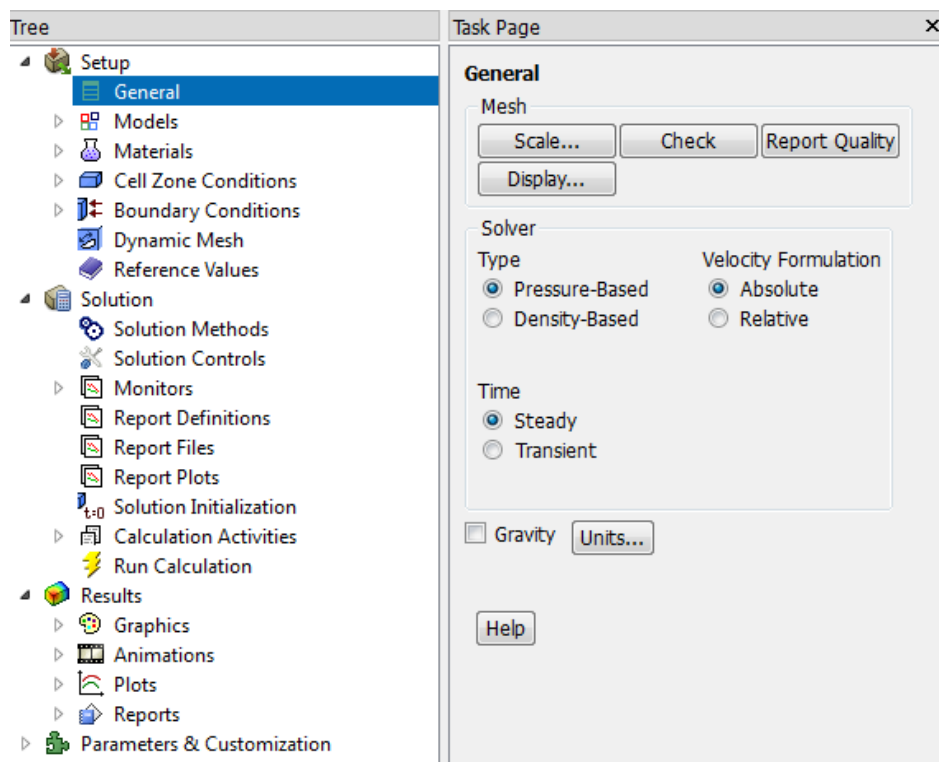


Fig.5.15: l'arbre de la configuració de les simulacions[15]

La branca de *Results* ens mostra els resultats de forma gràfica que estan exposat en el següent apartat 6.

6 RESULTATS I COMPARACIÓ

6.1 Resultats del túnel de vent (ventilador axial)

En aquest apartat s'explicaran els càlculs que s'han dut a terme per tal de trobar la velocitat de l'aire, la força exercida sobre la maqueta i el coeficient de resistència C_D .

Primer de tot es troba la velocitat amb la equació 6.1:

$$v = \sqrt{2gh} \cong 4\sqrt{H(\text{mmc aigua})}$$

Eq.6.1[17]

Substituint la H per 3 s'obté una velocitat de 6,928 m/s (s'arrodoneix a 7 m/s en la simulació per CFD).

En segon lloc es troba la força que el vent exerceix sobre la maqueta seguint els següents passos:

- 1) Es multiplica les dades de pressió obtingudes en mbar per 100 per tal de passar-les a Pascals (Pa).
- 2) Es passa l'àrea frontal de mm a m.
- 3) S'integra el producte de cada valor de pressió per la seva corresponent àrea frontal (com les àrees son rectangulars és tant simple com multiplicar per la base i altura):

$$dF = \int dP * dA = \int dP * dx * dy$$

Eq.6.2[18]

A la taula 6.1 es representen els resultats obtinguts:

Direcció	Punt	P (mbar)	P (Pa)	A (mm ²)	A (m ²)	F (N)
1	1	0,7	70	12240	0,01224	0,8568
	2	0,65	65	6800	0,0068	0,442
	3	0,75	75	17025	0,017025	1,276875
	5	0,3	30	3835	0,003835	0,11505
2	10/11	0,45	45	22344	0,022344	1,00548

Taula6.1: dades obtingudes de la simulació amb el ventilador axial[19]

D'aquesta forma obtenim 2 valors de força: 2,690725 N (la suma de les 4 forces de la direcció 1) i 1,00548 N.

Per últim també es pot trobar el valor del coeficient de resistència C_D a partir de la equació 6.3:

$$D = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D$$

Eq.6.3[17]

Aïllant C_D :

$$C_D = \frac{2D}{\rho A v^2}$$

Eq.6.4[17]

Obtenim els següents valors de C_D :

Direcció	D (N)	ρ (kg/m ³)	A (m ²)	v^2 (m ² /s ²)	C_D
1	2,690725	1,2	0,0399	48	2,34155267
2	1,00548	1,2	0,022344	48	1,5625

Taula6.2: dades obtingudes de la simulació amb el ventilador axial[19]

Com es pot observar els C_D obtinguts s'apropen bastant als C_D teòrics que es van presentar a l'apartat 4.1.4 d'aquest document tot i les dificultats per prendre les mesures en el ventilador.

6.2 Resultats simulació CFD

En aquest apartat s'exposarà i es comentarà els resultats obtinguts en la simulació per elements finits. Es presentaran els resultats de C_D , força exercida pel vent, distribució de pressions i velocitats i per últim representació de les línies de corrent.

Els resultats obtinguts han estat els següents:

- C_D , direcció 1:

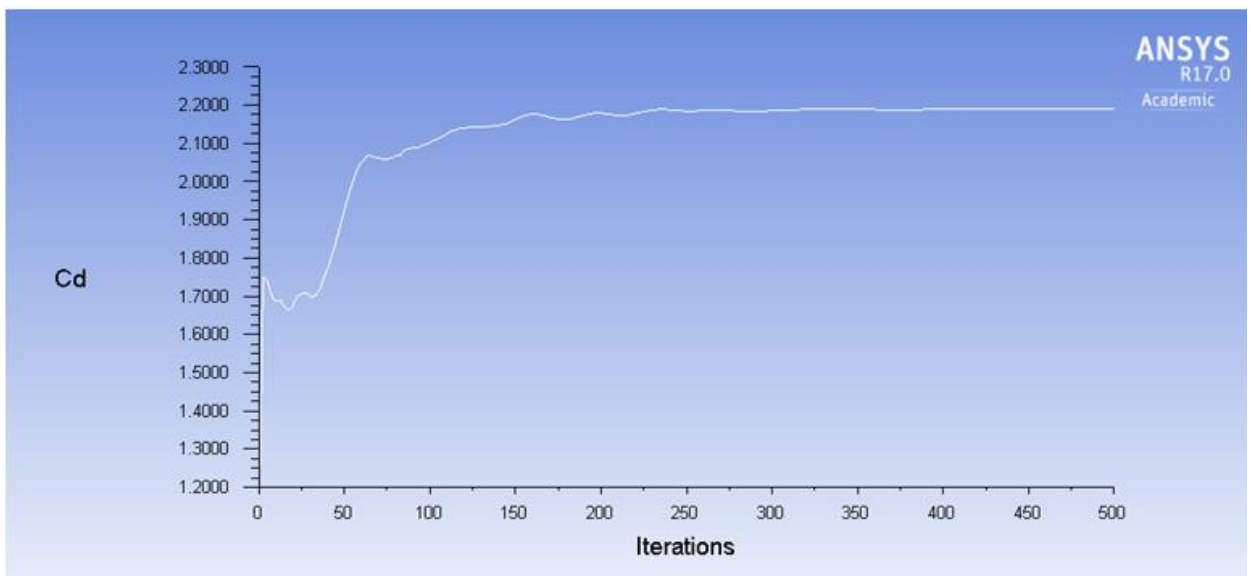


Fig.6.1: representació del C_D al llarg de 500 iteracions, direcció 1[15]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

```

reversed flow in 31 faces on pressure-outlet 6.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity k epsilon Cd-2
496 2.8310e-03 1.5436e-05 2.9556e-05 1.8670e-05 1.5258e-04 4.5297e-04 2.1897e+00

reversed flow in 31 faces on pressure-outlet 6.
497 2.8543e-03 1.5432e-05 2.9448e-05 1.9023e-05 1.5440e-04 4.8432e-04 2.1895e+00

reversed flow in 31 faces on pressure-outlet 6.
498 2.8615e-03 1.5309e-05 2.9124e-05 1.9072e-05 1.4806e-04 4.3587e-04 2.1895e+00

reversed flow in 31 faces on pressure-outlet 6.
499 2.8151e-03 1.5240e-05 2.8962e-05 1.8753e-05 1.4291e-04 4.0066e-04 2.1895e+00

reversed flow in 31 faces on pressure-outlet 6.
500 2.7458e-03 1.5043e-05 2.8840e-05 1.8670e-05 1.4155e-04 3.9491e-04 2.1896e+00
    
```

Fig.6.2: valor numèric de C_D , direcció 1[15]

A la figura 6.2 s'observa que el valor obtingut és el de 2,189 més proper al teòric que l'obtingut per la simulació amb el ventilador.

- C_D , direcció 2:

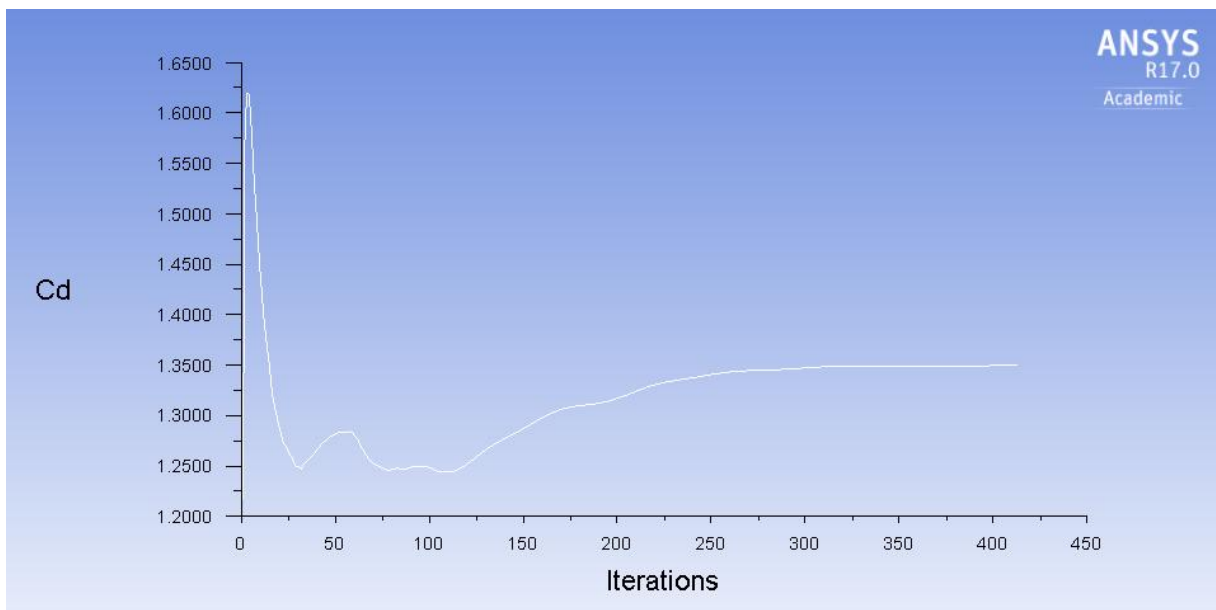


Fig.6.3: representació del C_D al llarg de 500 iteracions, direcció 2[15]

```

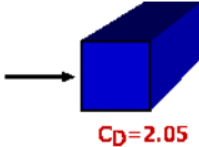
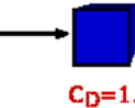
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity k epsilon Cd-1
408 1.0030e-03 1.1158e-05 5.5847e-06 5.0142e-06 4.1292e-05 7.1755e-05 1.3496e+00
409 1.0109e-03 1.1117e-05 5.5648e-06 5.0030e-06 4.1158e-05 7.2496e-05 1.3496e+00
410 1.0182e-03 1.1068e-05 5.5364e-06 4.9882e-06 4.0820e-05 7.1492e-05 1.3497e+00
411 1.0184e-03 1.0981e-05 5.4699e-06 4.9702e-06 4.0336e-05 7.0922e-05 1.3497e+00
412 1.0099e-03 1.0897e-05 5.4131e-06 4.9463e-06 3.9587e-05 6.8425e-05 1.3497e+00
413 solution is converged
413 9.9885e-04 1.0789e-05 5.3462e-06 4.9179e-06 3.9040e-05 6.7446e-05 1.3497e+00
    
```

Fig.6.4: valor numèric de C_D , direcció 2[15]

En la direcció 2, s'ha obtingut un C_D de 1,3497. No es té el valor teòric del C_D per aquest cas però es pot fer una comparació (encara que no exacta) al valor de C_D d'un cub.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

A la taula-resum 6.3 es comparen tots els resultats trobats:

C_D teòric	C_D ventilador	C_D CFD
 $C_D=2.05$	2,34155267	2,189
 Cube $C_D=1.05$	1,5625	1,3497

Taula 6.3: comparació dels C_D [19]

S'ha de mencionar que les resultats més precisos són els obtinguts per mitjà de la simulació per elements finits degut a la forma de com es van prendre les mesures amb el ventilador.

- Força exercida (N), direcció 1:

Forces - Direction Vector (0 -1 0)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
building	2.6773126	-0.00013323851	2.6771794

Net	2.6773126	-0.00013323851	2.6771794

Fig.6.5: valor de la força exercida per l'aire, direcció 1[15]

- Força exercida (N), direcció 2:

Forces - Direction Vector (1 0 0)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
building	0.91286511	-0.0023439749	0.91052113

Net	0.91286511	-0.0023439749	0.91052113

Fig.6.6: valor de la força exercida per l'aire, direcció 2[15]

Els valors de les forces obtingudes pels 2 mètodes difereixen però no massa. En la direcció 1 els dos valors obtinguts són: 2,690725 i 2,6771794 i pel que fa a la direcció 2 s'ha obtingut 1,00548 i 0,91052113. Tal com s'ha mencionat abans, el resultat més exacte és l'obtingut per CFD.

- Distribució de pressions, direcció 1:

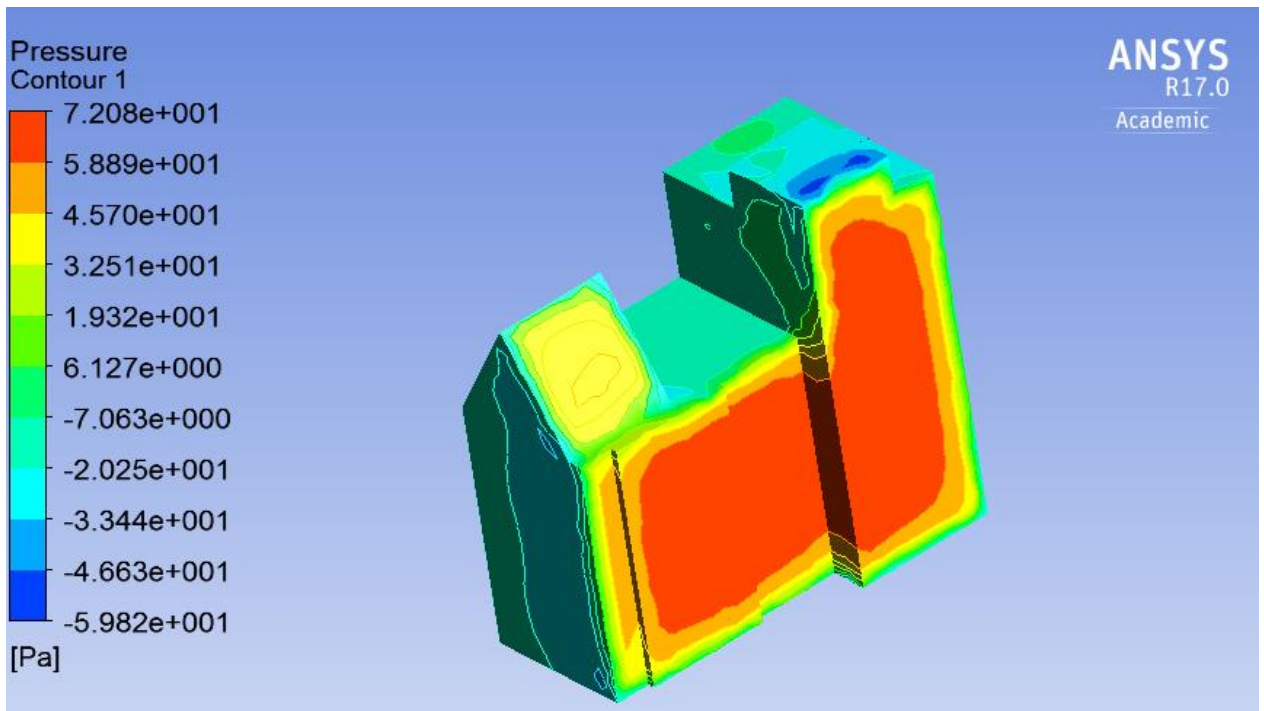


Fig.6.7: distribució de pressions a les cares frontals de la maqueta segons la direcció 1[15]

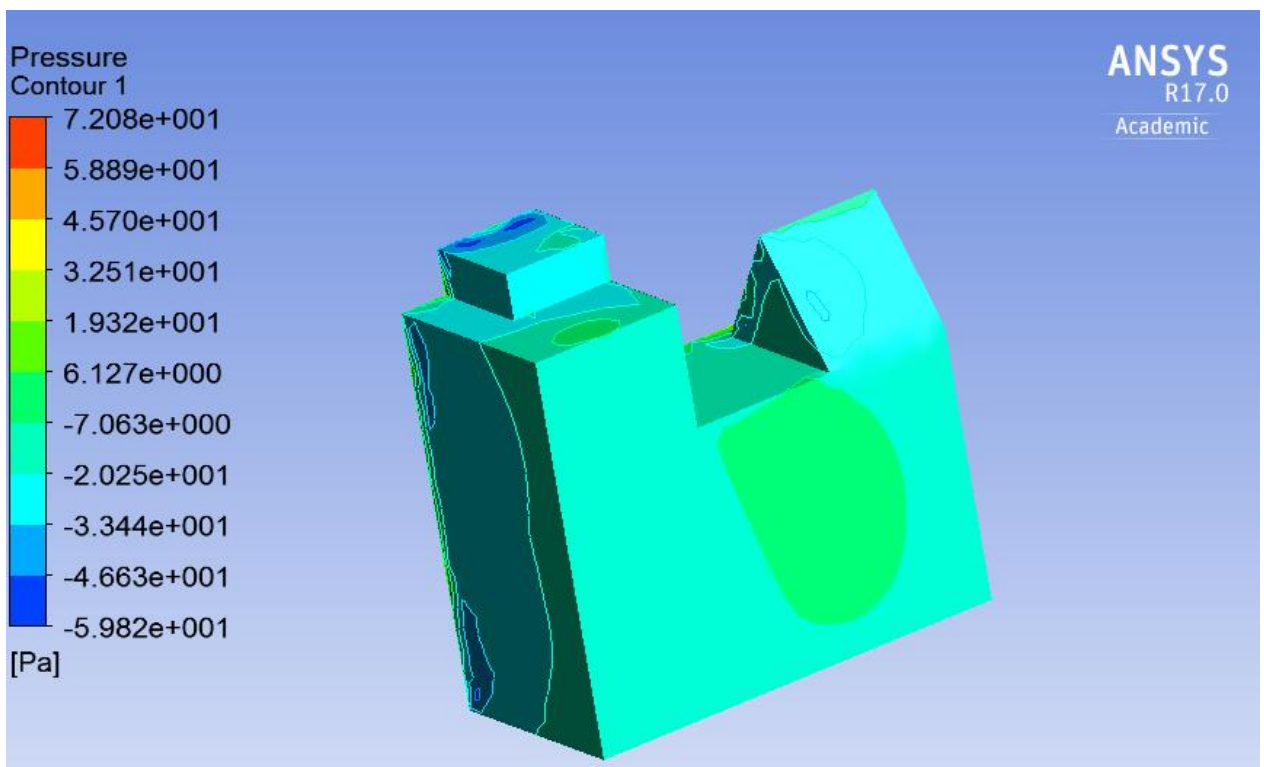


Fig.6.8: distribució de pressions a les cares posteriors de la maqueta segons la direcció 1[15]

Els valors màxims i mínims de les pressions són 72,075 Pa i -59,822 Pa.

- Distribució de pressions, direcció 2:

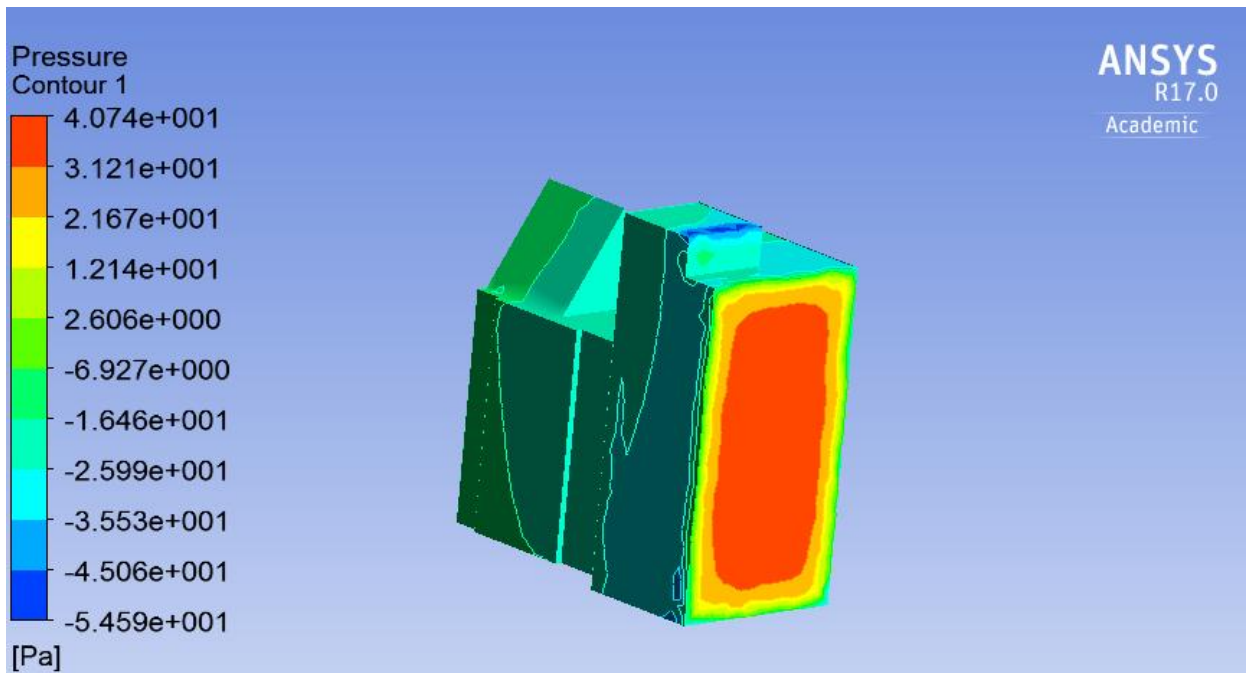


Fig.6.9: distribució de pressions a les cares frontals de la maqueta segons la direcció 2[15]

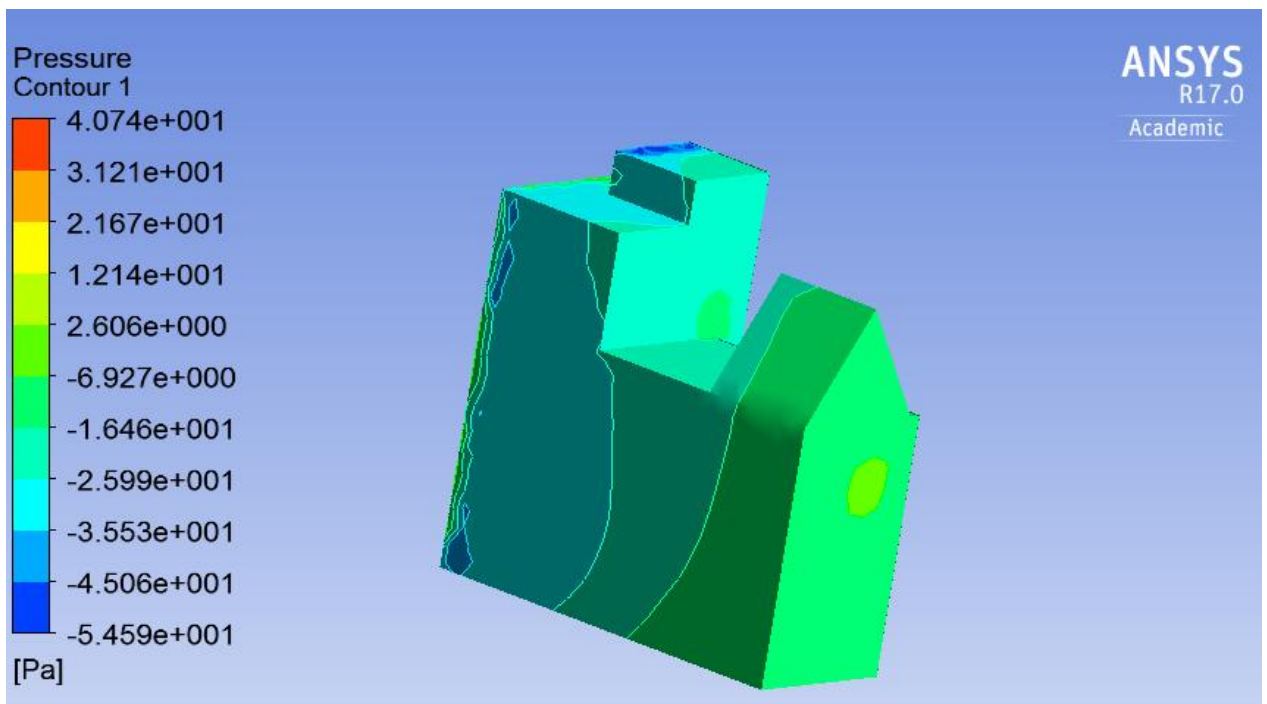


Fig.6.10: distribució de pressions a les cares posteriors de la maqueta segons la direcció 2[15]

Els valors màxims i mínims de les pressions són 40,7389 Pa i -54,5931 Pa.

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

Es compara les pressions puntuals que s'han obtingut per experimentació amb el ventilador i per CFD (s'ha agafat el node més proper a cada posició) en la taula 6.4:

Punt	Direcció 1		Direcció 2	
	P (ventilador)	P (CFD)	P (ventilador)	P (CFD)
1	70	68,63	0	-16,11
2	65	70,08	-5	-15,82
3	75	65,24	-15	-27,34
4	5	-8,72	-5	-6,92
5	30	34,15	-5	-11,27
6	-15	-14,18	-10	-15,08
7	-15	-18,27	-10	-16,63
8	-20	-31,05	-30	-30,31
9	-20	-21,31	-30	-26,27
10	-10	-8,93	45	40,11
11	-10	-7,87	45	39,88
12	-15	-20,45	-30	-26,81
13	-10	-5,31	-35	-28,42
14	-10	-1,15	-15	-15,14

Taula 6.4: mesures de pressió en Pa[19]

Hi ha variacions en la majoria dels valors, com és lògic, degut principalment a les imperfeccions en el mètode de mesura durant l'experimentació amb el ventilador, a l'error humà i a les imperfeccions en la construcció de la maqueta (les cares no són perfectament perpendiculars entre sí per exemple).

- Distribució de velocitats, direcció 1:

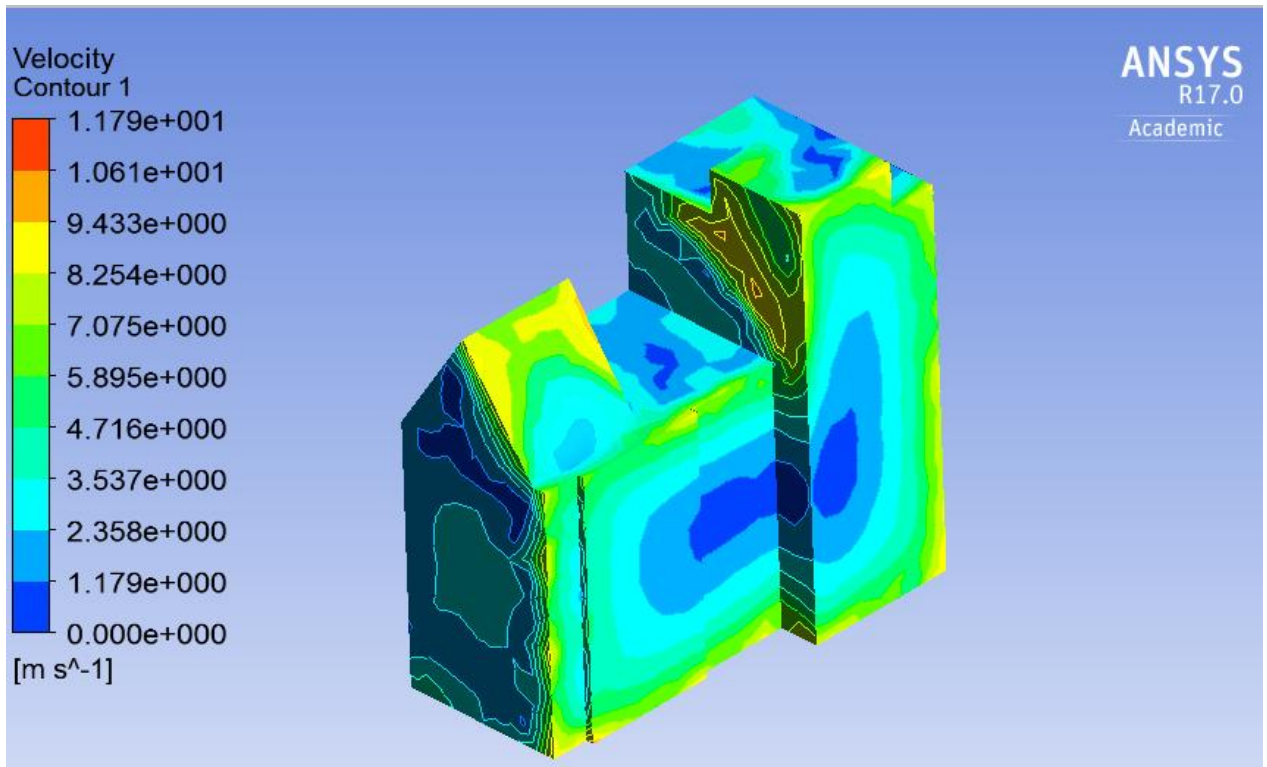


Fig.6.11: distribució de velocitats a les cares frontals de la maqueta segons la direcció 1[15]

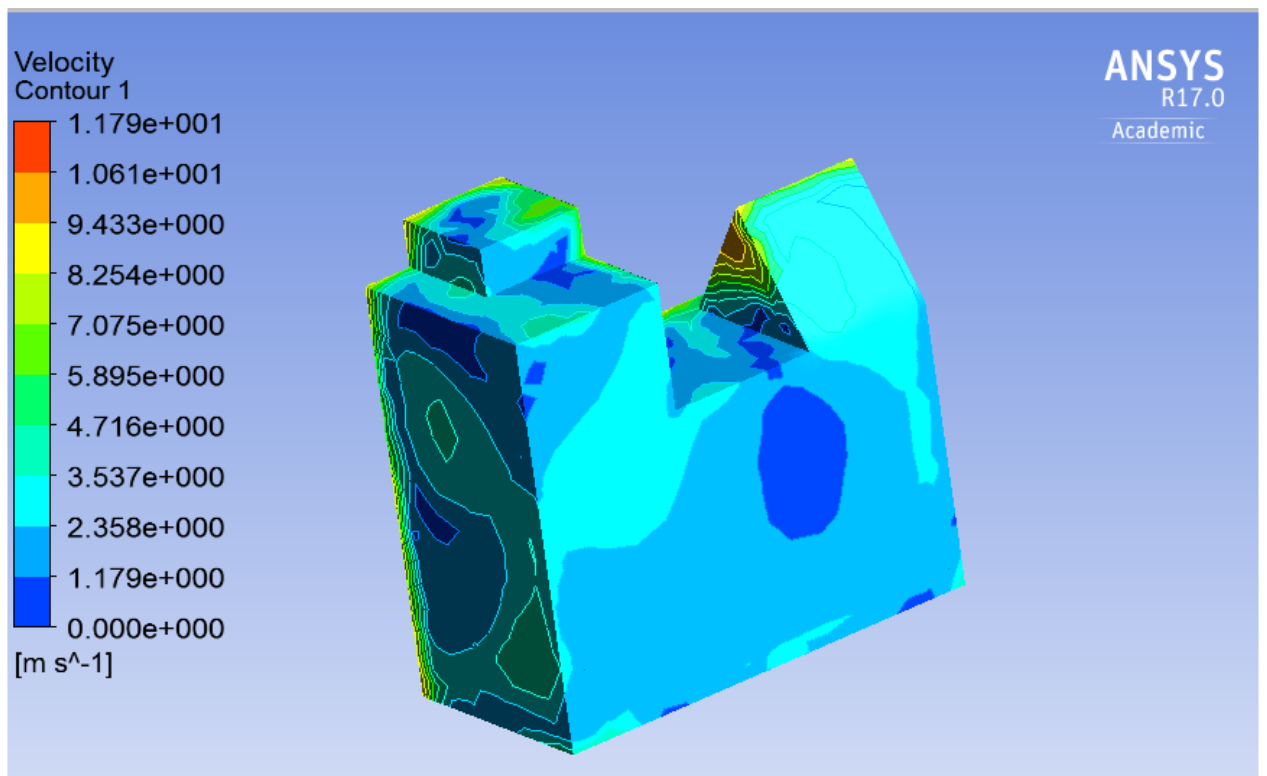


Fig.6.12: distribució de velocitats a les cares posteriors de la maqueta segons la direcció 1[15]

- Distribució de velocitats, direcció 2:

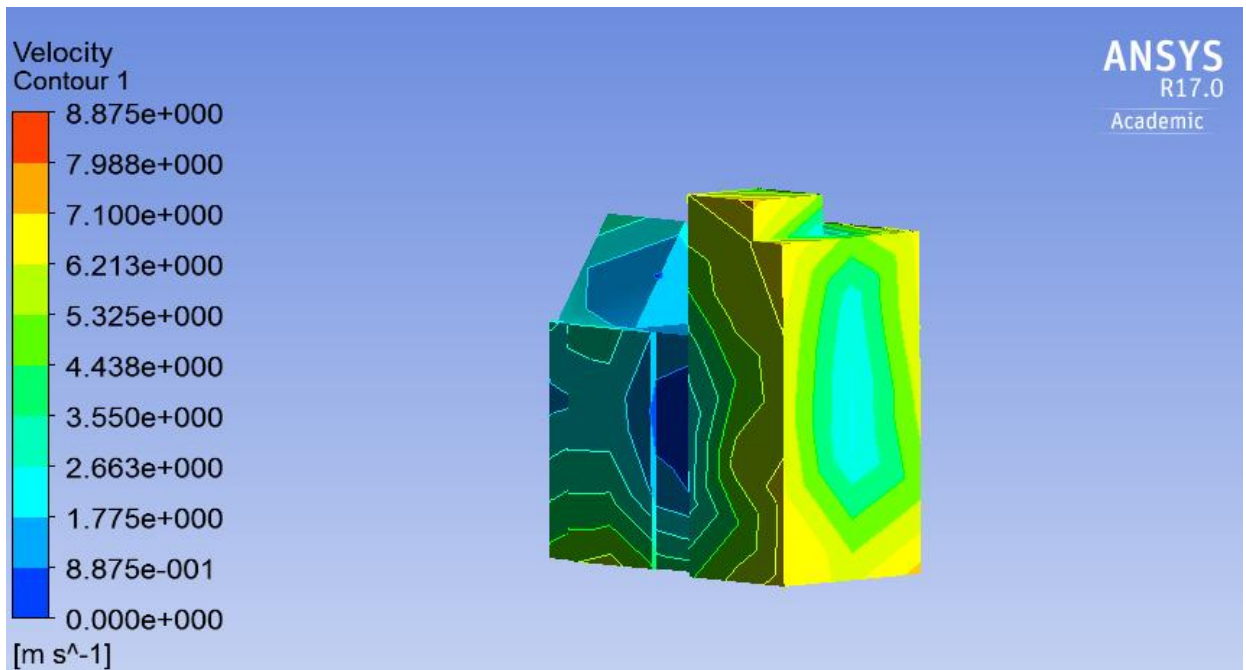


Fig.6.13: distribució de velocitats a les cares frontals de la maqueta segons la direcció 2[15]

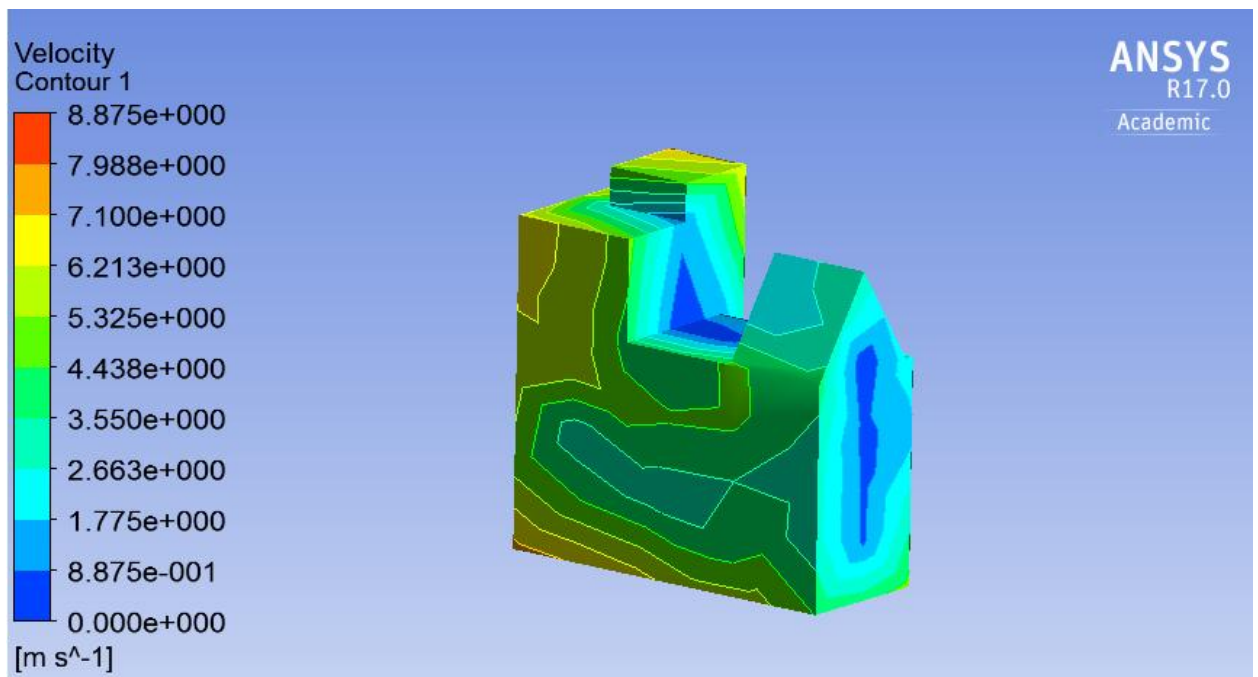


Fig.6.14: distribució de velocitats a les cares posteriors de la maqueta segons la direcció 2[15]

La distribució de velocitats es correspon amb la expectativa en els 2 casos exposats: la velocitat és màxima en zones on la pressió és mínima i al revés (Principi de Bernoulli).

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

- Línies de corrent, direcció 1:

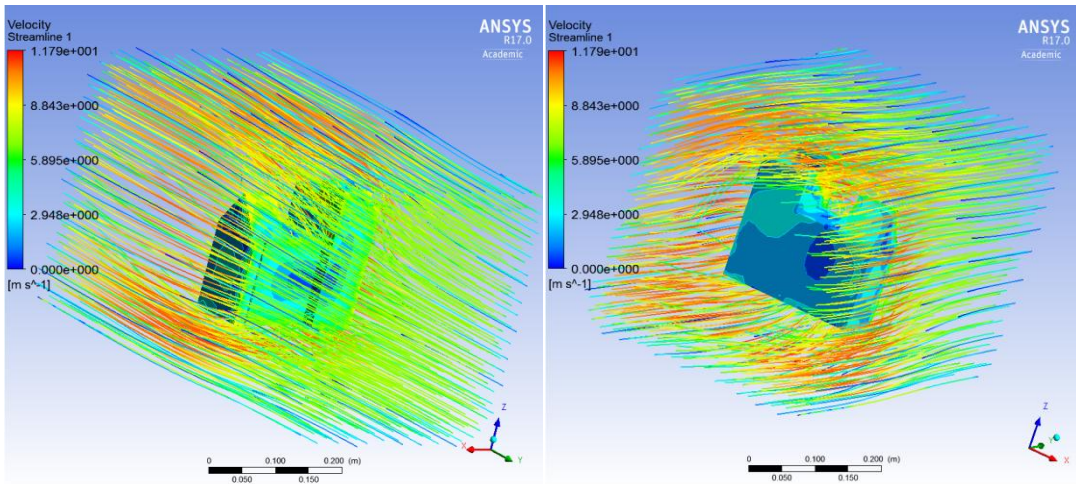


Fig.6.15: línies de corrent segons la direcció 1[15]

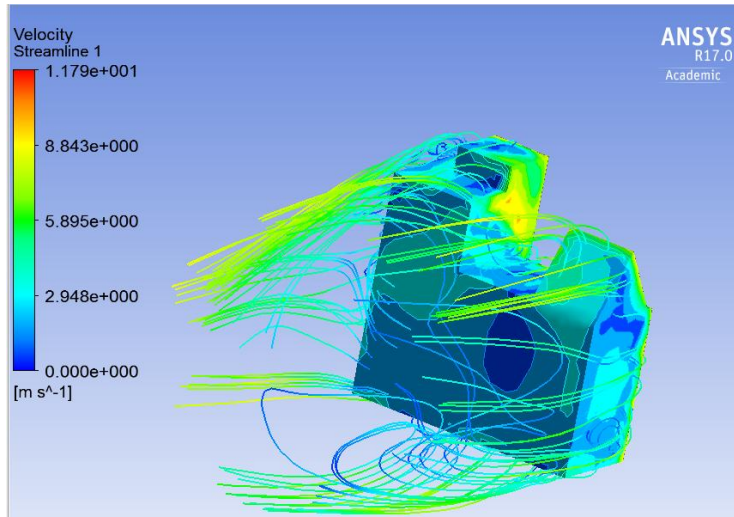


Fig.6.16: representació dels remolins, vista posterior, direcció 1[15]

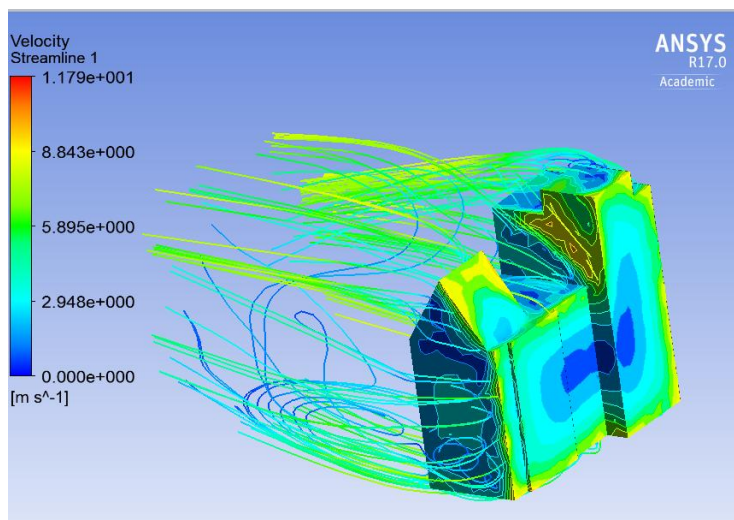


Fig.6.17: representació dels remolins, vista frontal, direcció 1[15]

Estudi de l'acció del vent sobre edificis de gran altura

A la figura 6.15 s'aprecia la trajectòria de les partícules fluides de tota la capsa. A les figures 6.16 i 6.17 s'aprecia molt bé les turbulències que es produeixen a la part posterior de l'edifici degut al canvi de geometria brusc i al desprendiment de la capa límit. És un resultat esperat tal com es va veure teòricament i en l'experiment amb els fils de perlé.

- Línies de corrent, direcció 2:

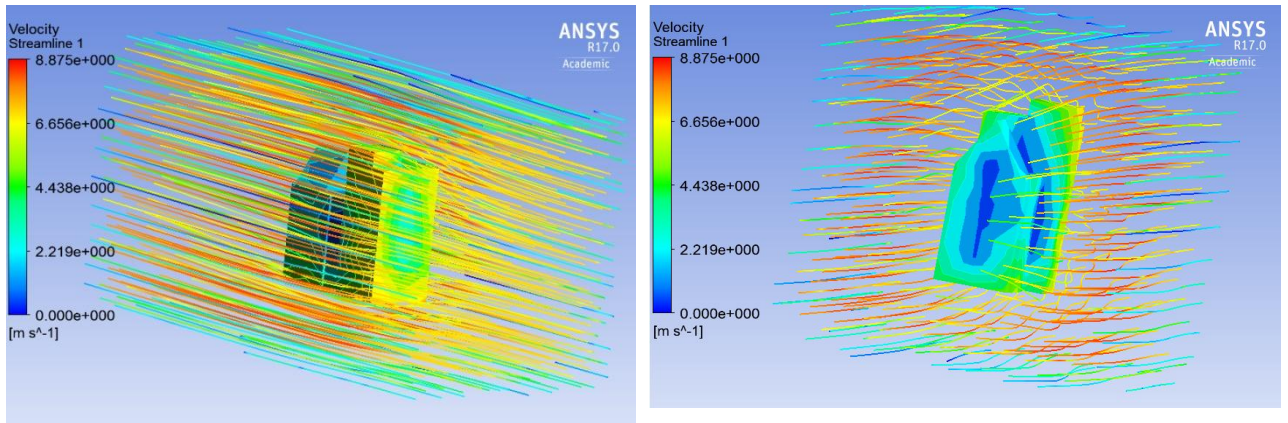


Fig.6.18: línies de corrent segons la direcció 2[15]

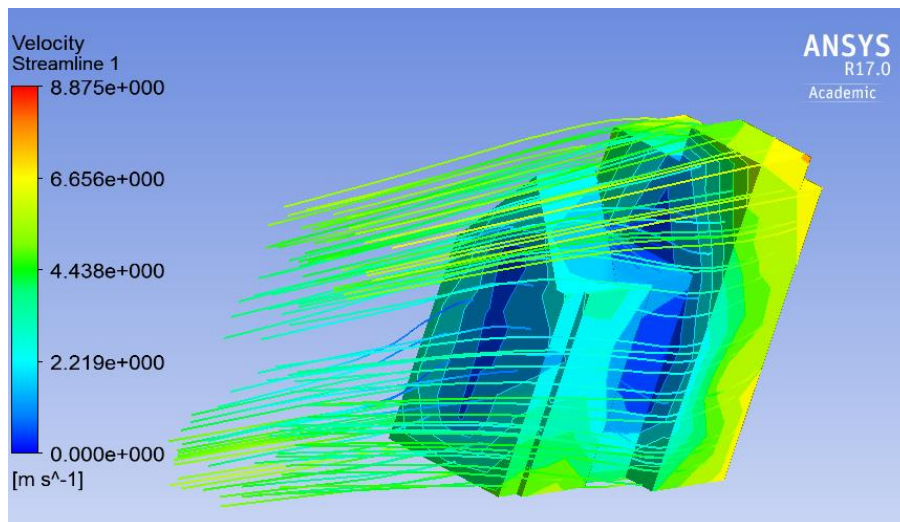


Fig.6.19: representació dels remolins, vista posterior, direcció 2[15]

En el cas de la segona direcció les turbulències són menors, encara que es pot destacar les que s'aprecien a la part central superior de l'edifici tal com es veu a la figura 6.19.

7. PLANIFICACIÓ TEMPORAL

Aquest projecte va començar el dia 25/02/2016 quan el projecte va ser validat pel tutor del treball, Enric Trillas Gay. L'autor tenia previst desenvolupar el projecte durant el quadrimestre de primavera i entregar-lo en la convocatòria del juliol però degut a un problema sorgit amb la simulació no es va poder acabar a temps i es va allargar fins la convocatòria extraordinària del setembre de 2016. En concret s'entrega el projecte el dia 09/09/2016. També s'ha afegit el període de les vacances durant el qual el projecte estava parat. A la part inferior es veu representat un diagrama de Gantt (figura 7.1) amb les dates i durades de cada una de les parts del projecte.

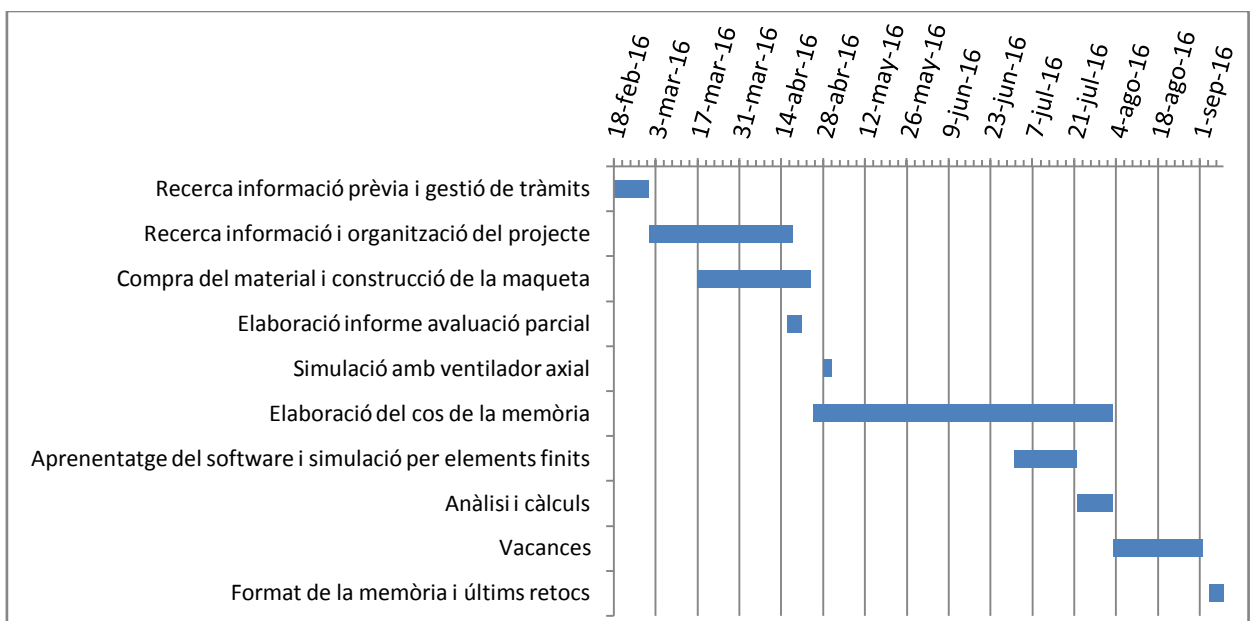


Fig.7.1: Diagrama de Gantt[16]

Cal afegir que ha va haver 3 reunions presencials amb el tutor Enric Trillas Gay que no estan representades en el diagrama.

8. PRESSUPOST

El cost total del projecte es detalla a la taula 8.1. Per fer la estimació del pressupost s'han tingut en compte les possibles despeses tant per la part de l'autor com per part de la universitat.

Per part de l'autor cal considerar la compra del material per a la construcció de la maqueta, despeses d'electricitat a l'hora d'utilitzar eines de construcció (només s'ha utilitzat el trepant durant un temps molt breu i per tant es menysprea el seu cost) i ordinador (no es té en compte la compra d'un ordinador o de les eines ja disponibles), desplaçament des del domicili de l'estudiant (situat a Badalona) fins a la universitat per visites amb el tutor/assajos amb el ventilador i per últim el seu sou personal (es considera un sou de 8€/hora que és el sou orientatiu que l'ETSEIB estableix per enginyers becaris [24]) durant 300 hores de treball. Per part de la universitat només es considera la despesa d'electricitat del ventilador durant una hora aproximadament (al ser la potència del motor del ventilador desconeguda, s'ha considerat la potència del túnel de vent de l'ETSEIB, que equival a 25CV.

La mitjana del preu del kWh entre varies companyies subministradores és de 0,136€/kWh [27]. Pel que fa a la creació de geometria i posterior simulació s'han fet servir els software *Catia v5* i *Ansys Fluent 17* però les llicències no aporten un cost extra al projecte ja que o bé han estat proporcionades per l'empresa on està treballant l'estudiant actualment (en el cas de *Catia v5*) o s'han obtingut gratuïtament amb una versió simplificada per estudiants (cas *Ansys Fluent 17*). Es considera que s'han emprat unes 240 hores d'ordinador en fer el treball. Tenint en compte que la torre de l'ordinador té un consum [25] aproximat de 260W (només es té en compte aquest consum amb l'estat d'ordinador "encès" i les altres hores està "apagat" i amb consum 0) i la del monitor LCD és de 40W tenim un consum total de 300W. Multiplicant per les 240 hores obtenim 72kWh.

La major part del pressupost va destinada al sou del enginyer júnior, mentre que les altres despeses ocupen un % mínim.

Aquestes distribucions es veuen clarament representades en la figura 8.1.

COSTOS		
<u>Autor</u>		
Despesa	Tipus	Preu [€]
Maqueta	Listó fusta	5,10
	Cola "superglue"	5,59
	Claus	1,59
	Paper de vidre	0,79
	Pintura negra	2,44
	Pinzell	0,70
	Canonada alumini (inclou tallar-la)	8,10
	Mànega	3,10
	Pack de serres	2,70
Electricitat	Ordinador	9,79
Desplaçament	T-10	9,95
Sou	Becari	2400
Subtotal		2449,85
<u>Empresa</u>		
Electricitat	Ventilador	2,50
Subtotal		2,50
COST TOTAL		2452,35

Taula8.1: costos[19]

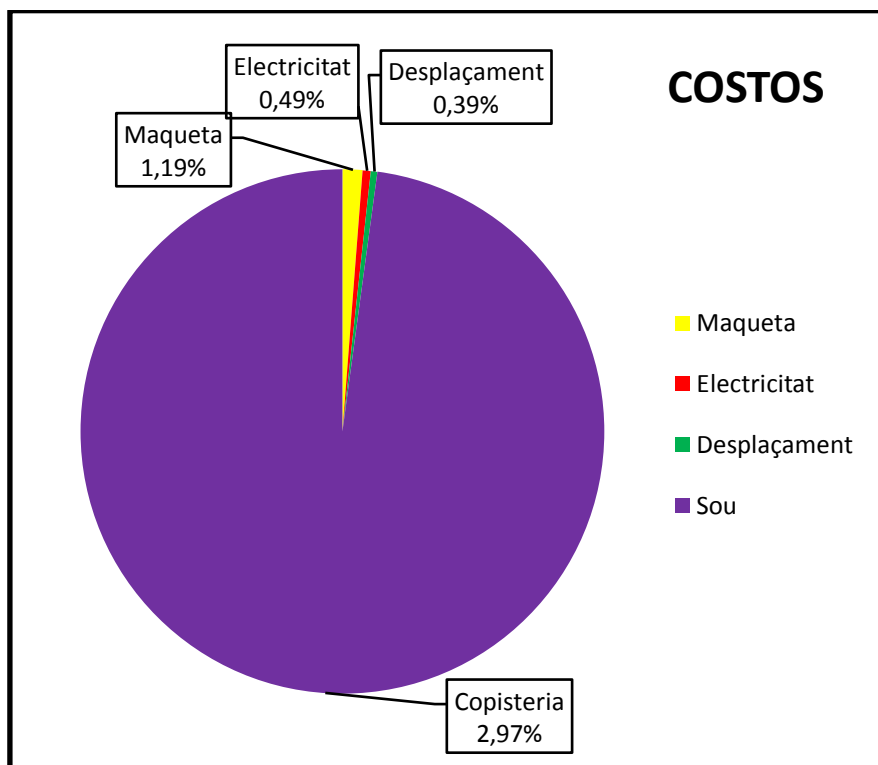


Fig.8.1 : distribució dels costos[16]

9. IMPACTE AMBIENTAL

El projecte inclou l'estudi d'una maqueta d'un edifici mitjançant assajos de l'esmentada maqueta amb ventilador industrial i simulacions numèriques amb ordinador.

Primerament, per la construcció de la maqueta s'ha de tenir present els materials emprats. Tanmateix, és important que la majoria de materials utilitzats siguin reciclables per a no perjudicar el medi ambient, encara que és obvi que no tots ho podran ser. El material amb més quantitat utilitzat és la fusta i aquesta és reciclada. Les mànegues de plàstic, l'altre material més utilitzat, no són reciclables però es va comprar la quantitat necessària per tal que si sobrés, aquesta fos mínima. Tenint en compte això i la resta de materials exposats en l'apartat 5.1 es pot dir que l'impacte ambiental per a la construcció és mínima. A més la maqueta no es tirarà o es reciclarà sinó que es conservarà com a record del treball realitzat.

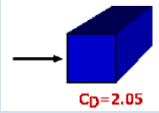
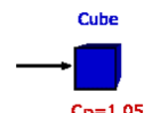
D'altra banda també està l'ús de l'electricitat tant del ventilador industrial (ús mínim i per tant no es contemplarà en els càlculs) com de l'ordinador (aproximadament el 95% de tota l'electricitat consumida durant el projecte). Per calcular els kg de CO₂ emesos es farà servir el factor de conversió dels kW consumits durant tot el projecte per l'ordinador (inclou torre i monitor). Aquest factor equival a 0,399 kg CO₂/kWh segons el ministeri d'indústria, energia i turisme[26]. Tenint en comte aquest factor i el consum d'electricitat de l'ordinador exposat a l'apartat del pressupost tenim:

Objecte	Potència (kW)	Temps (h)	Consum (kWh)	Kg CO ₂
Torre	0,260	240	62,4	24,898
Monitor	0,040	240	9,6	3,830
TOTAL EMISSIONS				28,728

Taula9.1: emissions de CO₂[19]

10. CONCLUSIONS

La taula 10.1 resumeix els resultats obtinguts en aquest projecte:

Direcció	C_D teòric	C_D ventilador axial	C_D CFD	F (N) experimentada	F (N) simulada	P màx./P mín. experimentats (Pa)	P màx./P mín. simulats (Pa)
1		2,341	2,189	2,691	2,677	75/-20	70,08/-31,05
2		1,562	1,350	1,005	0,911	45/-35	40,11/-30,31

Taula 10.1: resum dels resultats obtinguts[19]

Com es pot veure, els valors són bastant similars en la direcció 1 de la simulació i difereixen més en la segona direcció. Tal com s'ha comentat abans, els resultats més precisos són els obtinguts per mitjà de la simulació amb elements finits amb el software *Ansys Fluent 17*. Els resultats obtinguts durant l'experimentació amb el ventilador axial segueixen sent prou bons però les inexactituds provenen del mateix disseny de la peça (estava dissenyada per a una concreta cambra d'assajos d'un túnel de vent), de l'error humà en la presa de mesures i també en les imprecisions en la construcció de la maqueta (cares no perpendiculars entre sí del tot), que afecta sobretot a les dades de pressió (amb això s'explica que hi hagi una notable pressió en superfícies que en teoria són perpendiculars a la corrent d'aire i per tant amb àrea frontal de contacte 0).

Pel que fa a la simulació amb *Fluent*, els resultats es consideren prou bons però és obvi que podrien ser més precisos si no hi hagués restricció en el nombre d'elements i nodes a usar. La capsa es podria fer més gran, la mida dels elements de la maqueta de l'edifici més petita i també es podria refinar tant com es vol la zona dels voltants de l'edifici per veure amb precisió els efectes del desprendiment de la capa límit i formació de turbulències.

Un comentari que m'ha suggerit l'Enric sobre les diferències observades pel que fa la capa límit és que en l'experimentació a l'estar la maqueta per sobre del terra l'efecte de la capa límit no era apreciable, en canvi en la simulació numèrica sí. En l'experimentació arribava el flux net al punt de mesura i aquet podria ser el motiu de les diferències entre els resultats. A la figura 10.1 es representen 2 imatges vistes anteriorment que representen els remolins que es formen:

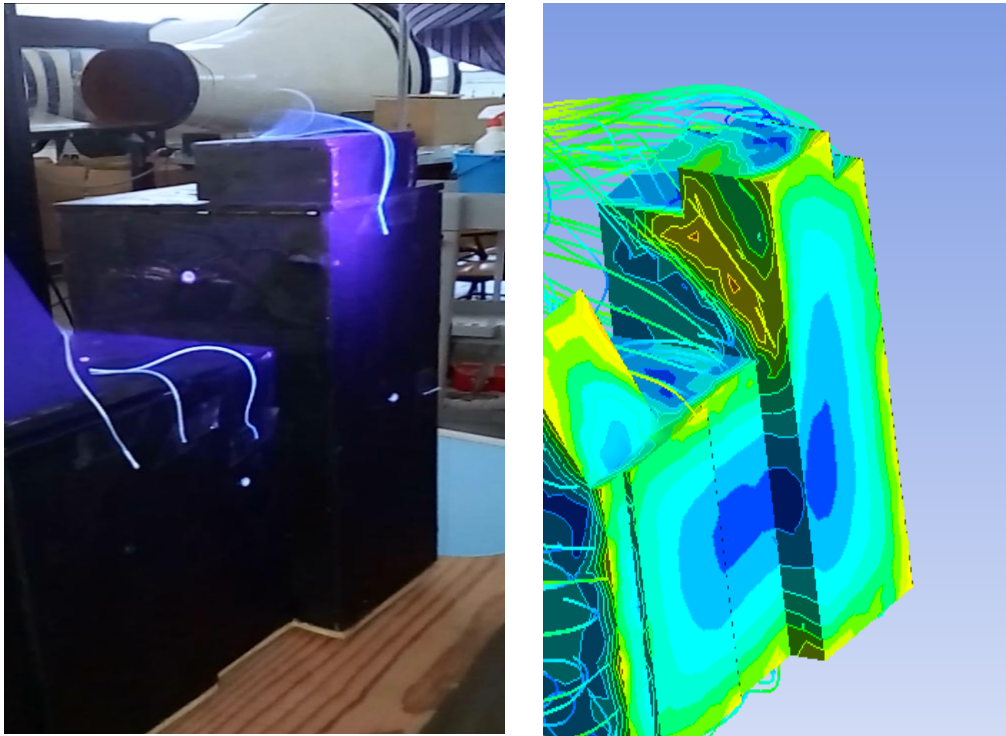


Fig.10.1: comparació de remolins[14][15]

Per últim, pel que fa als objectius personals de l'autor, aquests s'han vist complerts. S'ha après el funcionament dels túnels de vent i també s'ha ampliat el coneixement del mètode dels elements finits en el camp de la mecànica dels fluids (fer una simulació des de zero d'un cos en 3D). A més s'han adquirit coneixements sobre el camp de l'aerodinàmica, que és un tema interessant per l'autor d'aquest projecte ja que aquest vol continuar el seu aprenentatge en el món de l'automoció. L'interès i la curiositat de l'autor anaven en augment a mesura que avançava amb aquest projecte i obtenia resultats coherents.

11. AGRAÏMENTS

Essencialment, voldria agrair a Enric Trillas Gay per tot l'interès i la disposició que ha mostrat en tot moment durant la realització d'aquest treball, al llarg del qual s'ha mostrat molt receptiu i m'ha ajudat a solucionar els dubtes i problemes que m'han sorgit.

També però, agrair als meus amics i família pel recolzament rebut al llarg del projecte, interessant-se pel tema a desenvolupar i fent que jo mateix tingués més ganes d'aprendre i aprofundir en la matèria.

BIBLIOGRAFIA

Referències de les figures, equacions i taules que apareixen a la memòria:

- [1] Pàgina web "laguia2000, apartat de física i dinàmica clàssica"
<<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>>
[Cons: Març 2016]
- [2] Pàgina web "oskrsf wordpress, apartat d'hidrodinàmica"
<<https://oskrsf.wordpress.com/hidrodinamica/el-principio-de-bernoulli/>> [Cons: Març 2016]
- [3] Pàgina web "first flight forces" < <http://weblab.open.ac.uk/firstflight/forces/>>
[Cons: Març 2016]
- [4] Pàgina web "Aerodynamics for students" <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/introvisc/node11.html> [Cons: Març 2016]
- [5] PDF "Flujos externos", Autor: José Agüera Soriano, Universidad de Cordova 2012
<http://www.uco.es/termodinamica/ppt_Oct2012/pdf/fluidos%205.pdf> [Cons: Març 2016]
- [6] Pàgina web "posibles errores en los pluviómetros"
<<http://www.pluviometro.com/temasdivul/errorpluvi.html>> [Cons: Març 2016]
- [7] Pàgina web "VirutasF1, apartado diseño y funcionamiento de un túnel de viento"
<<http://virutasf1.com/2013/09/viru-diseno-y-funcionamiento-de-un-tunel-de-viento-2/>> [Cons: Març 2016]
- [8] Pàgina web "F1aldia, apartado túneles de viento"
<<http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>> [Cons: Març 2016]
- [9] Pàgina web "Wind tunnels of NASA" <<http://history.nasa.gov/SP-440/ch1-2.htm>>
[Cons: Abril 2016]
- [10] Pàgina web "Wright Brothers Organization" <http://www.wright-brothers.org/Information_Desk/Help_with_Homework/Wright_Photos/Wright_Photos.htm> [Cons: Abril 2016]
- [11] Publicació "El túnel de viento como herramienta de ensaño aerodinámico en la F1", Autor Isaac Prada y Nogueira, publicat al 2005
<https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1383> [Cons: Abril 2016]
- [12] Font pròpia proporcionada pel tutor del treball Enric Trilla Gay

- [13] Font pròpia elaborada amb el software *Catia v5* pel mateix autor
- [14] Font pròpia elaborada per l'autor (fotografies i captures de pantalla)
- [15] Imatges extretes del software *Ansys Fluent 17* pel mateix autor
- [16] Font d'elaboració pròpia, Microsoft Excel 2007
- [17] Llibre WHITE, F. (2004). "*Mecánica de Fluidos (traaducció, 5a Edició)*". Aravaca (Madrid): McGraw Hill [Cons: durant la major part del projecte]
- [18] Equació pròpia
- [19] Taula elaborada pel mateix autor

Referències en el text de la memòria:

- [20] PDF "Aerodinámica", Autor: Juan Zaitnik
<http://juanitnik1.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/4_aerodinamica.pdf
> [Cons: Març 2016]
- [21] DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS. *Diapositives de l'assignatura "Mecànica de Fluids" de l'ETSEIB* [Cons: Abril-Maig 2016]
- [22] Pàgina web "NASA Government", Windtunnel History,
<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>> [Cons: Abril 2016]
- [23] Pàgina web "hyperphysics" <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tables/soundv.html>> [Cons: Abril 2016]
- [24] Pàgina web "ETSEIB, apartat convenis de cooperació educativa"
<<http://www.etseib.upc.edu/ca/component/content/article/307/2851-practiques-en-empreses-per-empresa>> [Cons: Juny 2016]
- [25] Pàgina web "hardzone, apartado consumo de tu PC"
<<http://hardzone.es/2015/03/31/cuanto-cuesta-la-electricidad-que-consume-tu-pc/>>
[Cons: Juny 2016]
- [26] PDF del Ministeri d'indústria, energia i turisme, "factores de emisión de CO₂"
<http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documentos/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf> [Cons: Juny 2016]
- [27] Pàgina web del preu de l'electricitat a Espanya "comparador de luz"
<comparadorluz.com> [Cons: Juny 2016]

Vídeos i guies del software *Ansys Fluent 17*:

- [28] "Ansys Fluent Tutorial for beginners"
<<https://www.youtube.com/watch?v=Dfsp15bPWyl>> [Cons: Juliol 2016]
- [29] "Ansys workbench fluent tutorial: Laminar flow in a pipe"
<<https://www.youtube.com/watch?v=XOENPa-XyDE>> [Cons: Juliol 2016]
- [30] "ANSYS Fluent CFD Tutorial - Flow Over a Cylinder - Von Karman Animation"
<<https://www.youtube.com/watch?v=DXWO-X16Ulo>> [Cons: Juliol 2016]
- [31] "CFD tutorial on a 3D airfoil wing Fluent - ANSYS"
<<https://www.youtube.com/watch?v=gB33UcgKG3c>> [Cons: Juliol 2016]
- [32] "Flow over a sphere - tutorial using Ansys Fluent 14"
<<https://www.youtube.com/watch?v=8QgmO92AL70>> [Cons: Juliol 2016]
- [33] "ANSYS Fluent CFD | Fluid Flow in ANSYS Workbench | GRS |"
<<https://www.youtube.com/watch?v=kuEqISmyAos>> [Cons: Juliol 2016]
- [34] Pàgina web oficial d'*Ansys* <<http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>> [Cons: Juliol 2016]

Bibliografia Complementària:

- [35] Pàgina web "web del professor, apartado análisis dimensional"
<<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/hectr/AD.pdf>>
- [36] Article "the use of wind tunnel experiments for wind loads on structures"
<http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/asib/ws08_09/boundary_layer_windtunnel.pdf>
- [37] Llibre Fundamentos de Mecánica de Fluidos, Autors: Munson, Young & Okiishi, format electrònic (2014)

ANNEX

Annex 1: teorema π de Buckingham

Sigui:

m: variables homogènies; per exemple: diàmetre (D), velocitat (v), temperatura (T), longitud (L), pressió (P), ...

n: dimensions de referència: longitud [L], temps [t], massa [M], temperatura [T] ...

Llavors s'obtidran: (M-n) nombres adimensionals π

El procediment per obtenir aquests π grups adimensionals és:

- 1) Enumerar les variables que descriuen el problema. Normalment són dades ja que es requereix d'experiència i de coneixement del problema.
- 2) Seleccionar les dimensions de referència (n) que corresponen a les variables.
- 3) Descompondre les variables en les seves dimensions de manera tabulada. Per a això s'ordenen de més senzilles a més complexes i es desglossen en els exponents de les seves dimensions, tal com es mostra a la Taula# (s'agafa d'exemple el diàmetre i la velocitat):

Variable	Unitats	L	t	M
Diàmetre (D)	m	1	0	0
Velocitat (v)	m·s ⁻¹	1	-1	0

Taula13.1: descomposició de variables[19]

- 4) Triar les variables de referència segons:
 - a) Ha de ser igual a "n" variables de referència.
 - b) Entre totes han de contenir totes les dimensions.
 - c) Han de ser senzills i independents entre si.
- 5) Establir les equacions dimensionals i obtenir els nombre π . Per això es planteja el producte de les variables de referència amb cada variable restant. Després es desglossen en cada dimensió.
- 6) Finalment es verifiquen els números pi (π) obtinguts.

Annex 2: plànols

