Escola Politècnica Superior de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Disseny d'un túnel de vent en forma de U pel laboratori d'aeronàutica de l'EPSC

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTOR: Arnau Arnaiz Noguera

DIRECTOR: Daniel Crespo Artiaga

DATA: 23 de maig de 2006

Títol: Disseny d'un túnel de vent en U pel laboratori d'aeronàutica de l'EPSC

Autor: Arnau Arnaiz Noguera

Director: Daniel Crespo Artiaga

Data: 23 de maig de 2006

Resum

Per realitzar aquest treball ha estat necessari aprendre alguns coneixements sobre túnels de vent i fer servir els apresos durant la carrera sobre aerodinàmica. Seguint els requeriments imposats per la universitat, s'ha dissenyat un túnel de vent per ubicar-lo al laboratori d'aeronàutica de l'EPSC. Després del disseny preliminar, es va simular amb software CFD per trobar-ne les imperfeccions, corregir-les i arribar al disseny final.

Al TFC també s'inclouen els materials i les instruccions necessàries per a la construcció del túnel de manera que usuaris que no tinguin coneixement previs sobre el tema puguin construir-lo utilitzant només aquest projecte.

Title: Design of a U shape Wind Tunnel for the EPSC aeronautics laboratory.

Author: Arnau Arnaiz Noguera

Director: Daniel Crespo Artiaga

Date: May, 23rd 2006

Overview

In order to develop this project it was necessary to learn about wind tunnels and apply the knowledge of aerodynamics acquired during the studies at the EPSC. Considering the requirements prescribed by the university, the first step was designing a wind tunnel for the aeronautical laboratory of the EPSC. The second step was simulation of the preliminary design of the tunnel by using CFD software. The aim was to locate imperfections, correct them, and elaborate the final design.

In addition, the FDP includes necessary materials and instructions for the construction of the tunnel, in the manner that users without previous knowledge on the subject could build it by using only this project.

ÍNDEX

INTRODUCCIÓ 1

CAPÍTOL 1. NOCIONS D'AERODINÀMICA 3

1.1 Principis fonamentals 3

1.2 Les equacions de Navier-Stokes 4

1.3 Fluid incompressible 5

1.4 Altres equacions 5

1.5 Similituds realitat – model del túnel 6

1.6 Altres conceptes 7
1.6.1 La capa límit 7
1.6.2 Diàmetre hidràulic 8

CAPÍTOL 2. TÚNELS DE VENT 9

2.1 Funcionament bàsic 9

2.2 Tipus de Túnels de vent: circuit obert o tancat 9

2.3 Parts principals d'un túnel de vent 11

CAPÍTOL 3. MÈTODES NUMÈRICS: FLUENT I GAMBIT 19

3.1 Dinàmica de fluids computacional (CFD) 19

3.2 Software de creació de malles: GAMBIT 20
3.2.1 Creació de la geometria 20
3.2.2 Condicions de contorn i creació de la malla 21

3.3 Software CFD: FLUENT 22
3.3.1 Paràmetres a introduir 22
3.3.2 Processament del càlcul 23
3.3.3 Post-processat i Anàlisi dels resultats 24

CAPÍTOL 4. DISSENY DEL TÚNEL DE VENT PEL LABORATORI DE L'EPSC 27

4.1 Especificacions de l'escola 27

4.2 Primeres consideracions: 3 opcions, 3 túnels. 27

4.3 Disseny preliminar 28
4.3.1 Túnel de vent prim 29
4.3.2 Túnel de vent mitjà 30
4.3.3 Túnel de vent gruixut 30

4.4 Simulació en el software: Perfeccionament 31
4.4.1 Elecció de la mida de la malla 31
4.4.2 Primeres correccions: simulacions en 2D 32
4.4.3 Simulacions 3D 33

4.5 Anàlisi dels resultats de les simulacions 37
4.5.1 Túnel prim: 37
4.5.2 Túnel mitjà: 37
4.5.3 Túnel gruixut: 38

CAPÍTOL 5. CONSTRUCCIÓ DEL TÚNEL 39

5.1 Materials 39

5.2 Passos per la construcció 40

5.3 Pressupost 44

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS 49

CAPÍTOL 7. REFERÈNCIES 51

CAPÍTOL 8. ANEXES 52

INTRODUCCIÓ

Quan fa poc més d'un segle que els germans Wright van fer el seu primer vol en avió, ja s'han realitzat tota mena d'estudis sobre les propietats aerodinàmiques de l'aire. Tot i això, la complexitat de les equacions que descriuen el moviment dels fluids i la varietat de fenòmens físics que l'afecten impedeix predir el moviment d'una massa d'aire en qualsevol situació. És per això que en qualsevol estudi seriós sobre l'aerodinàmica d'un objecte, és necessari fer servir túnels de vent, per confirmar a la realitat el que s'ha provat a la teoria.

L'objectiu d'aquest treball és desenvolupar el projecte constructiu d'un túnel de vent per a que es pugui equipar en un futur al laboratori d'aeronàutica de l'Escola Politècnica Superior de Castelldefels (EPSC).

Un **túnel de vent** és una estructura en forma de tub a traves de la qual es fa circular vent, normalment propulsat per un o més ventiladors, que serveix per produir corrents d'aire amb certs paràmetres desitjats a través d'una secció concreta de l'estructura. Serveix per observar el comportament aerodinàmic al voltant d'objectes que es situen dins el túnel, normalment gràcies a aparells de mesura específics adaptats per a túnels de vent.

El projecte es desenvolupa d'acord amb les especificacions proporcionades per l'escola, atenent a les finalitats previstes en la seva utilització (docència i investigació) i a les limitacions d'espai del laboratori on s'haurà d'instal·lar: la velocitat de la cambra d'assaig (80 m/s), les mides d'aquesta (1m x 1m) i el nombre de Reynolds (10^7) –tots aquests conceptes s'expliquen al treball–.

Els primers tres capítols tracten sobre els coneixements teòrics necessaris per escometre el disseny del túnel de vent: fonaments d'aerodinàmica, tipus de tecnologies i dissenys de túnels de vent existents i finalment el software de simulació de fluids computacional CFD per a poder representar amb ordinador els possibles dissenys de túnel i veure'n les propietats.

Al capítol 4 s'explica tot el procés que he seguit per arribar als dissenys optimitzats, més a prop dels requisits marcats per l'escola i de manera que fos repetible a l'hora de construir-lo al laboratori de destí, amb les seves limitacions de forma i espai. El mètode a seguir ha sigut el de, a partir d'un disseny preliminar, anar optimitzant el túnel a través dels càlculs de propietats i rendiment corresponents, per representar-lo després amb el software. Al final del capítol s'arriba a l'elecció de tres geometries definitives, cadascuna amb la seva llista d'avantatges i inconvenients, com a tres opcions de dissenys diferents.

Finalment, al capítol 5 es presenta el projecte de construcció de les geometries seleccionades com a document per a la realització física del túnel de vent pel futur responsable de la construcció i instal·lació del túnel al laboratori. S'inclouen els procediments de construcció, els materials a fer servir, i els pressupostos tant d'aquests com de la mà d'obra necessària.

CAPÍTOL 1. NOCIONS D'AERODINÀMICA

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que s'ocupa del moviment relatiu entre cossos sòlids i fluids gasosos (normalment aire, per ser el gas present en l'atmosfera lliure terrestre) i de les propietats d'aquests últims. Aquestes propietats es descriuen definint **7 variables escalars per a cada molècula de fluid**, que són: les 3 components de la velocitat, la pressió estàtica, la densitat, la temperatura i el coeficient de viscositat.

Els estudis aerodinàmics solen ser molt complexes a causa de la gran quantitat de molècules d'aire presents en les masses d'aire que es solen tractar, totes elles movent-se lliurement. És per això que en el plantejament de qualsevol problema d'aquest tipus s'han d'intentar aplicar el major nombre possible de simplificacions adequades per a cada cas per reduir el volum de càlcul.

A continuació es presenten els principis fonamentals que assumeix l'aerodinàmica, i més endavant es van explicant les diferents simplificacions que es poden aplicar per casos concrets.

Per últim, cal dir que la gran majoria de la teoria explicada en aquest capítol s'ha extret del llibre *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (referència [1]), que ha estat la referència principal d'aquest treball.

1.1 Principis fonamentals

Les equacions que es fan servir per estudiar l'aerodinàmica en fluxos de baixa velocitat, com els tractats aquí, surten de tres principis fonamentals: **a.** La conservació de la massa (Eq. 1.1), **b.** La força i el moviment es regeixen per la segona llei de Newton (Eq. 1.2) i **c.** L'intercanvi d'energia segueix la primera llei de la termodinàmica.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \qquad \textbf{Eq. 1.1}$$

$$F = ma \qquad \textbf{Eq. 1.2}$$

En la majoria dels casos (i pels que aquí ens interessen) el canvi en la temperatura al llarg del túnel de vent és molt petit i per tant aquesta es manté constant. En aquestes condicions es pot ometre l'equació de l'energia. Només es farà servir més endavant per comprovar que si es fa servir la diferència en la solució és negligible.

1.2 Les equacions de Navier-Stokes

L'equació 1.2 pot desenvolupar-se en els dos tipus de forces que actuen en fluid: la força externa aplicada al fluid per unitat de massa (F_b) i la força en superfície per unitat de volum (F_s), de manera que arribem a l'Eq. 1.3. Les forces externes són les que actuen des de l'exterior a totes les molècules del cos per igual, es per això que també s'anomenen forces màssiques o volumètriques, o també de llarg abast. La més coneguda és la força de la gravetat. L'altre tipus de forces són les forces de superfície (F_s), que són el resultat de la interacció entre molècules i que per tant depenen directament de la viscositat del fluid i de la pressió en la que es troba aquest; per això també s'anomenen forces de curt abast.

$$\rho\left(\frac{DV}{Dt}\right) = \rho F_B + F_S \qquad \textbf{Eq. 1.3}$$

El terme esquerre de l'equació conté la derivada total de la velocitat de l'element, tot respecte un sistema de referència inercial, que pot ser escrita com a l'Eq. 1.4, on es divideix la derivada total en la derivada de la velocitat respecte del temps (serà zero en el cas estacionari) i la part en que es tenen en compte les forces inercials del fluid, també anomenades convectives. En aquest punt cal remarcar que s'assumeix que existeix **continuïtat** dins del fluid, és a dir que l'espai que hi ha entre les molècules és molt petit en relació a la mida del volum de fluid a tractar.

$$\rho\left(\frac{DV}{Dt}\right) = \rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V\cdot\nabla)V\right) \qquad \textbf{Eq. 1.4}$$

Com ja s'ha dit, la força externa típica que s'aplica al cos en els nostres casos és la gravitacional (F_b=g). Com que el fluid a tractar en l'aplicació que estem considerant és l'aire, aquesta pot negligir-se per la seva baixa densitat.

La força en superfície per unitat de volum actua a través de la relació tensió – deformació, diferent per a cada material, que no s'explicarà aquí però que es pot consultar a [1]. La relació teòrica corresponent més adequada per a l'aerodinàmica ve donada per la *llei de la fricció de Stokes* que diu que "la tensió es proporcional a derivada temporal de la deformació".

L'equació que resulta de substituir F_b i F_s a l'Eq. 1.4 és **l'equació de Navier-Stokes general**:

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V\cdot\nabla)V\right) = \rho g - \nabla\left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot V\right) + 2\nabla\cdot\left(\mu\dot{S}\right) \qquad \textbf{Eq. 1.5}$$

Aquesta equació descriu el moviment en funció de la pressió (p), la densitat (ρ) i la viscositat d'un fluid (μ), quan es tracta d'un fluid viscós compressible amb la força gravitacional (g) com a força externa sobre el cos. $\dot{S}$ representa la matriu de deformació.

1.3 Fluid incompressible

Considerant fluxos de baixa velocitat, es molt comú considerar que la densitat del fluid és constant, i que per tant el fluid és incompressible. Això fa que l'Eq. 1.1 quedi molt simple (Eq. 1.6).

$$\nabla \cdot V = 0$$ **Eq. 1.6**

Si l'Eq. 1.5 es fa servir per un fluid ideal, es a dir, que la viscositat és igual a zero i es troba en estat estacionari prou lluny de qualsevol objecte per tenir un camp de velocitats uniforme, aleshores ens queda l'**equació de Bernoulli clàssica** (Eq. 1.7), que és molt important en el tractament de túnels de vent perquè és la referència principal per la relació entre la velocitat i la pressió en un punt, per a càlculs preliminars.

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_{total}$$ **Eq. 1.7**

1.4 Altres equacions

Amb les Eq. 1.1 i Eq. 1.5, s'obté un sistema de 4 equacions, però com s'ha dit al principi del capítol, hi ha 7 variables a resoldre, de manera que ens falten 3 equacions. Però com ja hem dit, la temperatura la considerem constant. A més, la viscositat depèn gairebé només de la temperatura; tot i que depèn molt poc de la pressió, per un rang de temperatures bastant gran (170K a 500K) es pot fer servir l'aproximació de Sutherland, segons el document Report 1135 del National Advisory Commitee for Aeonautics (NACA) (referència [3]).

Així només queden 5 variables, de manera que encara falta una altra equació. Aquesta es l'equació del gas perfecte per l'aire. Aquesta (Eq. 1.8) dona una bona descripció de l'aire en el rang de condicions aquí tractades.

$$p = \rho R T$$ **Eq. 1.8**

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.76}$$ **Eq. 1.9**

A les equacions anteriors R és la constant de gas de l'aire (R=287.05J/Kg·K), i μ_0 i T_0 són els valors de la viscositat i la temperatura estàndards a nivell del mar (μ_0 = 1.73 e-5 N·s/m^2 i T_0 = 288.15K). Si el gas amb el que es treballa no és l'aire, es fa servir l'equació universal dels gasos perfectes (Eq. 1.10), on R_0 és la constant universal dels gasos (8.32 J/mol·K) i M és el pes molecular aparent del gas.

$$p = \frac{\rho R_0 T}{M}$$ **Eq. 1.10**

1.5 Similituds realitat – model del túnel

Com en la majoria dels túnels de vent, l'activitat principal que es desenvoluparà en el present túnel serà la de provar l'aerodinàmica de maquetes per a obtenir resultats fiables aplicables a l'objecte de mida real. Per a que aquestes proves siguin vàlides s'ha de complir l'anomenat principi de la similitud aerodinàmica: "si dos fenòmens físics responen a una mateixa formulació, la solució que valgui per un, serà vàlida per l'altre". En el nostre cas, aquesta similitud es complirà si es compleixen dos requisits: **similitud geomètrica** (el model representi fidelment la realitat en tots aquells detalls que siguin aerodinàmicament rellevants) i similitud física, (el comportament del fluid a escala és equivalent al que s'observa a escala real). Aquest darrer es pot comprovar a partir de la determinació dels nombres adimensionals corresponents als fenòmens físics que succeeixen al túnel. En el cas d'un túnel de vent aquests son: el nombre de **Reynolds**, el nombre de **Mach** i el nombre de **Froude**. Per explicar-los i entendre quina importància tenen, cal aproximar-nos al problema des del principi...

Quan un cos es mou a través del fluid apareixen tres forces que són degudes a la viscositat del fluid: la inercial, la elàstica i la viscosa. Com s'ha explicat al punt 1.2, cadascuna d'aquestes forces esta representada a l'equació de Navier-Stokes. A continuació hi ha una descripció de les tres forces mencionades i la força de la gravetat. Cal observar que la massa de l'element de volum és $\rho \cdot l^3$, producte de la densitat pel volum (en general aquest volum es pot considerar com el cub d'una longitud de referència).

La força inercial, corresponent al costat esquerra de l'equació, es proporcional a la massa d'aire afectada i a l'acceleració donada a aquesta massa:

$$\textbf{Força inercial } (F_i) \sim \frac{\rho l^3 V}{t} \sim \frac{\rho l^3 V}{l/V} \sim \rho l^2 V^2 \qquad \textbf{Eq. 1.11}$$

La força viscosa, segons la seva definició en sí mateixa:

$$\textbf{Força viscosa } (F_v) \sim \mu V l \qquad \textbf{Eq. 1.12}$$

La força elàstica ve donada pel producte de la pressió per l'àrea de referència $p \cdot l^2$, però si tenim en compte que la velocitat del so c és proporcional a l'arrel de p/ρ, aleshores obtenim:

$$\textbf{Força elàstica } (F_e) \sim p l^2 \sim \rho c^2 l^2 \qquad \textbf{Eq. 1.13}$$

Finalment, la força gravitatòria (o pes) és el producte de la massa per l'acceleració de la gravetat g:

$$\textbf{Força gravitacional } (F_g) \sim \rho l^3 g \qquad \textbf{Eq. 1.14}$$

Dividint la força inercial per cadascuna de les altres dona com a resultat els tres coeficients adimensionals que estem buscant: nombre de Reynolds (Re), nombre de Mach (M) i nombre de Froude (Fr).

$$\boxed{\mathrm{Re} = \frac{Fi}{Fv} = \frac{\rho V l}{\mu}} \qquad \textbf{Eq. 1.15}$$

$$\boxed{M = \frac{Fi}{Fe} = \frac{V}{c}} \qquad \textbf{Eq. 1.16}$$

$$\boxed{Fr = \sqrt{\frac{Fi}{Fg}} = \sqrt{\frac{V^2}{\lg}}} \qquad \textbf{Eq. 1.17}$$

El nombre de Froude és important per aquells experiments als quals el model està en moviment ([1]). Tot i que poden ser molt importants, són una minoria dels experiments que es realitzen en els túnels de vent.

Per proves on el model estigui quiet, els nombres de Reynolds i de Mach són els més importants per la similitud model - realitat. Si un model té els mateixos nombres de Reynolds i Mach que l'objecte real, els fluxos en els dos casos seran dinàmicament similars. Les funcions adimensionals de la velocitat, el coeficient de pressió, la densitat, la viscositat, i la temperatura seran les mateixes pel model i per l'objecte a escala completa.

A més, les forces experimentades pel model dins el túnel estant directament relacionades amb el model a escala real pel coeficient $\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 l^2$, els valors del qual corresponen a l'objecte a escala real. A la vegada, els moments poden relacionar-se amb el mateix coeficient multiplicat per l^3: $\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 l^3$.

Com s'ha indicat, tant el nombre de Reynolds com el nombre de Mach són importants per les similituds entre el model i l'objecte a escala completa. Així, l'ideal seria que es poguessin igualar els dos nombres a tots els experiments, però a la pràctica sempre és difícil aconseguir-ho. Per això cal dir que quan ens trobem a la regió de baixa velocitat en la que ens trobem, és més important el nombre de Reynolds que el nombre de Mach. Per això s'estudiarà únicament el primer.

1.6 Altres conceptes

1.6.1 La capa límit

Quan un fluid circula al costat d'una superfície en repòs, el fluid que es troba just arran d'aquesta està completament aturat. Evidentment, a més distància de

la superfície el fluid va més ràpid fins estar a un punt prou allunyat perquè l'efecte de la paret sigui despreciable. La zona que es troba entre aquest punt i la superfície és la capa límit.

Aquest concepte és molt important pels dissenyadors de túnels de vent. Aquests han de buscar que la capa límit es mantingui el més prima i enganxada possible a les parets del túnel. Qualsevol separació de la capa significa zones on el fluid es troba més aturat del que hauria d'estar o zones de turbulència; aquestes dues situacions seran pèrdues innecessàries, energia perduda i per tant ineficàcia del túnel.

Tractant de la capa límit, es fonamental saber que la capa límit tendeix a mantenir-se laminar i enganxada si el fluid va en direcció a la caiguda de la pressió estàtica. Pel contrari, si el fluid es dirigeix cap a augmentar la pressió estàtica, la capa límit tendirà a separar-se.

1.6.2 Diàmetre hidràulic

Un paràmetre que es fa servir sovint quan es tracten fluxos confinats en conductes és el diàmetre hidràulic. És l'equivalent al diàmetre per formes que no siguin circulars, normalment referit a seccions de conductes. Es defineix com el quocient de l'àrea de la secció transversal i el perímetre d'aquesta multiplicat per 4 (Eq. 1.18).

$$D_h = \frac{4A}{per.} \qquad \textbf{Eq. 1.18}$$

Com es veurà més endavant, aquest paràmetre tant fàcil de calcular és molt útil per comparar diferents formes de conductes. A continuació es poden veure els diàmetres hidràulics d'un rectangle (Eq. 1.20), i d'un cercle (Eq. 1.19) que coincideix amb el seu diàmetre. En la segona, es pot veure com en el cas específic d'una secció quadrada el diàmetre hidràulic tindria el valor del costat.

$$D_h = \frac{4\pi r^2}{2\pi r} = 2r = D \qquad \textbf{Eq. 1.19}$$

$$D = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} \qquad \textbf{Eq. 1.20}$$

CAPÍTOL 2. TÚNELS DE VENT

2.1 Funcionament bàsic

Com s'ha indicat a la introducció, un túnel de vent consisteix en una estructura en forma de tub que serveix per conduir aire a través de ella i observar-ne el comportament en un punt determinat, que és la secció d'assaig. Tot el túnel estarà construït, doncs, per complir **dos objectius**: 1. reunir les condicions desitjades de flux d'aire a la secció d'assaig i 2. fer circular l'aire a través de tot el túnel de la manera més eficient possible (evitar separacions de la capa límit, minimitzar les turbulències i minimitzar les pèrdues per fregament)

El procediment que segueixen la gran majoria de túnels de vent es basa en dos conceptes principals:

1. L'aire entra dins d'una **contracció** que es troba just abans de la secció d'assaig, de manera que en disminuir l'àrea ràpidament augmenti la velocitat de manera eficient.
2. Després de passar a través de la cambra d'assaig, s'ha de tornar a augmentar l'àrea per arribar a la mida del ventilador, a través d'un **difusor**. Aquest pas no es pot fer bruscament perquè l'aire ha d'expandir-se i reduir la seva velocitat de manera gradual si no es vol causar separació de la capa límit.

2.2 Tipus de Túnels de vent: circuit obert o tancat.

La primera decisió que ha de prendre un enginyer a l'hora de dissenyar un túnel de vent és si el túnel serà de circuit obert o tancat. Els túnels oberts (*Figura 2.1*) són els que agafen aire de l'exterior per fer-lo circular a través del túnel per després expulsar-lo i així contínuament mentre estant en funcionament. Els túnels tancats (*Figura 2.2*) , en canvi, fan circular l'aire a través d'un circuit tancat, de manera que sempre fan servir el mateix aire. Tot i que en la majoria dels casos els túnels de vent tancats fan servir un únic circuit per fer circular l'aire, també se n'han dissenyat que en fan servir més d'un.

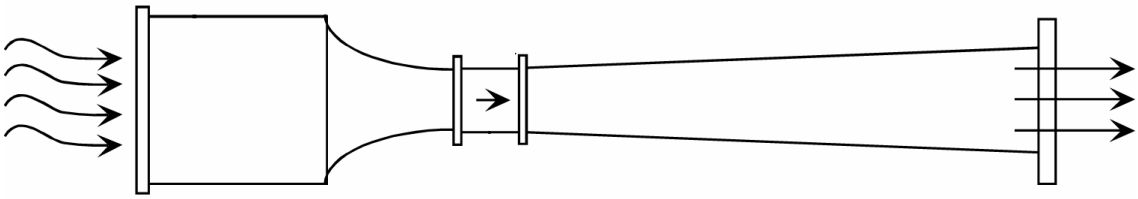


Figura 2.1: Esquema clàssic d'un túnel de vent de circuit obert

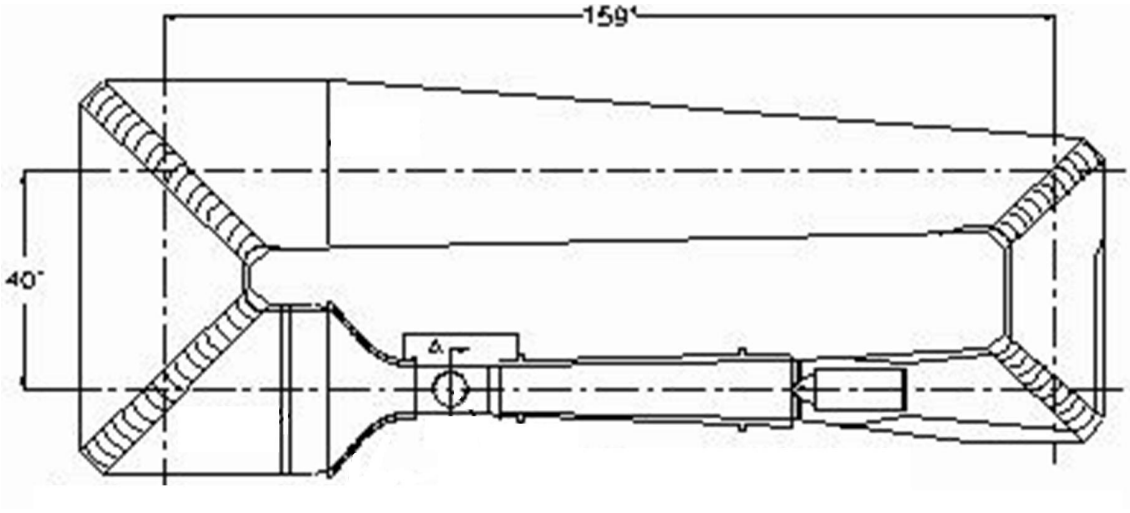


Figura 2.2: Vista en planta del túnel de vent tancat Oran W. Nicks de la universitat A&M de Texas, EUA (mides en peus)

Cadascun té els seus avantatges i inconvenients, que s'enumeren a continuació:

Túnels de vent de circuit obert

Avantatges:

a. El cost de construcció normalment és menor.
b. Si es vol fer circular fum (proves de motors, visualitzacions amb fum), no hi ha problema a l'hora de purgar-lo.

Desavantatges:

a. Necessita més potència que el circuit tancat, ja que aquest ha d'accelerar masses d'aire noves constantment, mentre que el tancat un cop funcionant només n'ha de compensar les pèrdues de potència per mantenir la velocitat.
b. Són sorollosos i dins d'una habitació causen molt de vent.
c. Com que agafen l'aire de l'exterior, necessiten tractament de la turbulència a causa de que l'estat de l'aire a l'entrada no està definit.

Túnels de vent de circuit tancat

Avantatges:

a. La qualitat del flux pot controlar-se molt bé gràcies a pantalles de turbulència, bresques, i deflectors de gir.
b. Necessiten menys energia per funcionar, ja que només han d'accelerar el flux al principi de cada sessió i després la potència consumida s'empra només en compensar les pèrdues per fregament.

c. Fan menys soroll.

Desavantatges:

a. El cost inicial és major, per culpa dels tubs de retorn i els deflectors de gir.
b. Si s'hi fa servir fum a dins, hi ha d'haver una manera de purgar-lo.

Deixant al marge la qualitat del flux, que dependrà de la bondat del disseny, si no tenim en compte la molèstia que provoca cada tipus, els túnels oberts són els més adequats per llocs on no es faran servir amb molta freqüència –com escoles o universitats- ja que el cost d'operació és més elevant però el cost de construcció és substancialment inferior.

2.3 Parts principals d'un túnel de vent

Un túnel de vent es composa de diversos elements. Alguns son indispensables, com el ventilador que genera el moviment de l'aire, i d'altres que son opcionals. Són les característiques en les que l'enginyer s'ha de fixar per escollir com les introduirà al seu cas en particular. A la *Figura 2.3* hi ha l'esquema d'un túnel tancat on es senyalen els elements més importants, que s'expliquen seguidament. Els túnels oberts tenen en general menys elements.

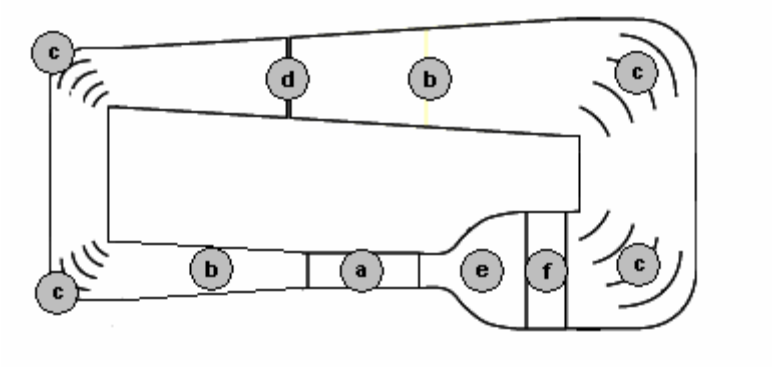


Figura 2.3: Parts principals d'un túnel de vent: a) secció d'assaig; b) difusors; c) girs amb deflectors de gir; d) ventilador; e) con de contracció; f) pantalles i bresques

a.- Secció d'assaig

És la zona on es realitzen les proves aerodinàmiques, per això és el lloc on es requereix un flux més uniforme en la majoria de túnels de vent (alguns túnels tenen per objectiu simular turbulència).

Al llarg dels anys s'han provat diverses formes per la secció d'assaig amb l'objectiu de reduir-ne la turbulència, però el més comú és posar-ne el costats plans per facilitar el posicionament de les maquetes o objectes per estudiar. Per facilitar-ne la construcció, amb un terra pla, el més fàcil és fer la secció quadrada, tot i que aquesta forma té les quatre cantonades a les quals, per

evitar-hi problemes de flux és bo omplir-les deixant costats de 45º per evitar la separació de la capa límit.

A mesura que avança a través de la secció d'assaig, la capa límit es va engruixint, de manera que fa que al pressió estàtica vagi augmentant a causa de que l'àrea efectiva per la que avança l'aire disminueix. Per poder mantenir la pressió constant al llarg de la secció, doncs, cal que la secció d'assaig tingui un petit angle d'eixamplament, que sol ser de 0.5º o 1º com a molt per costat.

Una qüestió pràctica sobre la secció d'assaig és fer-ne les parets (a ser possible també el terra i el sostre) transparents, per poder veure el que passa a dins durant les proves. Si es preveu instal·lar-hi instruments de mesura en un futur, s'ha de tenir en compte quan es pensin les dimensions i forma d'aquesta secció. A més, és important que una de les parets sigui alguna mena de comporta fàcil d'obrir i tancar per facilitar el canvi i control dels models que s'hi introdueixin.

Com que és encertat afirmar que la cambra d'assaig és la zona "útil" del túnel, és aquí on es sol mesurar el rendiment del túnel; la derivada de l'energia cinètica dins la cambra d'assaig dóna una idea de la seva potència. La potència del ventilador ve donada pel producte del salt de pressió i el cabal volumètric. Així doncs el quocient d'aquestes dues potències serà el rendiment del túnel (Eq. 2.1).

$$\eta = \frac{\dot{W}_{vent.}}{\dot{E}c_{c.a.}} = \frac{\Delta P \cdot A \cdot v_{vent.}}{\frac{1}{2}\dot{m} \cdot v_{c.a.}{}^{2}} \qquad \textbf{Eq. 2.1}$$

b.- Difusor

Com que els pèrdues al llarg d'un túnel s'estimen proporcionals al cub de la velocitat, després de la cambra d'assaig s'intenta frenar l'aire el més possible. El difusor és la part encarregada de que l'aire que surt de la secció d'assaig vagi reduint la seva velocitat augmentant lentament l'àrea del conducte pel que circula. És un pas que s'ha de fer molt regularment per evitar la separació de la cap límit, ja que això tendeix a succeir perquè si la velocitat disminueix, augmenta la pressió estàtica.

El que es pretén és, doncs, evitar pèrdues de fregament de l'aire alhora de no permetre la separació. Per tant, en cada cas s'ha d'arribar a un difusor que redueixi la velocitat de l'aire amb el mínim de distància. La bona actuació del difusor serà clau per l'eficiència del túnel i s'ha de parar molta atenció a l'hora de la seva construcció per evitar qualsevol irregularitat que podria causar separació i la conseqüent turbulència.

Per caracteritzar els difusors s'utilitzen dos paràmetres: la relació d'àrees d'entrada i sortida i l'angle cònic d'expansió. Aquest últim es calcula fent servir l'equivalent a un difusor cònic, per tant s'utilitza el diàmetre hidràulic:

$$\theta = arctg\left(\frac{R_2 - R_1}{l}\right) \qquad \textbf{Eq. 2.2}$$

On R2 i R1 són les meitats dels diàmetres hidràulics de l'entrada i la sortida del difusor, que es podrien anomenar "radis hidràulics" i l la longitud d'aquest.

Un estudi realitzat pels autors del *Low-Speed Wind Tunnel Testing* [1] revela que els valors més usuals que es fan servir per difusors són una relació d'àrees de 3 amb un radi de 3º. Per relacions d'àrees majors (difusors més llargs), la separació es fa cada cop més probable. Altres fonts [4] diuen que el valor màxim de l'angle d'un difusor sense separació és de 7º. Al final aquest valors varien respecte cada cas, tot i que com es podrà veure més endavant, la separació de la capa límit es produeix fàcilment.

De vegades, ja sigui per falta d'espai o per requeriments de disseny, els difusors no poden tenir expansions tant suaus com es voldria i s'ha de fer servir **difusors d'angle ample.** Aquests arriben a tenir obertures molt per sobre dels 7º i provoquen la separació de manera segura. Per evitar-la, en aquests casos la única solució és fer servir pantalles anti-turbulència. La Figura 2.4 mostra un gràfic que determina el nombre de pantalles necessàries en funció de l'angle d'expansió i la relació d'àrees. Les pantalles s'haurien de col·locar als llocs on s'observés que es produeix la separació.

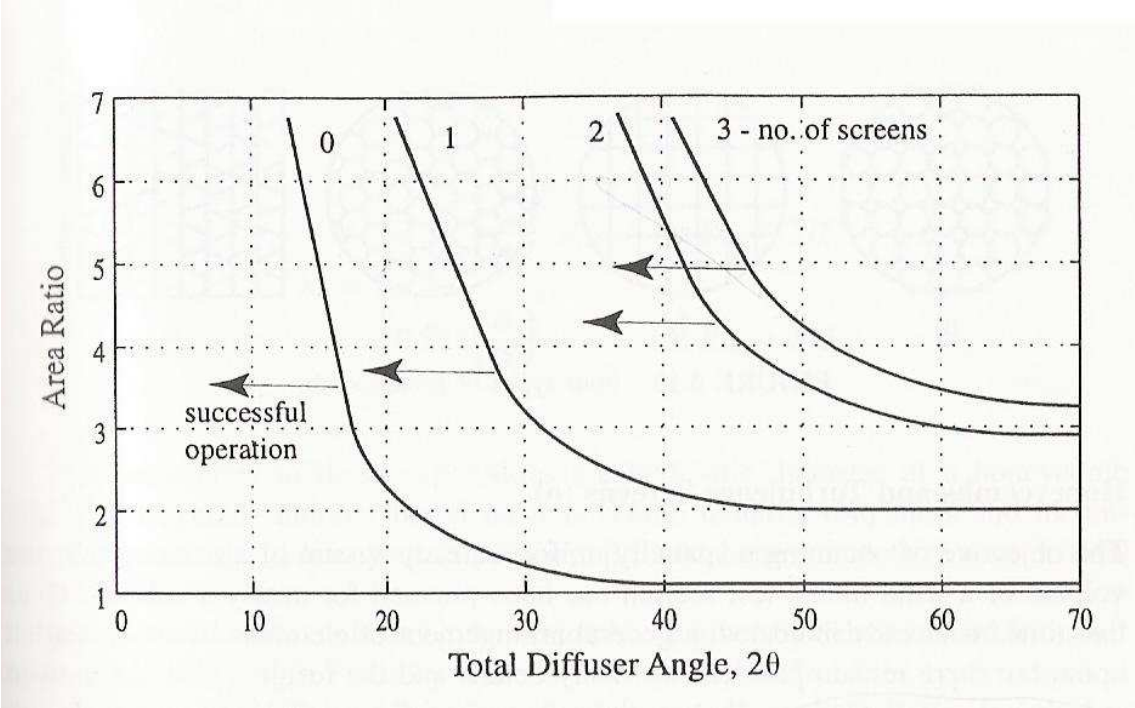


Figura 2.4: Nombre de pantalles anti-turbulència necessàries en un difusor [1].

c.- Girs

És fonamental per als girs de conductes d'aire que es vulguin fer eficients posar deflectors de gir(en anglès *turning vanes*) per conduir l'aire a través del gir evitant la turbulència. En el *Low-Speed Wind Tunnel Testing* hi ha un estudi molt extens sobre la manera de dissenyar els deflectors de gir, però aquí es

seguiran unes pautes més senzilles per portar menys pes al pressupost final de construcció.

Per a decidir el nombre de deflectors a fer servir es pot fer servir la Eq. 2.3 que té en compte el coeficient de sustentació produïda pels deflectors (C_L), la manera com el vector velocitat de l'aire al passar a través d'ells ($\Delta v/v_i$), la mida del conducte (w) i la corda de cada deflector (c).

$$n = \frac{2}{C_L}\frac{\Delta v}{v_i}\frac{w}{c} - 1 \qquad \textbf{Eq. 2.3}$$

L'equació anterior, però, requereix certs valors que demanen gran quantitat d'informació per ser calculats, així com certs resultats de prova dels mateixos deflectors, de manera que el mateix estudi [2] dona una simplificació (Eq. 2.4) de l'anterior, per un angle de gir de 90º amb deflectors de gir que siguin arcs de circumferència i coeficient de sustentació d'aquests C_L=0,8, per deflectors prims (r és el radi dels deflectors).

$$n = \frac{2{,}5}{r/w} - 1 \qquad \textbf{Eq. 2.4}$$

Aquesta és la que es farà servir en els dissenys dels túnels de vent d'aquest projecte, ja que sempre es faran servir deflectors prims d'arc de circumferència i girs de 90º.

d.- Ventilador/s

Els ventiladors són els motors dels túnels de vent. Com en el cas dels avions o dels helicòpters, els perfils de les aspes dels ventiladors tenen una forma i estant disposats d'una manera, que en moure's a través de l'aire creen una diferència de pressió entre els seus costats, de manera que l'aire que es troba al costat de més pressió se'n va cap al costat que n'hi ha menys. Aquesta és una explicació molt senzilla, però el principi de la sustentació es pot consultar a qualsevol a llibre d'aerodinàmica, un bon exemple és el de John . Anderson Jr. [6].

Com en el cas dels deflectors, al *Low-Speed Wind Tunnel Testing* [1] està estudiat àmpliament el disseny dels ventiladors, però, una vegada més per raons de pressupost, aquí es faran servir models de ventilador que ja es trobin al mercat. Encara que no compleixin exactament tots els requisits del túnel de vent dissenyat, n'hi ha que s'hi apropen molt, ja que hi ha un ventall de models amplíssim.

Com que els ventiladors s'han de col·locar dins els conductes dels propis túnels i ocupar-ne tota l'àrea, la secció del túnel allà on es trobi el ventilador haurà de ser circular, de manera que en alguns casos s'haurà de fer el traspàs de rectangular a circular.

La informació més essencial sobre els ventiladors és la **corba característica** realitzada pel fabricant, on s'indica el cabal proporcionat pel ventilador en

funció del salt de pressió. A l'ANNEX 1 es proporciona la del ventilador escollit per aquest projecte. Com es pot veure, amb un salt de pressió major, s'aconsegueix un cabal menor. Aquest fenomen es conseqüència del principi de conservació de l'energia; en fer passar l'aire a través del ventilador li comuniquem més energia com més gran és el salt de pressió. En ser l'energia aportada pel ventilador al flux constant aproximadament igual al consum energètic del ventilador, en augmentar el salt de pressió el cabal màssic forçosament ha de disminuir.

e.- Con de contracció o Tovera

El con de contracció o tovera està situada davant la cambra d'assaig, i hi fa entrar el flux accelerant-lo a base de reduir l'àrea del conducte. La relació d'àrees pot arribar a ser de 20 o més, tot i que els valors típics es troben entre 6 i 10. Segons la conservació de la massa, la relació d'àrees serà igual a la relació de velocitats, ja que el flux màssic s'ha de conservar.

Quant a la generació de turbulència a la tovera, s'han de tenir en compte dues coses importants: la primera es que en seccions quadrades la reducció dels costats podria provocar interferència entre les capes límit de cadascun, cosa que es pot solucionar omplint les cantonades amb costats addicionals a 45º, fent un octògon; la segona es que en augmentar la velocitat, la pressió estàtica disminueix, afavorint la no separació de la capa límit, de manera que per aquest costat no cal tenir especial preocupació amb aquest fet.

Al llarg del temps s'han fet molts estudis sobre com dissenyar una bona tovera, amb conclusions diverses. En resum, una tovera ha de reduir l'àrea en una distància similar al diàmetre hidràulic de l'entrada. A més, és especialment important que el flux que entra a la contracció sigui paral·lel per dues raons: 1a: la contracció accentuaria la turbulència del fluid provocant més pèrdues i 2a: aquest fluid va directe a la cambra d'assaig, allà on més importa un fluid laminar. Per reduir, doncs, la turbulència a l'entrada de la tovera, algunes vegades es col·loquen pantalles anti-turbulència o ruscs, que s'expliquen al punt següent.

Per últim, tot i que es poden fer servir diverses de formes per la tovera, les dues més usuals són la dos arcs de circumferència tangents (Figura 2.5), o la de una corba que va disminuint el seu radi a mesura que avança la tovera, com la que es mostra a la *Figura 2.1*.

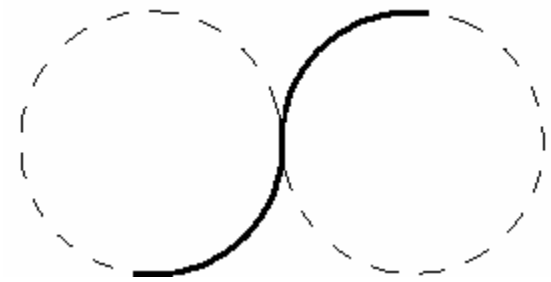


Figura 2.5: Forma de tovera de circumferències tangents

f.- Pantalles i ruscs

Com es menciona als apartats b i e, la solució per aconseguir un **flux uniforme i/o laminar** són les pantalles i els ruscs o reixes de panal, respectivament. Aquestes dues no són parts del túnel obligatòries, sinó que es fan servir quan per raons de disseny no hi ha cap altra alternativa per regular el fluid o quan es requereix un flux de molt alta qualitat. Tot i això s'ha de tenir en compte que la presència de qualsevol obstrucció dins del fluid, com són les pantalles i els ruscs representa una pèrdua de càrrega important que disminuirà el rendiment general del túnel.

Al paràgraf anterior es fa referència a dos requeriments diferents: 1. aconseguir un perfil de velocitats uniforme, és a dir que la velocitat sigui similar en tota la secció del conducte, i 2. reduir la turbulència, que vol dir minimitzar les components transversals de la velocitat per aconseguir que el flux segueixi paral·lel a les parets del tub, arribant així al major rendiment.

Les **pantalles** són conjunts de filaments col·locats en forma de xarxa col·locats perpendicularment a les parets del túnel. Com que la resistència que presenta un fil dins d'un fluid és aproximadament proporcional al quadrat de la seva velocitat, a les zones on el fluid vagi més ràpid es presentarà més resistència, mentre que a les zones on vagi més lent se'n presentarà menys (Figura 2.6), aconseguint així un perfil més uniforme (Figura 2.7).

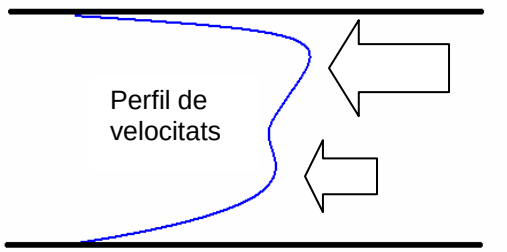


Figura 2.6: Perfil de velocitats dins d'un conducte. Les fletxes representen les resistències aerodinàmiques quan l'aire passa a través d'una pantalla, més grans allà la velocitat és més gran.

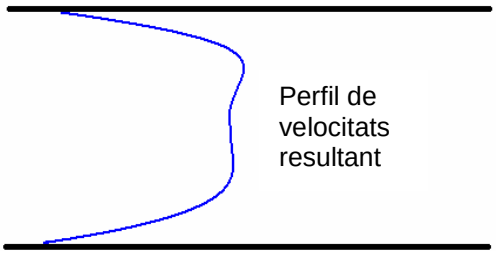


Figura 2.7: Perfil de velocitats després de travessar una pantalla.

Els ruscs són dispositius de guiatge destinats a amortir la component de la velocitat perpendicular a la direcció del flux que s'hagi pogut produir com a conseqüència de la turbulència. Per caracteritzar-los es fa servir la relació entre la seva profunditat i el seu diàmetre hidràulic. Els valors típics d'aquesta relació solen trobar-se entre 6 i 8. A la Figura 2.8 es mostren algunes formes típiques de reixa de panal.

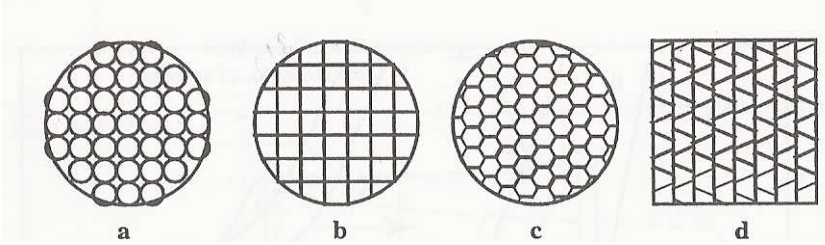


Figura 2.8: formes típiques de ruscs [1].

CAPÍTOL 3. MÈTODES NUMÈRICS: FLUENT I GAMBIT

3.1 Dinàmica de fluids computacional (CFD)

Com ja s'ha dit, l'eina més important de que es disposa avui dia per a comprovar les actuacions dels diferents disseny de túnels de vent és la dinàmica de fluids computacional (CFD). Segons la definició de l'enciclopèdia digital [5], aquesta és una branca de la mecànica de fluids que fa servir mètodes numèrics per resoldre i analitzar problemes de fluxos de fluids, utilitzant una discretització de l'espai. Aquesta discretització es fa per reduir la càrrega de treball aplicant el càlcul en punts separats per distàncies "prou petites", sense arribar a resoldre les equacions molècula a molècula, com hauria de ser per obtenir una solució perfecta.

Hi ha diverses estratègies per fer aquesta discretització. En problemes amb molta simetria es poden calcular les variables que defineixen l'estat del fluid (pressió, velocitat, temperatura si s'escau) en una sèrie de punts en l'espai que es consideren representatius dels volums de fluid que els envolten. Aquest mètode és conegut com de "diferències finites", i per que doni una bona descripció del flux cal que els volums estudiats siguin semblants. Llavors és possible determinar les variables d'interès i les seves derivades amb prou precisió. En problemes reals, però, sovint les formes son complexes i no és possible aconseguir una distribució de punts que satisfaci aquestes condicions. L'alternativa en aquests casos és el mètode dels elements finits, on l'espai es divideix en volums adjacents de formes arbitràries, i enlloc d'escriure les equacions sobre els valors de les variables d'interès i les seves derivades el que es fa és escriure les equacions dels fluxos a través de les parets d'aquests elements de volum i comprovar que es satisfacin les condicions de conservació de la massa, moment i energia a tot arreu.

És per culpa d'aquesta discretització que les solucions trobades amb CFD sempre són aproximacions, no es poden considerar exactes i, en aplicacions reals, s'han d'acabar de comprovar experimentalment. Tot i això, en la majoria dels casos, si el càlcul es fa amb prou resolució espacial la solució serà força aproximada.

Els problemes de mecànica de fluids poden ser independents o dependents del temps, anomenant-se respectivament estacionaris i no-estacionaris. La resolució dels problemes no-estacionaris és molt més complexa, i en enginyeria acostumen a estudiar-se prioritàriament els problemes estacionaris, que corresponen al funcionament dels sistemes quan els paràmetres d'operació es mantenen constants.

L'estudi d'un problema de CFD pel mètode dels elements finits segueix el següent procés:

a. La discretització del volum on es vol determinar el flux. El conjunt de punts resultant s'anomena **malla de punts**. En el cas d'aquest projecte, per fer-ho es farà servir el software GAMBIT.

b. L'especificació de les **condicions d'operació** i les **condicions de contorn** en les que es troba el fluid.
c. El càlcul de la solució. En un problema estacionari es resolen iterativament les equacions corresponents per a cada punt de la malla i a cada pas es calcula el error total de les equacions de continuïtat, conservació de l'energia i conservació del moment. El càlcul es finalitza quan l'error comès és inferior a una cota establerta prèviament. Aleshores es considera que el fluid ha arribat a l'estat estacionari i es diu que la solució ha **convergit**. En els problemes no-estacionaris un cop obtingut l'estat estacionari corresponent a un cert instant de temps s'incrementa el temps en un interval petit, es calculen les noves condicions de contorn i es calcula la nova solució emprant com a solució de partida la solució obtinguda en el instant anterior. Això implica, com es pot suposar, un cost en temps de càlcul molt més elevat.
d. Post-processat dels resultats. Per aquest pas i l'anterior aquí es farà servir el software FLUENT, que permet observar els valors de les diferents propietats del fluid a través de gràfics, dibuixos i taules.

3.2 Software de creació de malles: GAMBIT

GAMBIT és el software de creació de malles per a la posterior utilització d'aquestes en FLUENT. Presenta una interfície dividida en tres parts: una per la construcció de la geometria (de tipus dissenyador, com ara AutoCad o Catia), una per la construcció de la malla i una altra que ofereix diverses eines per l'especificació de les condicions de contorn de la geometria. A l'Annex hi ha un compendi de trucs i solucions per als problemes més típics que els usuaris solen trobar-se treballant amb aquest programa.

3.2.1 Creació de la geometria

El que es vol aconseguir amb el GAMBIT és dividir en espais més petits (discretitzar) la zona per la que es desplaçarà el fluid, de manera que la geometria no ha de ser res més que el lloc on podrà existir fluid. En el cas d'un túnel de vent, el que s'ha de dibuixar és el volum interior del túnel sense tenir en compte la forma externa.

El que es vol representar és un volum de fluid, de manera que s'ha de construir una geometria en 3D. Tot i això, sempre s'han de tenir en compte les següents consideracions per si podem reduir el càlcul d'alguna manera:

a) El volum a construir és simètric respecte algun eix? Aleshores pot dibuixar-se només una de les parts simètriques estalviant-se la meitat (o més de la meitat, depenent del cas) dels punts resultants i per tant la part proporcional del càlcul.

b) Si es pot considerar una forma infinita, com en el cas de conductes molt llargs o en els estudis bàsics dels perfils aerodinàmics, pot fer-se un dibuix en 2D. Aquests tenen un volum de càlcul molt reduït en comparació amb les geometries 3D.

3.2.2 Condicions de contorn i creació de la malla

Quan la geometria ja està feta i abans de crear la malla de punts, cal especificar les condicions de contorn del problema. En el cas de 3D aquestes seran cares del volum i en el cas de 2D seran arestes. Les condicions de contorn que es fan servir més usualment són les següents:

- *Velocity inlet/outlet*: Zona en la que es vol especificar el vector velocitat d'un fluid que la travessi, cap a dins o cap a fora de la geometria respectivament.
- *Pressure inlet:* Zona per la que entrarà el fluid, però en la qual no es vol especificar la velocitat d'aquest, sinó la pressió.
- *Pressure outlet:* Anàloga a l'anterior, però amb un fluid que va cap a fora de la geometria.
- *Fan:* Àrea que representa un ventilador. En comptes de frontera amb l'exterior, aquesta es troba a l'interior del fluid. El FLUENT permet indicar el salt de pressió produït pel ventilador.
- *Interior:* Si per les raons que siguin dins la geometria ha quedat una cara o aresta que no es vol considerar, aquest tipus de condició de contorn considera que no existeix.
- *Symmetry:* l'eix o pla de simetria
- *Wall:* Paret. La limitació sòlida de la zona del fluid.

Finalment es pot generar la **malla** del volum o del pla. És molt important que la malla sigui prou fina per donar bons resultats, però que no ho sigui massa, ja que com més fina més càrrega de treball comporta. El GAMBIT permet fer malles de diferents formes, tot i que la més usual (per ser la més flexible) és la triangular en 2D o tetraèdrica en 3D.

L'últim concepte important que s'utilitza en el GAMBIT és l'anomenada ***Size Function***, i com el seu nom indica és una funció de la que depèn la mida de la malla. Serveix per fer que la malla sigui més estreta en les zones on es desitja més precisió. Aquestes zones són normalment totes les parets, on el fluid passa de estar parat a agafar velocitat en poca distància. A la Figura 3.1 es pot veure un *Size Function* en una malla triangular en 2D.

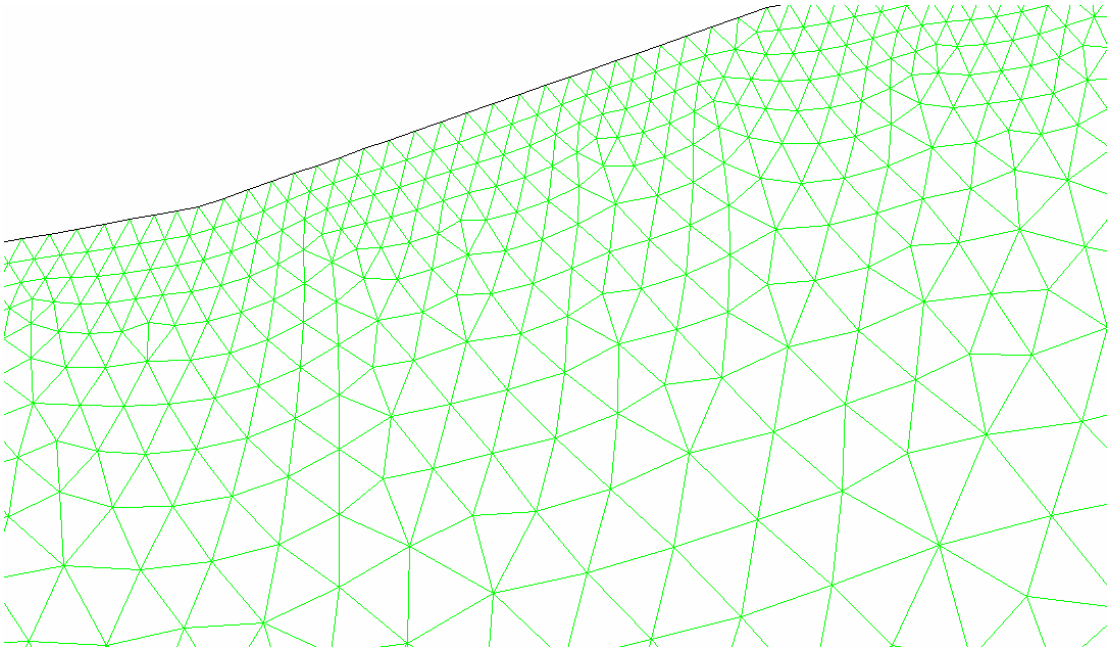


Figura 3.1: Malla triangular que segueix una *Size Function* lligada a un aresta d'una geometria 2D.

3.3 Software CFD: FLUENT

FLUENT és un dels programes més reputats en simulació mitjançant elements finits de problemes de dinàmica de fluids. Utilitza malles de punts 2D o 3D definides prèviament amb un programa tal com GAMBIT.

FLUENT és un software extremadament versàtil, que permet estudiar problemes en els que siguin d'interès fenòmens molt diversos, permetent estudiar el moviment dels fluids per raons purament dinàmiques (diferències de pressió), tèrmiques (diferències de temperatura), elèctriques, magnètiques, etc. Tanmateix permet estudiar problemes d'acústica, etc.

3.3.1 Paràmetres a introduir

Segons el tipus d'experiment que s'estigui duent a terme, interessarà que el FLUENT tingui en compte més o menys conceptes. Com més fenòmens puguin despreciar-se, més ràpid serà el càlcul. Com que en casos de geometries grans el càlcul pot arribar a durar moltes hores, qualsevol reducció del treball és important. Per això cal tenir molt en compte tots els paràmetres que són rellevants en el problema tant com els que no ho són. A continuació hi ha una llista dels més importants que s'han fet servir en aquest projecte:

- Models viscosos o de turbulència: Hi ha diversos models de turbulència que no s'explicaran aquí, però que estan molt ben recopilats a la tesis doctoral de Manuel Ruíz de Andana [8]. El model viscós més utilitzat i que dona uns resultats més generals en FLUENT és el k-epsilon, de

dues equacions. Tot i això, sempre pot anar bé consultar la guia de FLUENT [7] per assegurar-se que se'n faria prou amb un model més senzill.

- Equació de l'energia: Cal tenir-se en compte quan ens trobem dins del règim incomprensible. Sempre que la densitat sigui constant, la variació de la temperatura serà prou despreciable com per estalviar-nos aquest càlcul.

- Condicions d'operació i materials: Poden definir-se els materials del que està fet el o els fluids i les parets, i també la pressió i la temperatura (si es té en compte l'equació de l'energia) exteriors i inicials. Si no es defineixen, FLUENT escull l'aire com a fluid per defecte i les condicions atmosfèriques a nivell del mar com a valors inicials i exteriors.

- Solució del problema: El càlcul de les derivades espacials de les magnituds d'interès físic s'ha de fer també de forma numèrica. FLUENT permet escollir el grau de precisió amb que es farà aquest càlcul. L'opció escollida en aquest treball és calcular-les amb un esquema de segon ordre, anomenat *Second Order Upwind,* per a totes les variables.

- Convergència: Després de la resta de paràmetres s'escull finalment el valor de la convergència, de l'error màxim. Com que aquest paràmetre és l'error en sí mateix, la fiabilitat de la solució en depèn directament. El més comú és observar els resultats per convergències cada vegada més petites fins a trobar diferències despreciables. El valor que compensa millor la quantitat de càlcul amb l'exactitud és de 0.0001.

3.3.2 Processament del càlcul

Després d'introduir els paràmetres, per començar les iteracions cal inicialitzar el procés. El procés de convergència numèrica FLUENT permet visualitzar una gràfica dinàmica on es poden veure els valors de l'error en cada variable, en cada iteració (Figura 3.2). El procés iteratiu s'atura quan s'arriba a la convergència.

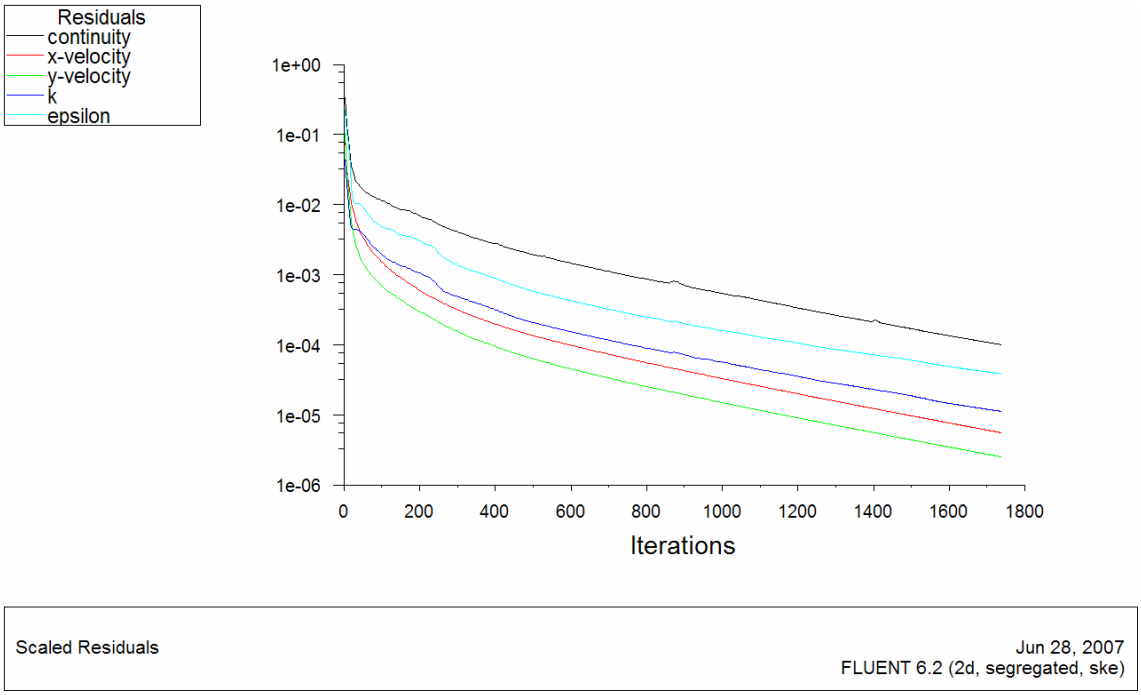


Figura 3.2:gràfic amb els valors de l'error en cada iteració d'un problema convergit. La convergència està especificada a $1 \cdot 10^{-4}$.

3.3.3 Post-processat i Anàlisi dels resultats

FLUENT ofereix un gran ventall de possibilitats per observar els resultats de la simulació. Permet observar les diferents variables (velocitat, pressió, viscositat o turbulència, temperatura, etc.) de diverses maneres. Contorns amb colors segons el valor (Figura 3.3), diagrames de flux amb vectors (Figura 3.4), gràfiques x-y de magnituds específiques (Figura 3.5), etc.

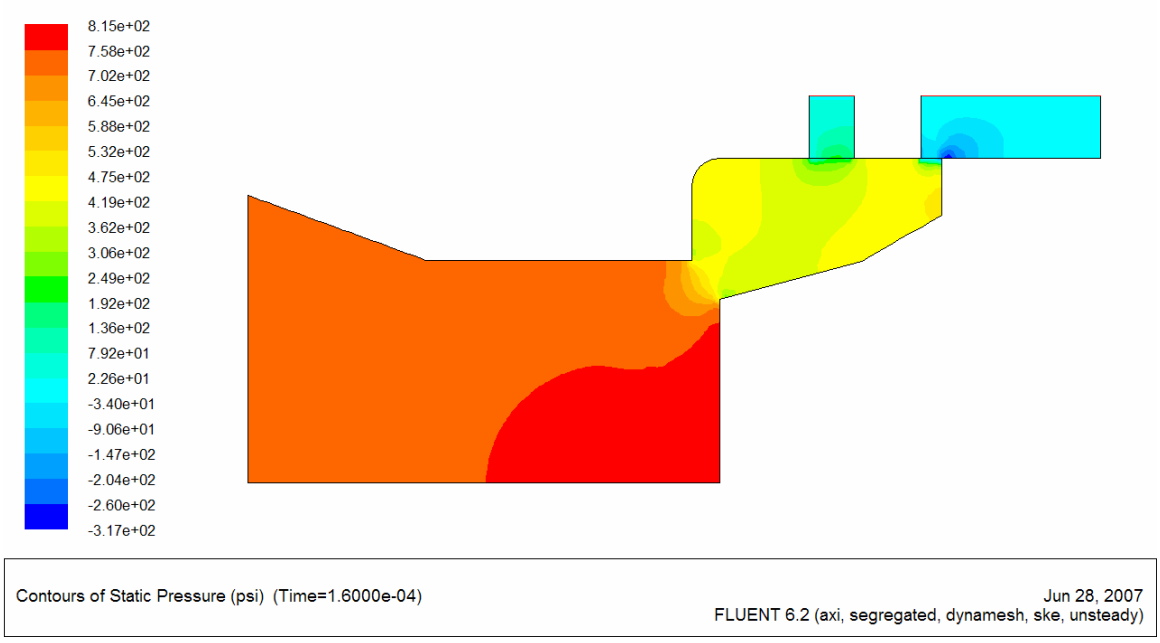


Figura 3.3: Pressió estàtica dins d'una vàlvula a pressió, en 2D.

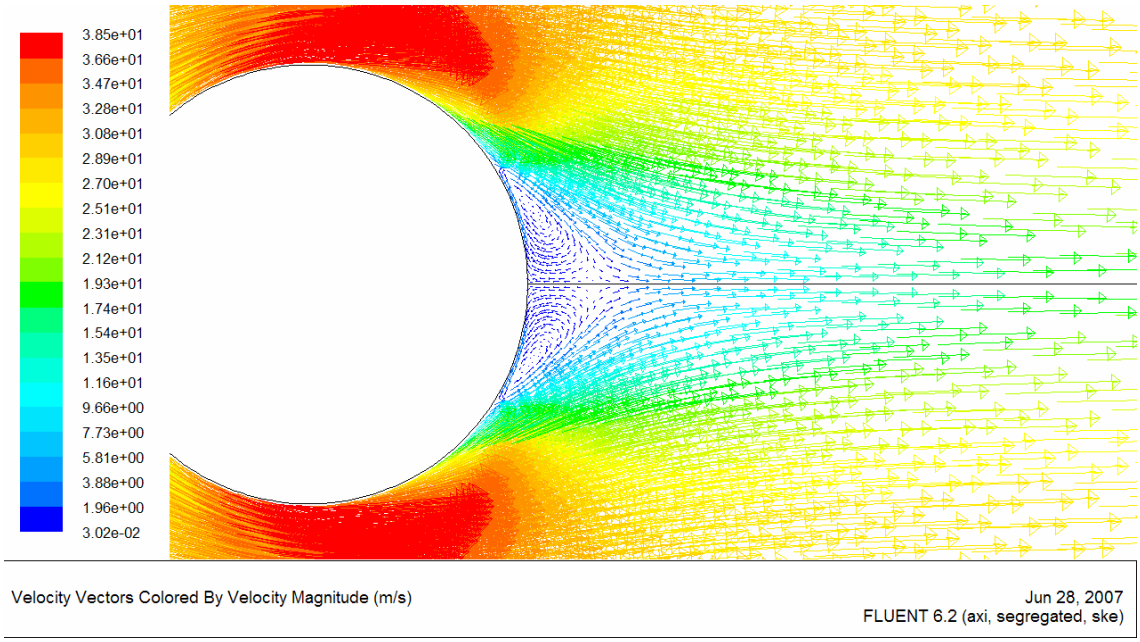


Figura 3.4: Vectors de la velocitat darrera d'un cilindre infinit. Es poden observar clarament els vòrtex que es formen.

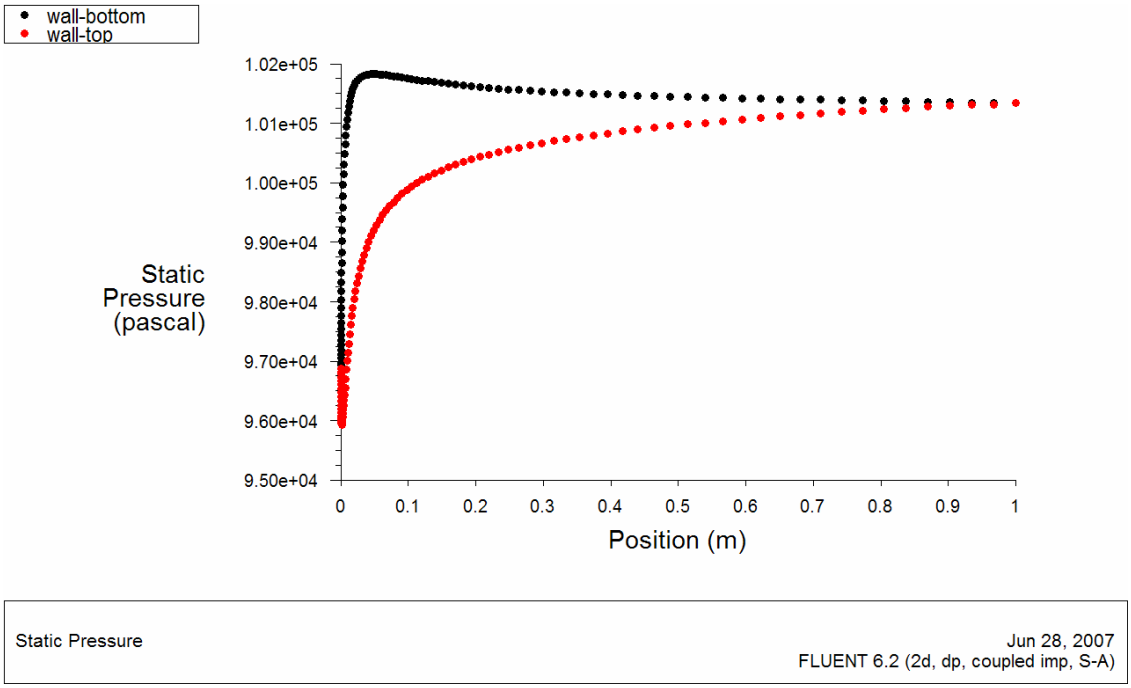


Figura 3.5: Distribució de pressions a l'intradós i l'extradós d'un perfil NACA 0012 amb €un angle d'atac de 15º, mesurades a una velocitat de uns 40 m/s.

A més, FLUENT proporciona els valors de fluxos i forces que actuïn en zones de la geometria o en línies o plans que el mateix FLUENT permet crear. En definitiva, després de la simulació, és una eina molt útil per a fer observacions i estudiar els resultats, ja que dona molta informació de manera versàtil.

CAPÍTOL 4. DISSENY DEL TÚNEL DE VENT PEL LABORATORI DE L'EPSC

4.1 Especificacions de l'escola

Com que des del principi aquest havia de ser el projecte de disseny d'un túnel de vent per construir-lo específicament al laboratori de l'EPSC, la mateixa escola va marcar les pautes de funcionament del túnel. Són les següents:

- Velocitat a la cambra d'assaig fins a 80 m/s.
- Mides de la secció transversal de la cambra d'assaig d'aproximadament 1x1 metres.
- Nombre de Reynolds al voltant de 10^7.
- El túnel havia d'emplaçar-se dins el laboratori d'aeronàutica SA1 del bloc vermell de l'EPSC, respectant-ne les mides i "sense ocupar massa espai".

4.2 Primeres consideracions: 3 opcions, 3 túnels.

La primera decisió que es va prendre va ser la de dissenyar un túnel de **circuit obert**. La raó va ser el pressupost: és més barat que el de circuit tancat. El cost energètic cada vegada que es fa servir és major, però com que és un túnel de laboratori de universitat no està previst que tingui un gran factor d'utilització.

Un cop decidit això, es va plantejar com es situaria el túnel dins del laboratori. Després de veure el túnel de vent obert que ja està construït al laboratori (que arriba a velocitats al voltant de 40 m/s) funcionant i notar tot el vent que provocava i com feia volar els papers que hi havia sobre les taules, es va arribar a la conclusió que el túnel d'aquest projecte, que està previst de funcionar al doble de velocitat, causaria el caos absolut al soterrani. Per solucionar aquest problema, es va decidir de fer un túnel en **forma de U** que tingués l'entrada i la sortida connectades a les finestres del laboratori de manera que no s'alterés l'aire de dins el laboratori.

El següent pas va ser prendre les mides de les finestres del laboratori i de les distàncies entre elles. La mida de la obertura útil de les finestres és de 133 x 125 centímetres. Deixant dos centímetres de marge per cada costat, quedava una àrea de 121x129 = 15609cm^2 = 1'56m^2. Per aconseguir una relació d'àrees major es van adoptar unes mides de la cambra d'assaig lleugerament inferior a les especificades: 80x80 = 6400 cm^2 = 0.64m^2. Així s'aconseguia una relació d'àrees de 2.44. Aquesta, tot i així, era una relació bastant petita pel que es necessitava. Per confirmar-ho, es va buscar un ventilador que fos prou petit per cabre a la finestra, i el més potent que es va trobar va ser el TGT/4-1000-9/-22 de la casa Soler & Palau que dona un cabal màxim de 82071 m^3/h, que per una secció de 6400 m^2 representa una velocitat màxima de 35 m/s, ni la meitat del que demanaven els requeriments. La única solució era reduir l'àrea de la secció d'assaig molt per sota del que es demanava. Per poder tenir un àrea de secció com la que es requeria es necessitaria un ventilador més gros (o més d'un) i

una entrada d'aire més gran, per la qual cosa el forat de les finestres no era prou gran.

Vista la situació es va decidir que s'havien de dissenyar **tres túnels de vent diferents**, i que la persona que en un futur hagués d'encarregar-se de construir-lo triés el que convingués més:

1. De secció d'entrada i sortida de mida de les obertures de les finestres actuals, i amb un secció d'assaig de 0.25 m^2 per aconseguir la velocitat requerida. A partir d'ara s'anomenarà "prim".

2. De secció d'entrada i sortida de mida de les obertures de les finestres però amb la secció semblant a la requerida, i per tant amb velocitats inferiors. A partir d'ara s'anomenarà "mitjà".

3. De secció d'entrada i sortida de mida més gran, pel qual necessitarà treure els dos vidres de les finestres, i amb una secció semblant a l'actual. Aquest seria l'únic que compliria tots els requisits. S'anomenarà "gruixut".

4.3 Disseny preliminar

A continuació es mostren les característiques principals de disseny dels tres túnels per separat. Un factor molt important pel disseny dels túnels era la mida del ventilador escollit, i per això es van escollir al principi. Després de mirar els catàlegs de diferents fabricants de ventiladors industrials (SODECA, Vostermans Ventilation, Flaktwoods són les més importants). Com s'ha dit a l'apartat anterior, es va escollir l'empresa catalana Soler & Palau. Aquesta empresa disposa de tot tipus de ventiladors, dels que es va triar la gamma més aerodinàmica, la TGT. L'altura de les finestres és de 125 cm, de manera que els models que hi encaixaven més era TGT-1000, de 100 cm de diàmetre (veure annex 1). El model concret escollit finalment és el TGT4-1000-9-22, per ser el més potent dins de la seva gamma.

A l'hora de dibuixar els diferents dissenys, s'han partit totes les geometries per la meitat, ja que totes són **simètriques respecte el pla XY**. D'aquesta manera s'estalvia la meitat del càlcul. Aquesta és la raó per la qual tots els dibuixos mostrin només la meitat superior dels dissenys.

Per fer-los més fàcil a l'hora de construir-los, es va dissenyar **rectangular** la secció al llarg dels túnels, fins just abans de la sortida, on passaria a ser circular per adaptar-se a la forma del ventilador.

Una tovera corba és més difícil de construir que una de formada per diferents parts rectes unides, i el canvi aerodinàmic no es massa gran si s'uneixen bé els trams; de manera que es va dividir en tres trossos: el primer i l'últim amb el mateix angle respecte la horitzontal i el del mig amb un angle del doble dels

anterior, per satisfer la forma que ha de tenir una bona contracció (apartat *e* del punt 2.3). A la Figura 4.1 es pot veure la forma de la tovera del túnel gruixut.

En els girs del túnel s'hi col·loquen **deflectors de gir** seguint les especificacions de l'apartat *c* del mateix punt. A la contracció i la cambra d'assaig es disposen costats addicionals a **45º** per suavitzar les cantonades, tal com s'explica als apartats de teoria corresponents (a i e del punt 2.3).

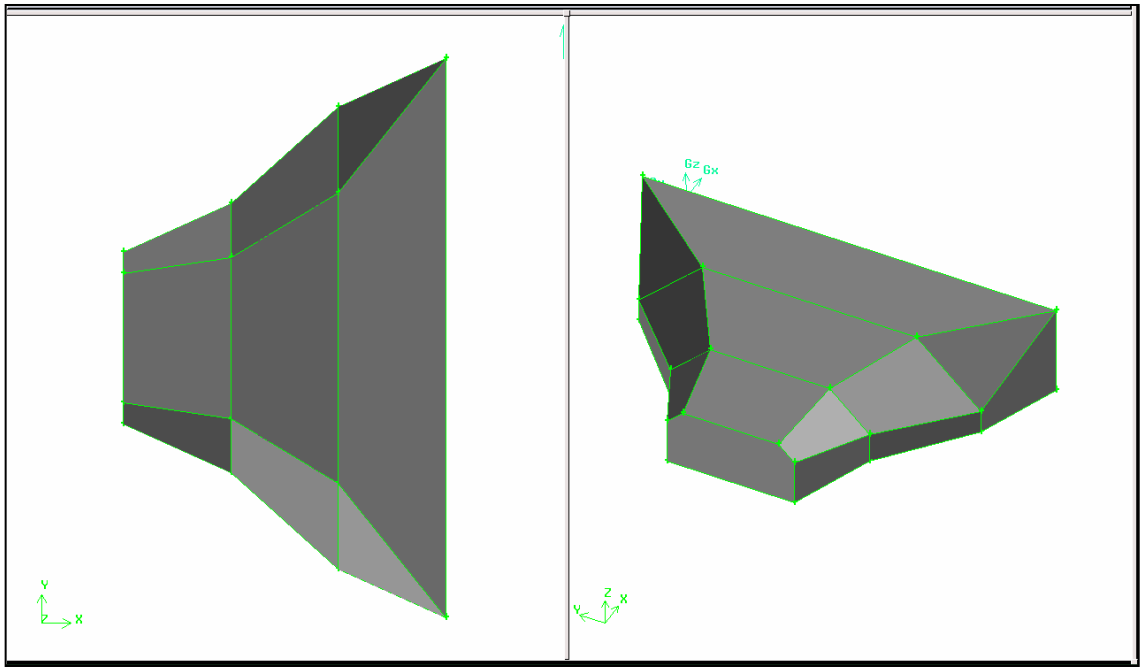


Figura 4.1: Disseny de la tovera del túnel gruixut dibuixada en GAMBIT.

4.3.1 Túnel de vent prim

Com s'ha indicat anteriorment, per aconseguir la velocitat sol·licitada una de les estratègies escollides ha estat dissenyar un túnel amb una àrea de secció d'assaig més petita. Es va escollir 50x50 centímetres: els costats serien la meitat dels requerits i per tant l'àrea total una quarta part.

El difusor aprofita al màxim la distància disponible aconseguint un angle de 3,43º. La relació d'àrees es de 3,44. Tot i que són bastant petits, són valors que provoquen el risc de separació per ser massa ajustats.

La mida de la sortida estava regulada per les mides del ventilador, però l'entrada es va fer aprofitant al màxim l'obertura de la finestra, deixant dos centímetres de marges per costat. Per últim, cal destacar que la forma de la secció que segueix el difusor és quadrada, per minimitzar l'angle d'acoblament amb el cercle del ventilador. A la Figura 4.2 hi ha la geometria dibuixada en GAMBIT.

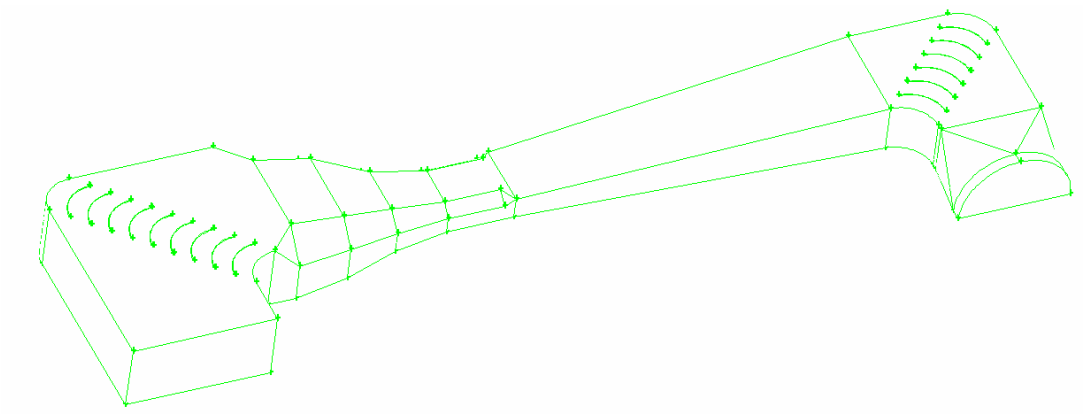


Figura 4.2:Vista del disseny preliminar del túnel prim.

4.3.2 Túnel de vent mitjà

Aquest túnel segueix les mateixes pautes que el túnel prim. La única diferència és que en aquest, la secció d'assaig és més gran per acostar-se més al requisit de mida (80x80) i per tant els angles de la contracció i el difusor són més petits. L'entrada, la sortida i els girs són exactament iguals que en el túnel prim. Es pot veure a la *Figura 4.3*. En aquest cas la relació d'àrees al difusor és de poc més que 1 i l'angle no arriba a 1º, de manera que segurament no hi haurà problemes de separació.

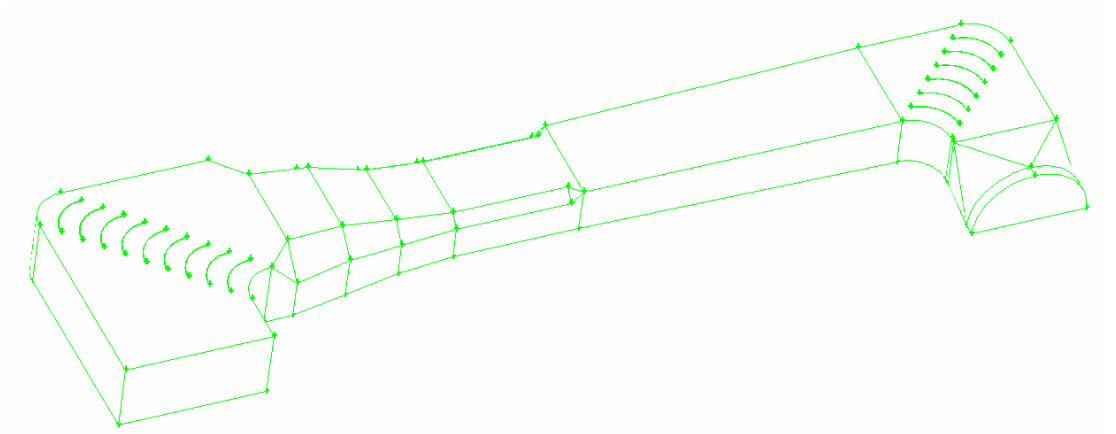


Figura 4.3: **Vista del disseny preliminar del túnel mitjà.**

4.3.3 Túnel de vent gruixut

Assumint que es pot aprofitar com a obertura tot l'ample de les finestres, deixant 10 centímetres de marge pels costats i 5 per dalt i per baix, l'obertura d'admissió del túnel té aproximadament el doble d'àrea que les anteriors. Gràcies a això es pot aconseguir un cabal d'aire suficient per arribar a més velocitat amb una secció d'assaig prou gran. La contracció segueix les mateixes pautes que en els dos altres túnels, i també els girs, amb les mides corresponents.

Com que es necessita més potència per moure cabals d'aire més grans i a la vegada no es pot posar un ventilador més gros perquè no passaria per l'altura de les finestres, la única solució és posar de costat dos ventiladors de la mateixa mida. D'aquesta manera prop de la sortida s'ha de passar d'una secció rectangular a una secció en forma de ∞.

En aquest cas, el difusor segueix un angle de 3,77º, amb una relació d'àrees de 2,52. Com el cas del "prim", el valor de l'angle és arriscat, tot i que s'ha aprofitat la màxima distància. El disseny es pot veure a la Figura 4.4.

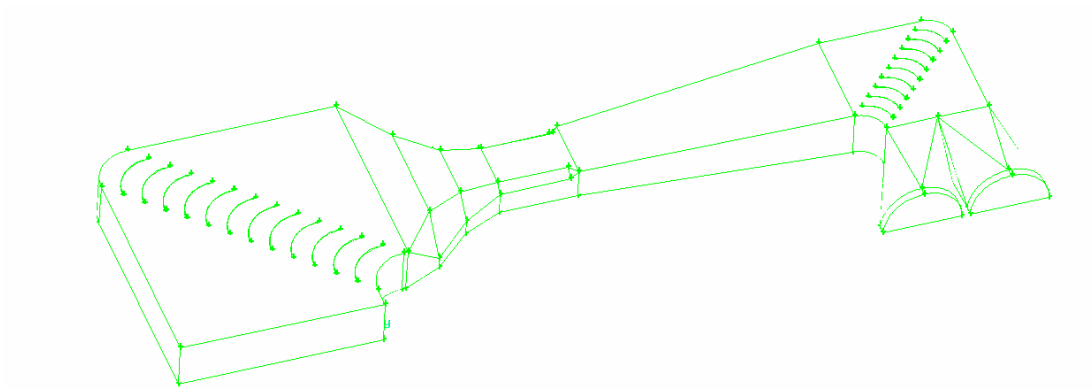


Figura 4.4: Vista del disseny preliminar del túnel gruixut.

Es va estudiar el comportament d'un túnel amb tres ventiladors més petits, però es va arribar a la conclusió de que s'aconseguia un cabal menor i probablement amb un cost econòmic superior, de manera que es va descartar aquesta opció.

4.4 Simulació en el software: Perfeccionament

4.4.1 Elecció de la mida de la malla

Per començar el procés de simulació cal construir abans les malles amb GAMBIT. Com s'explica a l'apartat 3.2.2, cal fer una malla que tingui el mínim nombre de punts per minimitzar la càrrega de treball però que sigui prou precisa per donar bons resultats. Per trobar la mida de cel·la més adequada es van diferents malles amb diferents *Size Functions*. El mètode a seguir és el de fer malles cada vegada més petites i comparar-ne els resultats després de fer la simulació amb FLUENT. La malla escollida és la que no mostra diferència en els resultats de malles més petites que ella. Per fer aquest procés es poden fer servir geometries en 2D ja que no importa la validesa dels resultats, si no la comparació entre ells, i és molt més ràpid que en 3D.

Finalment es va escollir una malla de *Size Function* amb un mida de cel·la de 2 centímetres arran de les parets, amb un factor de creixement de 1.2 i una mida màxima de 10 centímetres. A l'annex 4 hi ha algunes fotos de les malles resultants amb els resultats en FLUENT produïts per cada una d'elles.

4.4.2 Primeres correccions: simulacions en 2D

Abans de realitzar les simulacions tridimensionals, que comporten un considerable temps de càlcul es van simular els tres túnels en 2D, fent servir el pla de simetria, per obtenir una idea de les correccions inicials que s'aplicarien als models. A causa de que la tovera del túnel té una contracció lateral i vertical, els valors de pressió i velocitat d'una simulació en 2D no es poden considerar per la geometria real. Tot i així, poden donar una lleugera idea de si la forma general és prou aerodinàmica i de quin punt de l'estructura és problemàtic.

Després d'aquesta primera simulació, es va observar que calia fer les següents correccions:

- En tots els túnels: la paret exterior dels girs havia de ser retallada per reduir l'àrea, ja que l'aire hi perdia velocitat fins arribar a aturar-se. A la Figura 4.5 es pot apreciar el dibuix en FLUENT de les velocitats. En variar el gir també es va haver de tornar a calcular el nombre i geometria dels deflectors.

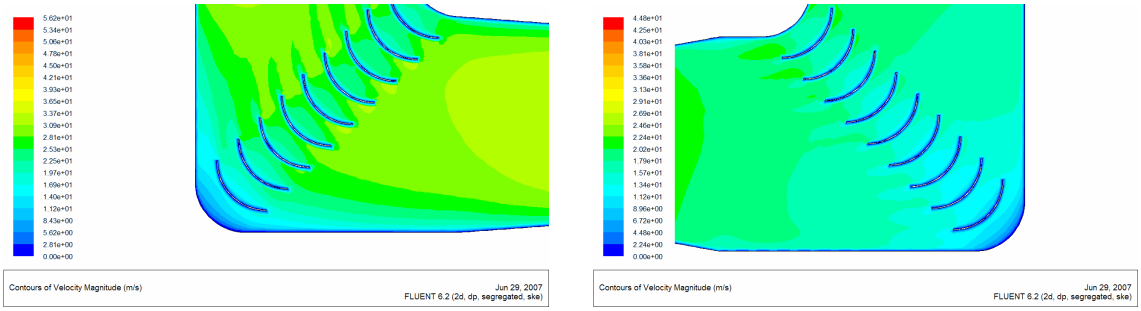


Figura 4.5: A la dreta la paret exterior del gir d'entrada del túnel prim, i a l'esquerra la de sortida del túnel gruixut.

- Al túnel gruixut: En el disseny preliminar es va dissenyar el tram de sortida (després del difusor) amb una secció rectangular amb la mateixa altura que en el tram d'entrada per facilitar la construcció, però això causava un acoblament a la forma de dos cercles difícil per ser perímetres tant diferents (Figura 4.7). Això causava, doncs, una obertura massa brusca lateral en massa poc espai causant una clara separació (Figura 4.6). La solució va ser disminuir l'altura del rectangle per augmentar-ne l'amplada, mantenint l'àrea (Figura 4.7).

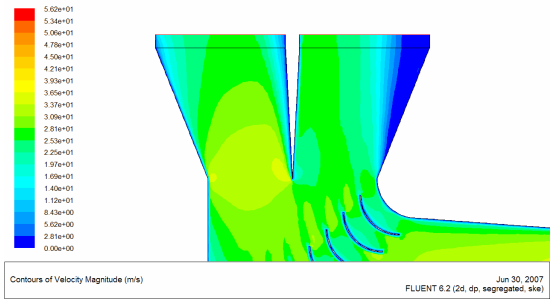


Figura 4.6: Velocitats a la sortida del túnel gruixut. La brusquedat de l'obertura provoca la separació de la capa límit.

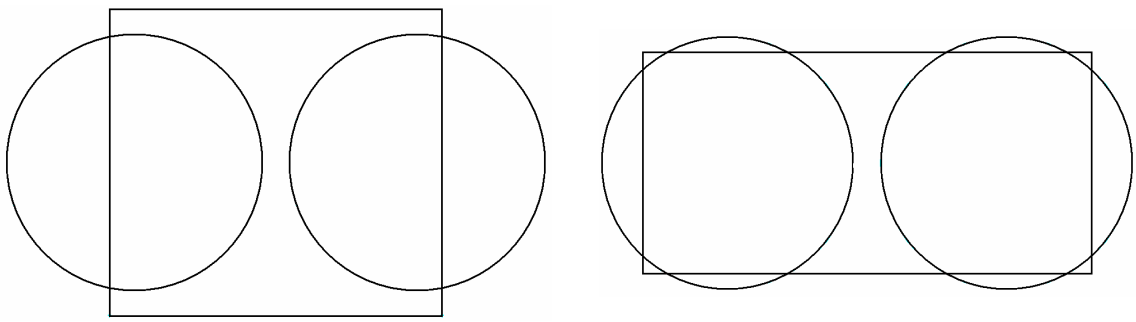


Figura 4.7: A l'esquerra, el perímetres de sortida inicials. A la dreta, els modificats.

Com es pot veure a la Figura 4.7, per reduir l'angle de difusió davant dels ventiladors es va augmentar l'amplada del conducte. La nova forma augmenta l'angle lateral (passant de 4.2º a 8.81º), però disminueix l'angle cònic del difusor (passant de 3.77º a 3.42º), sent així millor per evitar la separació.

4.4.3 Simulacions 3D

Després de corregir els dissenys preliminars es va produir la malla de punts als volums 3D. A les simulacions amb FLUENT es representa el ventilador com a un salt de pressió constant en un espai infinitesimal. El paràmetre a introduir en cada simulació és aquest salt de pressió. Com que en un ventilador real el cabal varia en funció del salt de pressió, s'han de realitzar diverses simulacions per arribar a trobar el punt de la corba característica del ventilador corresponent en cada cas concret.

Aquest procés es contempla a continuació, conjuntament amb les diferents característiques contemplades en cada simulació 3D.

- **Túnel mitjà**

Com s'ha explicat abans, per trobar el salt de pressió exacte per les simulacions es van provar diferents valors en diferents simulacions, recollint el valor del cabal en cada cas. Amb els punts es va traçar una recta sobre la gràfica del fabricant i així es va trobar el punt de treball del ventilador, com es pot veure a la Figura 4.8.

Aquestes proves s'han hagut de realitzar en cadascun dels models, tot i que aquí s'ensenya només el gràfic aconseguit en el túnel mitjà.

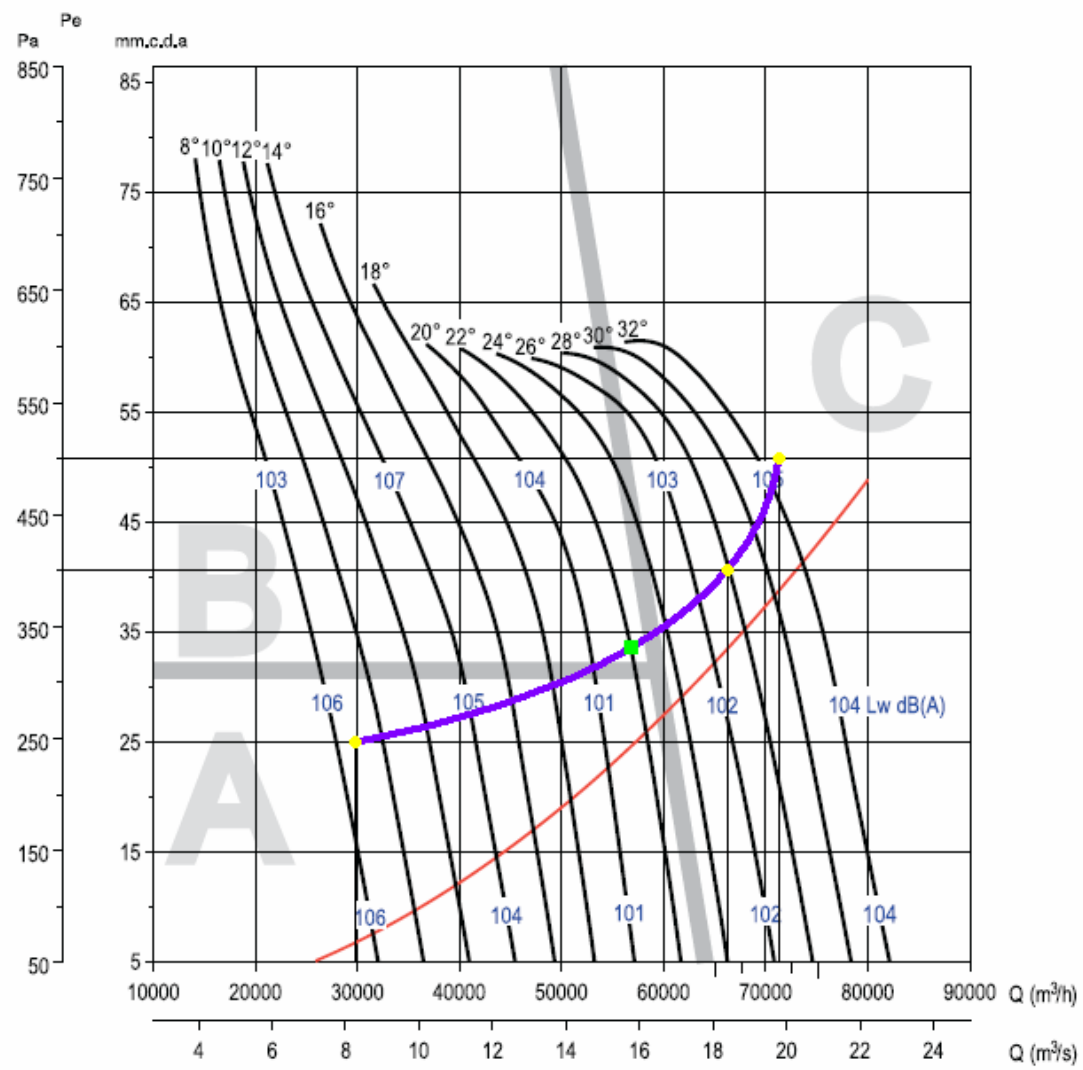


Figura 4.8: Corba característica del ventilador (22º) i corba de resposta del ventilador en el túnel mitjà, calculada a partir de simulacions realitzades amb diferents salts de pressió al ventilador (punts marcats en groc). El punt verd representa el punt de treball real del ventilador.

Després de la simulació amb el salt de pressió corresponent al punt de treball estimat el resultat fou prou satisfactori, doncs el valor del cabal obtingut és coherent amb les prestacions del ventilador. El perfil de velocitats dins la cambra d'assaig és també satisfactori, del tot uniforme (Figura 4.9).

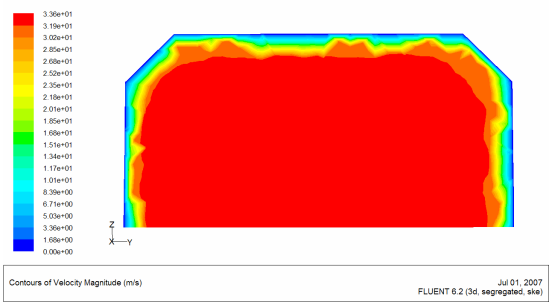


Figura 4.9: velocitats en una secció dins la cambra d'assaig en el túnel mitjà. A una distància raonable de les parets el fluid és suficientment uniforme.

- **Túnel prim**

Tot i que l'angle cònic del difusor era relativament petit (2.73º) en la simulació es poden observar indicis de separació en el difusor, provocant pèrdues al llarg d'aquest. Si s'observa una la representació tridimensional (Figura 4.10) es pot observar com el fluid arriba a aturar-se a les cantonades del difusor. Si s'observa la gràfica de la pressió total (Figura 4.11), es veu com es manté constant en tot el volum menys al voltant de les parets del difusor (cosa que indica on es produeixen les pèrdues més importants).

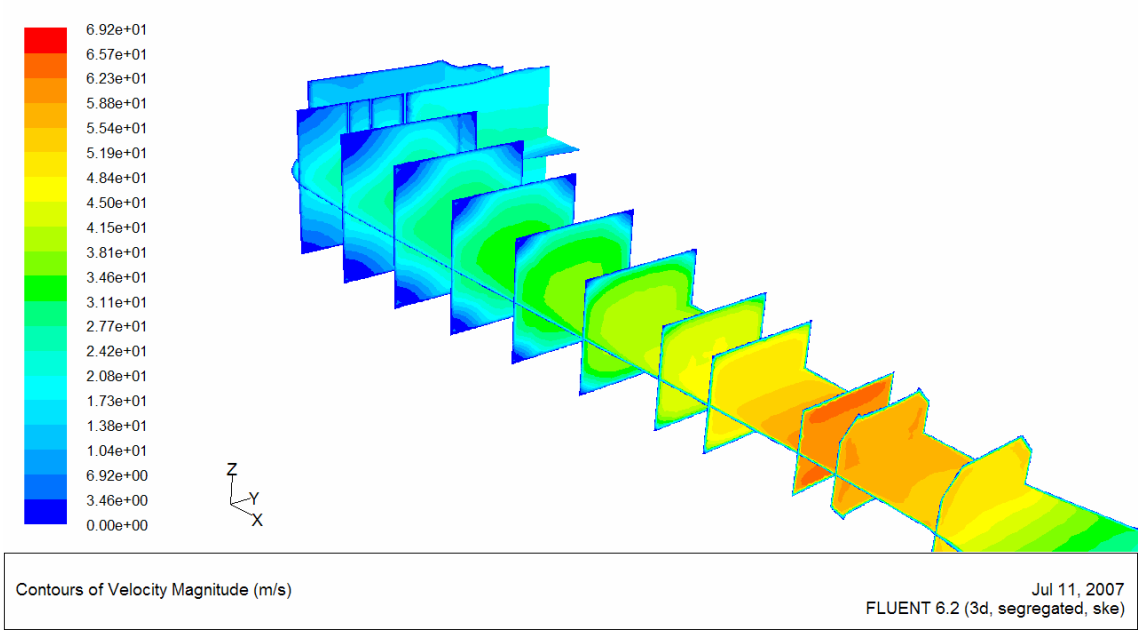


Figura 4.10:Vista amb plans perpendiculars de la velocitat al túnel de vent prim. Es pot veure la separació que atura el fluid a les cantonades del difusor.

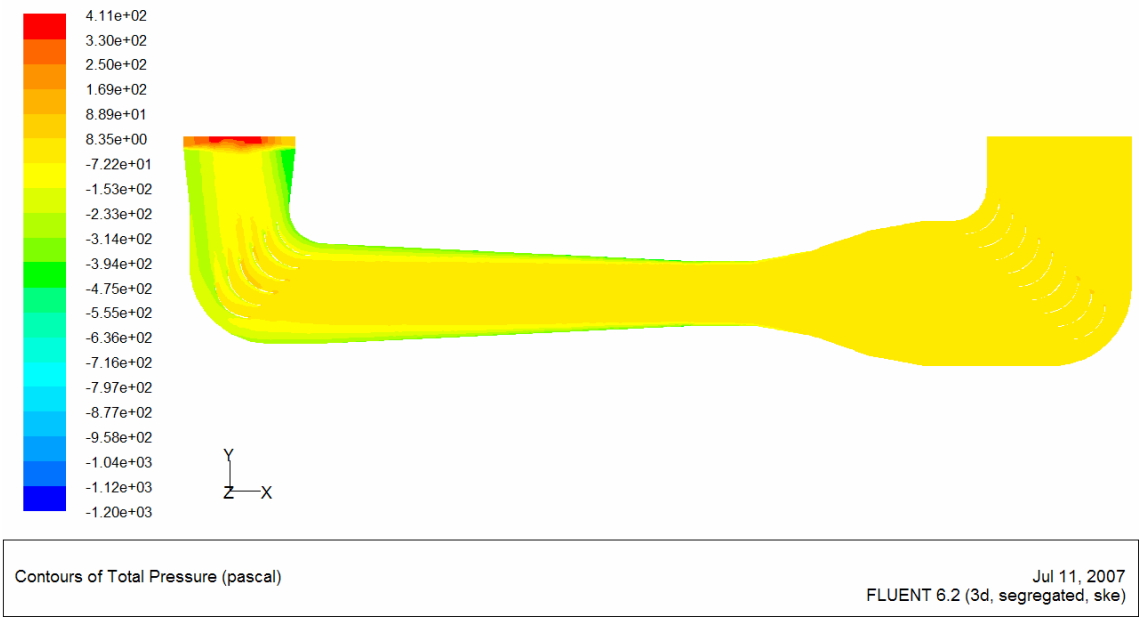


Figura 4.11 : Pressió total dins del túnel prim. Es manté gairebé constant en tot el túnel menys al difusor, a causa de les pèrdues per separació.

Per falta d'espai, una possible solució en aquests casos és col·locar pantalles anti-turbulència. Com es veurà a l'apartat següent, és la opció més recomanada per evitar aquesta separació en el difusor.

- **Túnel gruixut**

En aquest túnel l'angle cònic d'obertura i la relació d'àrees són majors que en el prim. És per això que en aquest cas es produeix una separació lleugerament més pronunciada.

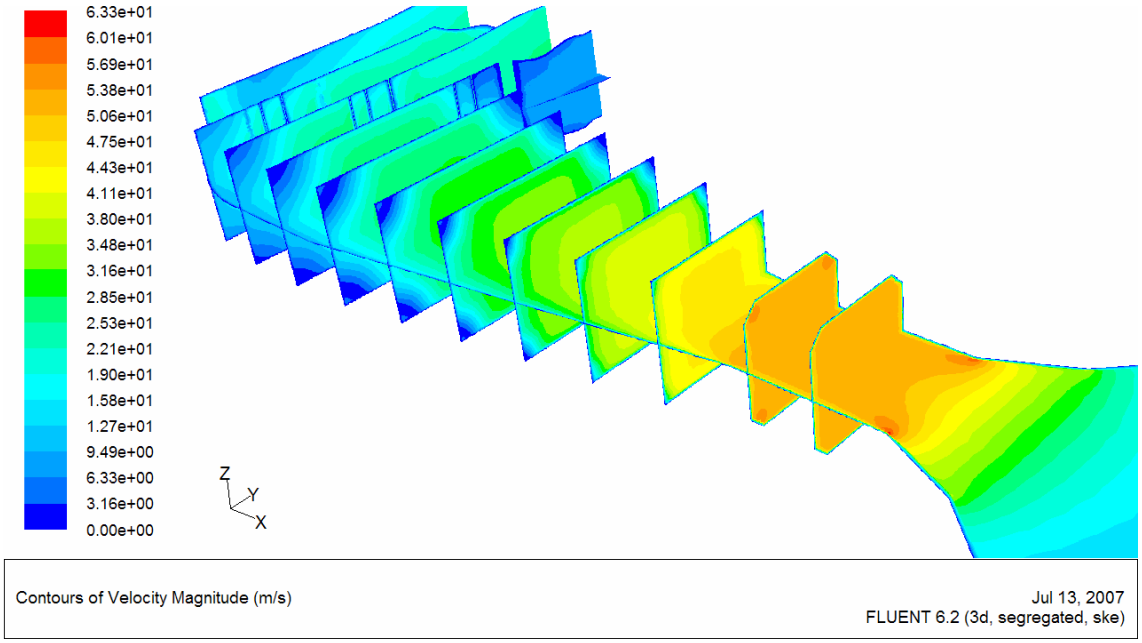


Figura 4.12:Vista tridimensional de plans perpendiculars al difusor del túnel gruixut. Es produeix separació a les parets laterals.

4.5 Anàlisi dels resultats de les simulacions

En aquest apartat es presenta la taula amb els valors de disseny més rellevants en els casos simulats. Per a cada cas es mostren les peculiaritats que destaquen més.

4.5.1 Túnel prim:

Rendiment	3.38

Relació d'àrees	2.35
Angle Cònic d'Obertura	2.73º

Velocitat Cambra d'Assaig	~ 60 m/s
Nombre de Reynolds a la cambra d'assaig	$2.3x10^6$
Cabal	8.92

Com ja s'ha dit als apartats anteriors, si es vol evitar al 100% la separació de la capa límit s'ha de col·locar una pantalla anti-turbulència, a la zona on es produeix la separació, aproximadament a la meitat del túnel, tot i que les pèrdues actuals són acceptables.

4.5.2 Túnel mitjà:

Rendiment	1.04

Relació d'àrees	1.28
Angle Cònic d'Obertura	0.90º

Velocitat Cambra d'Assaig	~ 30 m/s
Nombre de Reynolds a la cambra d'assaig	$1.6x10^6$
Cabal	12.16 kg/s

Aquest és, dels tres, el túnel amb la menor relació d'àrees, i per tant el que té menys problemes de separació de la capa límit. Aquest difusor tant recte, però, comporta que es produeixin pèrdues importants per culpa de transportar l'aire sense reduir-ne la velocitat. Això es pot veure a la gràfica de pressió total (Figura 4.13): allà on aquesta disminueix és allà on es produeixen més pèrdues per fregament.

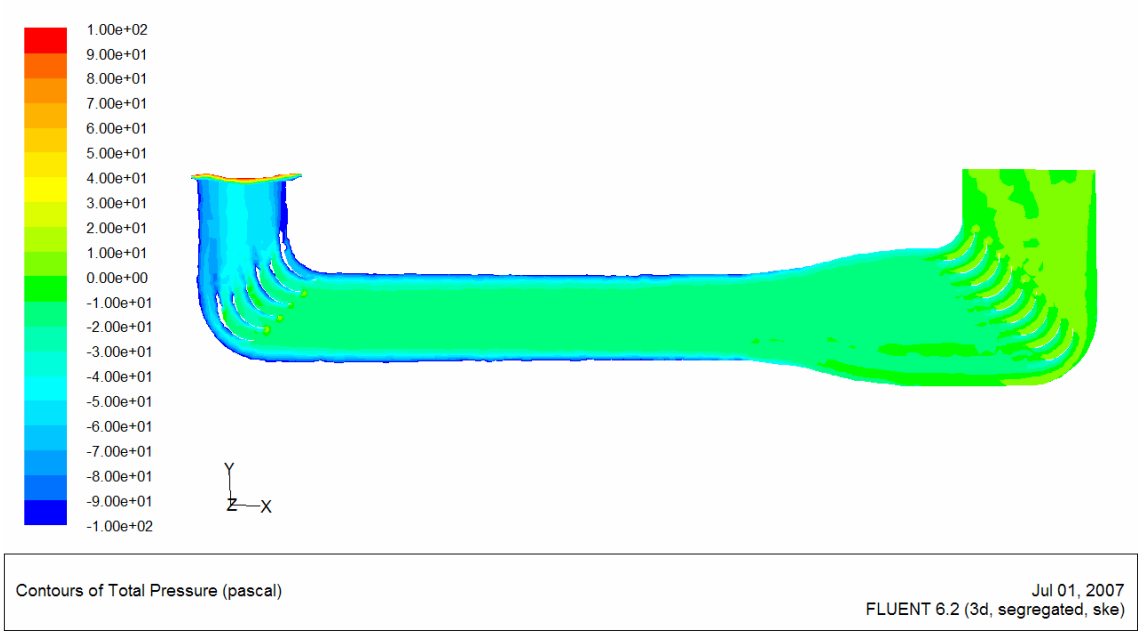


Figura 4.13: Pressió total. Es pot veure com, tot i que no hi ha separació, es redueix al llarg de les parets del difusor.

4.5.3 Túnel gruixut:

Rendiment	1.18

Relació d'àrees	2.43
Angle Cònic d'Obertura	3.42º

Velocitat Cambra d'Assaig	~ 50 m/s
Nombre de Reynolds a la cambra d'assaig	2.6×10^6
Cabal	19. 72 Kg/ s

Els resultats en aquest túnel són comparables als del túnel prim, amb cert factor d'escala. En aquest cas, però, la turbulència produïda és major, i seria bo col·locar dues pantalles per assegurar la no-separació.

CAPÍTOL 5. CONSTRUCCIÓ DEL TÚNEL

Els tres túnels segueixen les mateixes pautes de construcció. Tot i que cadascun varia en mides, i per tant en preus, els tres necessiten els mateixos materials. L'estructura principal es forma de fibra de vidre farcida amb material plàstic. Per donar resistència i rigidesa es reforça per l'exterior amb barres d'acer.

Com s'explica als capítols anteriors, el ventilador escollit és el model TGT4-1000-9-22 de la casa Soler & Palau (les seves propietats i corbes característiques es troben a l'Annex 1). Aquest estarà unit al túnel amb els accessoris proporcionats per la mateixa empresa.

La cambra d'assaig estarà formada per plaques transparents de metacrilat enganxades a perfils d'alumini en forma d'L, subjectades amb cargols. Una de les plaques estarà fixada a frontisses per fer la funció de finestra de fàcil obertura.

Per últim, tot el túnel es col·locarà sobre una plataforma metàl·lica construïda especialment per al túnel, per disposar-lo a l'alça de les finestres. Per moure'l amb facilitat la plataforma tindrà rodes. Sobre la base d'aquesta plataforma es situaran blocs de formigó com a pesos per evitar el desplaçament del túnel a causa de la força del seu propi vent.

A continuació s'exposa de manera detallada el procés de construcció.

5.1 Materials

Llista dels materials necessaris per la construcció del túnel de vent. Les característiques i les quantitats estant especificades al pressupost.

1. Ventilador model TGT/4-1000-9/-22 de Soler & Palau.
2. Cargols, femelles i anelles.
3. Cinta adhesiva gruixuda
4. Conglomerat de 15mm de grossor
5. Plaques d'alumini pels motlles i les llengües
6. Oli
7. Poliuretà
8. Fibra de vidre
9. Massilla de poliester
10. Acetona
11. Silicona
12. Bigues de ferro
13. Rodes amb fre i sense
14. Làmines d'alumini per reforços
15. Precinte

5.2 Passos per la construcció

Hi ha tres dissenys diferents de túnels de vent, cadascun amb les seves mides corresponents, però tots seguint el mateix patró. Per aquest motiu, es descriurà detalladament el procés de construcció de forma general, de manera que es pugui fer servir per als tres dissenys.

El muntatge del túnel de vent s'ha dividit en 7 trams diferents, que han de ser ajuntats per formar el túnel sencer. Són: la corba d'entrada, la contracció, la cambra d'assaig, el difusor, la corba de sortida, l'acoblament amb el ventilador i el propi ventilador. Com es veurà més endavant, algunes d'aquestes parts estan formades per sub-parts més petites que individualment tenen mides adequades per ser transportades dins el laboratori, però que un cop unides no passarien per la porta. Per tant, només poden construir-se fora del laboratori les sub-parts sense unir.

Deixant de banda el ventilador, que s'obtindrà ja fabricat, dins del procés de construcció es troben dos metodologies diferents: una per fabricar la secció d'assaig i l'altra per la resta. Aquestes dues metodologies s'exposen a continuació.

Totes les mides i vistes necessàries per la construcció de les diferents peces del túnel de vent es troben a l'ANNEX 2.

- **Cambra d'assaig**

La secció d'assaig està formada per plaques de metacrilat subjectades sobre bigues d'alumini. Primer s'ha de construir l'estructura d'alumini i després clavar-hi les tapes de metacrilat al voltant.

Per aconseguir les cantonades retallades a 45º, s'han de confeccionar els perfils adients amb planxes d'alumini, utilitzant peces de conglomerat tallades a la forma de les cantonades (Figura 5.1) a mode de motlle.

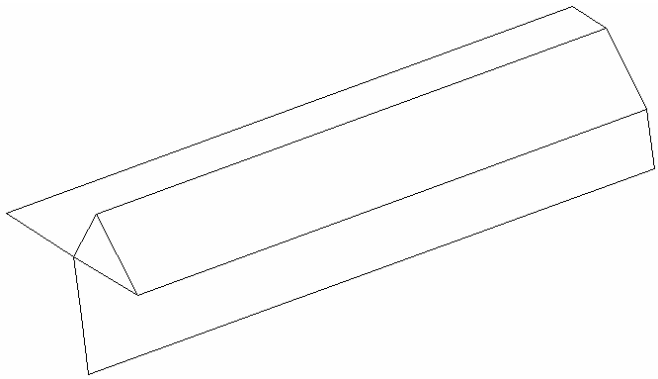


Figura 5.1: Forma de les cantonades de les secció d'assaig.

Les 8 arestes restants de la cambra d'assaig estaran formades per angles d'alumini en forma d'L., de manera que per un costat sostinguin l'estructura i les plaques de metacrilat i per l'altre serveixin com a llengües de la cambra d'assaig .

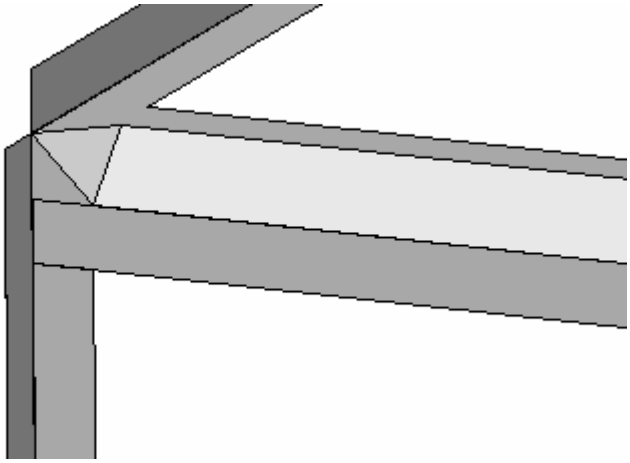


Figura 5.2: Forma d'un vèrtex de l'estructura metàl·lica de la cambra d'assaig.

Finalment s'han de cobrir les quatre parets amb les plaques de metacrilat amb les mides adients del túnel escollit. Per aconseguir fer la funció de portes, les dues plaques de metacrilat laterals s'han de subjectar només per un costat, ja que hauran de tallar-se arran d'aquest tall per permetre el gir de la porta. Aquesta es fixarà amb dues frontisses i es tancarà amb un baldó. Finalment, per assegurar el tancament hermètic de les portes, sota l'obertura es disposarà Cinta adhesiva gruixuda a mode de coixí..

Totes les unions de la cambra d'assaig es realitzaran amb cargols de 8x15mm col·locats cada 10 centímetres.

- **Corbes d'entrada i sortida, tovera, difusor i acoblament.**

Totes aquestes parts estant formades per quatre sub-parts: la base, el sostre i les parets, que s'han de muntar per separat. La confecció de cadascuna d'aquestes sub-parts segueix els passos següents:

1. Realització d'un motlle d'alumini amb la forma interior de la peça i acabaments en angle de 45º per definir la frontera d'unió amb les altres sub-parts. Si el motlle ha de tenir formes no planes, s'han d'utilitzar peces de fusta com a suports per la col·locar i donar forma al motlle, com a la Figura 5.3. Caldrà enganxar el motlle sobre els suports amb claus.

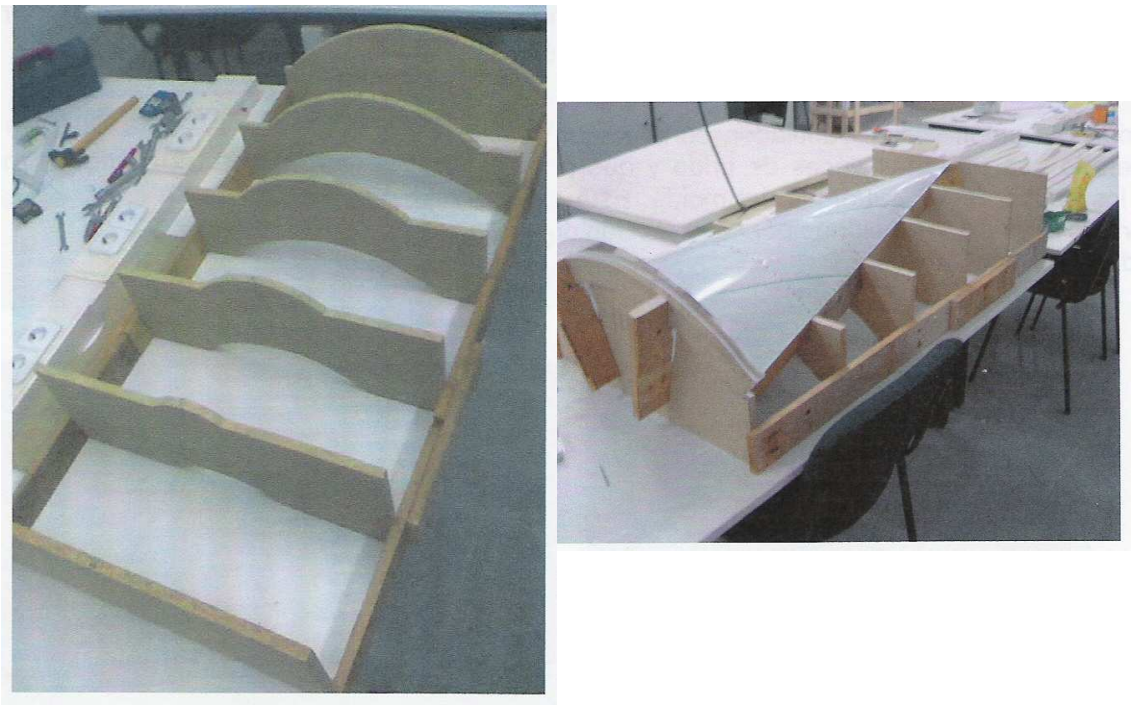


Figura 5.3: A la dreta les costelles de conglomerat per la formació d'un motlle exemple, i a l'esquerra el motlle clavat sobre la fusta a punt per ser utilitzat.

2. Cobrir els claus amb precinte i untar-ho tot amb oli per facilitar l'extracció de la peça.

3. Aplicar una primera capa de fibra de vidre sobre el motlle. A sobre col·locar-hi una placa de poliuretà, tallada en tires si fa falta. Finalment aplicar una segona capa de fibra de vidre sobre el poliuretà.

Una cop es disposi de les quatre sub-parts d'un tram del túnel s'han d'unir amb tires de fibra de vidre interiors i exteriors.

Les llengües per enganxar diferents trams del túnel s'hauran de confeccionar un cop un tram ja estigui unit. Es tallarà una làmina d'alumini amb les mides corresponents de la llengua i s'adherirà a la peça amb diverses capes de fibra de vidre, de manera que quedi resistent i plana pel costat on toqui amb la llengua de la peça adjacent.

- **Col·locació dels deflectors**

Un cop aconseguides les peces corbes d'entrada i sortida, es poden col·locar els corresponents deflectors. Aquests es poden construir com quarts dels cilindres d'alumini, de manera que primer de tot cal tallar els cilindres transversalment per aconseguir 4 deflectors amb cadascun.

Per introduir-los al túnel cal fer talls a la capa superior i inferior de les peces de molt poca gruixària, de manera que quan s'hi introdueixin els deflectors quedin ben collats i no deixin espai per a que surti l'aire. Un cop introduïts, s'han de tallar els deflectors arran de la superfície i collar-los per dins i per fora amb

silicona (per dins cal prendre molt de compte en que no es formin protuberàncies).

- **Estructura de suport**

La funció de l'estructura de suport és tan la d'aguantar el túnel com la de permetre que la seva entrada i sortida encaixin amb les finestres.

L'estructura de suport es construirà amb els angles de ferro. La forma de l'estructura és com la d'una llitera, sobre la part superior de la qual s'aguantarà el túnel. El tram de l'entrada, fins a la tovera, tocarà directament l'estructura de llitera, mentre que la resta s'haurà de subjectar per mitjà de talls més petits de bigues de ferro, ja que es troba més alçada que la base de l'entrada. Totes les peces de ferro que formin l'estructura s'hauran de fixar soldant-les. A la Figura 5.4 es pot veure un esquema de l'estructura de suport.

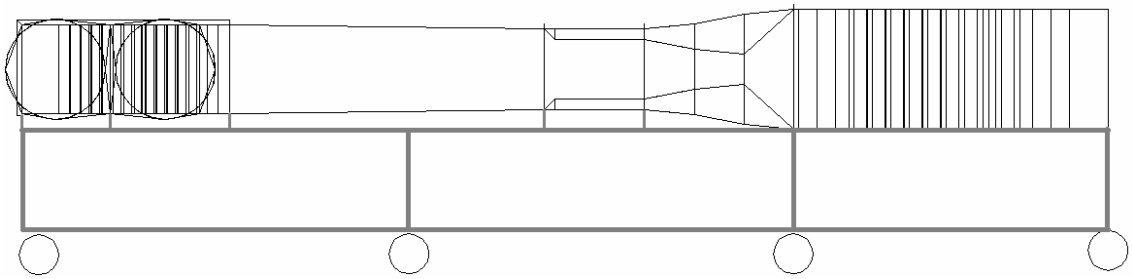


Figura 5.4: Esquema de l'estructura de suport.

Totes les subjeccions esmentades del túnel de vent a l'estructura principal es faran mitjançant platines de ferro subjectades a les parts inferiors de les llengües, com es pot veure a l'esquema de l'estructura de l'ANNEX 2. Pel que fa a la unió amb la primera llengua (la que uneix l'entrada amb la tovera, Figura 5.5), com que la primera zona del túnel es troba aguantada tota tocant la part superior de l'estructura, la primera llengua (vermella) talla les bigues (grises) i per això s'han de col·locar bigues verticals a costat i costat de la llengua.

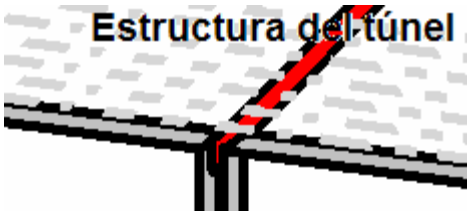


Figura 5.5:Esquema de l'estructura al punt de la primera llengua

Per assegurar la mobilitat del túnel de vent, sota l'estructura es col·locaran les vuit rodes de 10mm de diàmetre. D'aquestes rodes, quatre hauran de tenir fre, i seran les que aniran col·locades sota la part final del túnel, més propera al ventilador.

- **Unió**

Amb totes les parts construïdes i l'estructura soldada, es pot procedir a la unió de totes les parts per formar el túnel final. Per les unions entre llengües i entre aquestes i l'estructura es faran servir cargols de 8x60mm que es collaran cada 18cm aproximadament.

Les llengües que uneixen el ventilador amb el túnel de vent (dues en el cas del túnel gruixut i una en els altres dos) s'han de reforçar especialment amb dues capes de xapa d'alumini i capes extres de fibra de vidre, ja que cada ventilador pesa aproximadament 250 quilos.

5.3 Pressupost

A continuació hi ha els pressupostos previstos per a cada túnel de vent. Les quantitats de material s'han calculat mesurant les àrees i longituds de cada peça a cobrir amb els diferents elements.

Com s'ha esmentat al llarg del treball, el ventilador és de la casa Soler & Palau. Els preus de tots els materials de construcció han estat obtinguts a la botiga Servei Estació de Barcelona. Els deflectors surten de tubs d'acer de l'empresa Thisa, també de Barcelona.

- **Túnel prim**

A la Figura 4.2 es mostra una llista detallada de tots els productes que s'han d'adquirir, amb els seus corresponents preus, per poder realitzar la correcta construcció del túnel prim, que s'ha detallat en l'apartat anterior, de totes les parts del túnel.

Producte	Unitat	m^2	m	€/unitat	Preu
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x400mm)	-	0.48	-	117.23	56.27
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x300mm)	-	0.36	-	117.23	42.20
Resina sintètica (1kgr per unitat)	70.00	-	-	12.00	840.00
Plaques de conglomerat (2440x1220, 16mm)	15.00	-	-	24.47	366.98
Fibra de Vidre (Rollo de 1200x110000mm)	3.00	-	-	317.00	951.00
Massilla de Poliester (1Kgr)	1.00	-	-	13.30	13.30
Poliuretà	-	60.00	-	8.70	522.00
Precinte	1.00	-	-	2.50	2.50
Acetona (1litre)	1.00	-	-	5.15	5.15
Oli engranatge(0.5l)	1.00	-	-	6.90	6.90
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 8x60mm)	2.00	-	-	65.00	130.00
Rosques anti bloc (caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	35.00	70.00

Volanderes (caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	28.65	57.30
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 6x15mm)	2.00	-	-	14.70	29.40
Rosques anti bloc (caixa 100 unitats, 6mm)	2.00	-	-	3.60	7.20
Volanderes (caixa 100 unitats, 6mm)	2.00	-	-	3.50	7.00
Rodes amb fre (Φ=100mm, 90 kg)	2.00	-	-	11.50	23.00
Rodes sense fre (Φ=100mm, 90 kg)	6.00	-	-	14.60	87.60
Frontissa (60x60mm)	2.00	-	-	3.25	6.50
Baldó (25mm)	1.00	-	-	4.10	4.10
10 Angle Ferro (40x40cm, l=1m)	-		10.00	10.20	102.00
4 Angle Ferro (40x40cm, l=8.5m)	-		34.00	10.20	346.80
4 Angle Ferro (40x40cm, l=0.8)	-		3.20	10.20	32.64
Reixeta anti-turbulència	-	-	2.00	38.00	76.00
Pintura cautxú (1l)	1.00	-	-	7.00	7.00
Ventilador	1.00	-	-	3676.85	3676.85
Xapa d'Alumini	-	-	1.00	16.80	16.80
4 Xapa Alumini (600x 145mm)	-	-	3.47	16.80	58.30
Angle Alumini (40x40mm)	-	-	13.00	11.50	149.50
Cinta adhesiva (l=7.5m)	1.00			7.25	7.25
Peu	1.00	-	-	218.00	218.00
Cilindres d'acer (1200x300mm)	4.00	-	-	349.10	1396.40
					9315.93

Figura 5.6: Taula del pressupost previst pel túnel prim.

- **Túnel mitjà**

S'ha realitzat la mateixa operació per a tots mitjà i gros. La Figura 5.7 mostra el pressupost previst pel túnel mitjà.

Producte	Unitat	m^2	m	€/unitat	Preu
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x400mm)	-	1.44	-	117.23	168.81
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x300mm)	-	0.72	-	117.23	84.41
Resina sintètica (1kgr per unitat)	106.00	-	-	12.00	1272.00
Plaques de conglomerat (2440x1220, 16mm)	15.00	-	-	24.47	366.98
Fibra de Vidre (Rollo de 1200x110000mm)	3.00	-	-	317.00	951.00
Massilla de Poliester (1Kgr)	1.00	-	-	13.30	13.30
Poliuretà	-	60.00	-	8.70	522.00
Precinte	1.00	-	-	2.50	2.50
Acetona (1litre)	1.00	-	-	5.15	5.15
Oli engranatge(0.5l)	1.00	-	-	6.90	6.90
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 8x60mm)	2.00	-	-	65.00	130.00
Rosques anti bloc (caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	35.00	70.00
Volanderes(caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	28.65	57.30
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 6x15mm)	2.00	-	-	14.70	29.40
Rosques anti bloc (caixa 100 unitats,	2.00	-	-	3.60	7.20

6mm)					
Volanderes (caixa 100 unitats, 6mm)	2.00	-	-	3.50	7.00
Rodes amb fre (Φ=100mm, 90 kg)	2.00	-	-	11.50	23.00
Rodes sense fre (Φ=100mm, 90 kg)	6.00	-	-	14.60	87.60
Frontissa (60x60mm)	2.00	-	-	3.25	6.50
Baldó (25mm)	1.00	-	-	4.10	4.10
10 Angle Ferro (40x40cm, l=1m)	-		10.00	10.20	102.00
4 Angle Ferro (40x40cm, l=8.5m)	-		34.00	10.20	346.80
4 Angle Ferro (40x40cm, l=0.8)	-		3.20	10.20	32.64
Reixeta anti-turbulència	-	-	2.00	38.00	76.00
Pintura cautxú (1l)	1.00	-	-	7.00	7.00
Ventilador	1.00	-	-	3676.85	3676.85
Xapa d'Alumini	-	-	6.36	16.80	106.85
4 Xapa Alumini (600x 145mm)	-	-	1.00	17.80	17.80
Angle Alumini (40x40mm)	-	-	13.00	11.50	149.50
Cinta adhesiva (l=7.5m)	1.00			7.25	7.25
Peu	1.00	-	-	218.00	218.00
Cilindres d'acer (1200x300mm)	4.00	-	-	349.10	1396.40
					9952.23

Figura 5.7: Taula del pressupost previst pel túnel mitjà.

- **Túnel gruixut**

Per últim, a la Figura 5.8 es mostra la taula realitzada pel túnel gruixut. Com s'observa la gran diferència amb els altres dos prototips, a part de l'augment de les dimensions que provoca un augment de la fibra de vidre necessària, és la necessitat d'adquirir dos ventiladors que implica un augment significatiu del pressupost final.

Producte	unitat	m^2	m	€/unitat	Preu
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x400mm)	-	1.60	-	117.23	187.57
2 Plaques de Metacrilat (8mm, 600x300mm)	-	1.28	-	117.23	150.05
Resina sintètica (1kgr per unitat)	138.00	-	-	12.00	1656.00
Plaques de conglomerat (2440x1220, 16mm)	15.00	-	-	24.47	366.98
Fibra de Vidre (Rollo de 1200x110000mm)	6.00	-	-	317.00	1902.00
Massilla de Poliester (1Kgr)	1.00	-	-	13.30	13.30
Poliuretà	-	60.00	-	8.70	522.00
Precinte	1.00	-	-	2.50	2.50
Acetona (1litre)	1.00	-	-	5.15	5.15
Oli engranatge(0.5l)	1.00	-	-	6.90	6.90
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 8x60mm)	2.00	-	-	65.00	130.00
Rosques anti bloc (caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	35.00	70.00
Arandelas (caixa 100 unitats, 8mm)	2.00	-	-	28.65	57.30
Cargols acer inoxidable (caixa 100 unitats, 6x15mm)	2.00	-	-	14.70	29.40

Rosques anti bloc (caixa 100 unitats, 6mm)	2.00	-	-	3.60	7.20
Arandelas (caixa 100 unitats, 6mm)	2.00	-	-	3.50	7.00
Rodes amb fre (Φ=100mm, 90 kg)	2.00	-	-	11.50	23.00
Rodes sense fre (Φ=100mm, 90 kg)	6.00	-	-	14.60	87.60
Frontissa (60x60mm)	2.00	-	-	3.25	6.50
Baldó (25mm)	1.00	-	-	4.10	4.10
10 Angle Ferro (40x40cm, l=1m)	-		10.00	10.20	102.00
4 Angle Ferro (40x40cm, l=8.5m)	-		34.00	10.20	346.80
4 Angle Ferro (40x40cm, l=0.8)	-		8.40	10.20	85.68
Reixeta anti-turbulència	-	-	2.00	38.00	76.00
Pintura cautxú (1l)	1.00	-	-	7.00	7.00
Ventilador	2.00	-	-	3676.85	7353.70
Xapa d'Alumini	-	-	6.36	16.80	106.85
4 Xapa Alumini (600x 145mm)			2.00	16.80	33.60
Angle Alumini (40x40mm)	-	-	13.00	11.50	149.50
Cinta adhesiva (l=7.5m)	1.00			7.25	7.25
Peu	2.00	-	-	218.00	436.00
Cilindres d'acer (1200x300mm)	4.00	-	-	349.10	1396.40
Cilindres d'acer (1200x500mm)	3.00	-	-	581.83	1745.50
					17080.83

Figura 5.8: Taula del pressupost previst pel túnel gruixut.

- **Total**

La Figura 5.9 mostra la comparativa dels pressupostos previstos pels tres túnelsentre els tres túnels.

Tipus de Túnel	Preu (€)
Prim	9315.93
Mitjà	9952.23
Gros	17080.83

Figura 5.9: Comparativa dels preus previstos finals.

Finalment, també s'inclouen els salaris estimats (Figura 5.10) considerant que es necessitarien dos constructors treballant la durada dels 18 crèdits d'un TFC (180 hores), contant el sou de becari mitjà.

Hores de treball	€/hora	hora	Preu
Diseñador del Túnel	5.41	180.00	973.80
Constructor 1	5.41	180.00	973.80
Constructor 2	5.41	180.00	973.80
			2921.40

Figura 5.10: Pressupost previst en personal.

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS

A l'inici d'aquest projecte, l'objectiu era dissenyar un túnel de vent pel laboratori d'aeronàutica de l'EPSC, i deixar a punt una guia per la seva construcció. L'escola va marcar certs requisits que havia de complir el túnel, ja que estava previst que, un cop construït es pogués utilitzar per a la investigació i la docència.

Per fer-ho va caldre adquirir els coneixements teòrics necessaris sobre túnels de vent i aprofitar els apresos al llarg de la carrera. Els primers capítols estant dedicats a aquesta teoria. Com es menciona al primer capítol de l'apartat 2.1: "La primera decisió que ha de prendre un enginyer a l'hora de dissenyar un túnel de vent és si el túnel serà de circuit obert o tancat.". Per raons econòmiques i d'espai es va optar pel disseny d'un túnel de vent de circuit obert.

El problema del circuit obert, però, és que provoca el moviment de l'aire al seu voltant, i si es troba dins d'una cambra tancada pot arribar a disminuir el seu rendiment a causa del canvis de pressió que ell mateix provoca per tota l'habitació. A més, la velocitat i les dimensions requerides (80 m/s i 1 m^2 a la cambra d'assaig) causarien un autèntic vendaval a dins del laboratori provocant molèsties a la resta d'equips. La única solució és que el túnel de vent utilitzés aire de l'exterior, i per això el disseny és en forma de U: l'entrada i la sortida connectada a dues finestres.

El fet de estar connectat amb l'exterior limitava la seccions d'entrada i sortida a la mida de les finestres del laboratori. Això vol dir que només es podien usar ventiladors amb diàmetres inferiors a l'altura de les finestres. El model amb aquesta limitació capaç de moure un cabal més gran d'aire i amb un preu assequible és el TGT/9-1000-4/-22 de la marca Soler & Palau.

Amb aquestes pautes, doncs, es va procedir al disseny preliminar i la creació d'una geometria inicial per després poder realitzar la primera simulació en 2D amb el FLUENT. Els resultats van mostrar que no es complien els requisits: Si es feia servir una cambra d'assaig amb la mida requerida no s'arribava la velocitat requerida. Si es volia arribar a la velocitat, s'havia de fer més petita la cambra d'assaig.

De manera que, vist que no es podia crear un túnel (amb els medis dels que es disposava) que reunís tots els requeriments imposats per l'escola, es va procedir a canviar l'enfocament del projecte: es farien 3 dissenys diferents de túnels de vent: cadascun amb les seves avantatges i inconvenients davant del altres, de manera que es presentarien tres opcions per al futur encarregat d'avaluar-les i decidir-se per la més adequada.

Els tres túnels s'anomenarien prim, mitjà i gruixut. El prim seria el túnel que arribaria a més velocitat, però amb la mida de cambra d'assaig més petita i fent servir un únic ventilador. El mitjà seria igual que el prim, però amb la cambra d'assaig més gran, de manera que seria el de menys velocitat. Finalment, el

túnel gruixut tindria una cambra d'assaig gran, com la del mitjà, i arribaria a velocitats properes a les del túnel prim, per la qual cosa necessitaria dos ventiladors.

Per poder arribar als dissenys finals del túnels de vent proposats va ser essencial poder simular-los amb el software CFD FLUENT, pel qual es necessita crear malles en GAMBIT, de manera que va ser necessari assimilar el funcionament dels dos programes per fer-los anar amb eficiència. Al treball també es presenten els coneixements teòrics bàsics d'aquests softwares, i s'ha confeccionat una annex amb el Compendi de trucs útils i solucions als problemes típics que es presenta treballant amb el GAMBIT.

A la Figura 6.1 es presenta una taula comparativa amb les característiques més important dels tres ventiladors, que són velocitat, dimensions i nombre de Reynolds de la cambra d'assaig i cost de la construcció.

	Cambra d'assaig			Cost previst de la construcció
	Velocitat	Dimensions	Nombre de Reynolds	
Túnel prim	~ 60 m/s	0.6 x 0.6 m	2.3·106	9315.93 €
Túnel mitjà	~ 30 m/s	0.8 x 0.8 m	1.6·106	9952.23 €
Túnel gruixut	~ 50 m/s	0.8 x 0.8 m	1.6·106	17080.83 €

Figura 6.1: Taula comparativa entre els 3 túnels de vent

Després de la realització d'un túnel de vent que és a mig camí entre circuit obert i circuit tancat, s'ha observat que és el rendiment del túnel el que al final es veu disminuït en un túnel així. El lloc on es va haver de dissenyar el túnel de vent va fer que aquest hagués d'assumir la sobrecàrrega energètica que correspon als túnels oberts. A més també va haver d'assumir les pèrdues a causa dels girs pels que s'ha de fer passar l'aire, i tot això amb una mida de ventilador que depenia de la mida de les finestres i que per tant no podia ser tant gran com hagués correspost a un túnel de circuit obert d'aquestes dimensions. Aquestes són les principals causes que han fet que al final no es poguessin assumir del tot els requeriments de l'escola, però, tot i així, els dissenys permeten acostar-s'hi considerablement amb un cost estimat prou assequible.

CAPÍTOL 7. REFERÈNCIES

[1] B. Barlow, J.; H. Rae, W, Jr.; Pope, A., “Low-Speed Wind Tunnel Testing”, Ed. John Wiley & Sons, Estats Units, 1999, 3a edició.

[2] R. Henry, J., “Wartime Report: Desing of Power-Plants Installations Pressure-Loss Characteristics of Duct Components”, National Advisory Commitee For Aeronautics, Estats Units, 1944.

[3] Ames Reserch Staff, “Report 1135: Equations, Tables and Charts for Compressible Flow”, National Advisory Commitee For Aeronautics, Washington, 1953.

[4] Túnels de vent aerodinàmics, Pràctiques d’aerodinàmica, Aerodinàmica I.

[5] www.wikipedia.com Wikipedia, Enciclopèdia digital.

[6] John D. Anderson Jr., “Fundamentals of Aerodynamics”, Ed. Mc Graw Hill, Tercera edició, 2001.

[7] FLUENT, ANSYS, Inc., FLUENT 6.2 User's Guide,

[8] Ruiz de Adana Santiago, Manuel M., “Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al control de las mermas de vino en naves de crianza climatizadas”, Tesis Doctoral, Universitat de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2004.

CAPÍTOL 8. ANEXES

1.
Document de Soler & Palau amb les especificacions tècniques del model TGT 1000, escollit per als dissenys.

2.
Document amb les vistes dels diferents dissenys dibuixats, amb totes les mides acotades: dissenys preliminars i dissenys finals.

3.
Compendi de trucs útils i solucions als problemes típics que es presenta treballant amb el GAMBIT.

4.
Malles provades abans de l'elecció de la definitiva, amb els corresponents resultats aconseguits amb cada una.

ANNEX 1. Corbes característiques del ventilador escollit.

– Q = Caudal en m³/h y m³/s.
– Pe = Presión estática en mm.c.d.a y Pa. – Aire seco normal a 20 °C y 760 mm c.d. Hg.
– Ensayos realizados de acuerdo a Normas UNE 100-212-89 BS 848, Part 1; AMCA 210-85 y ASHRAE 51-1985.

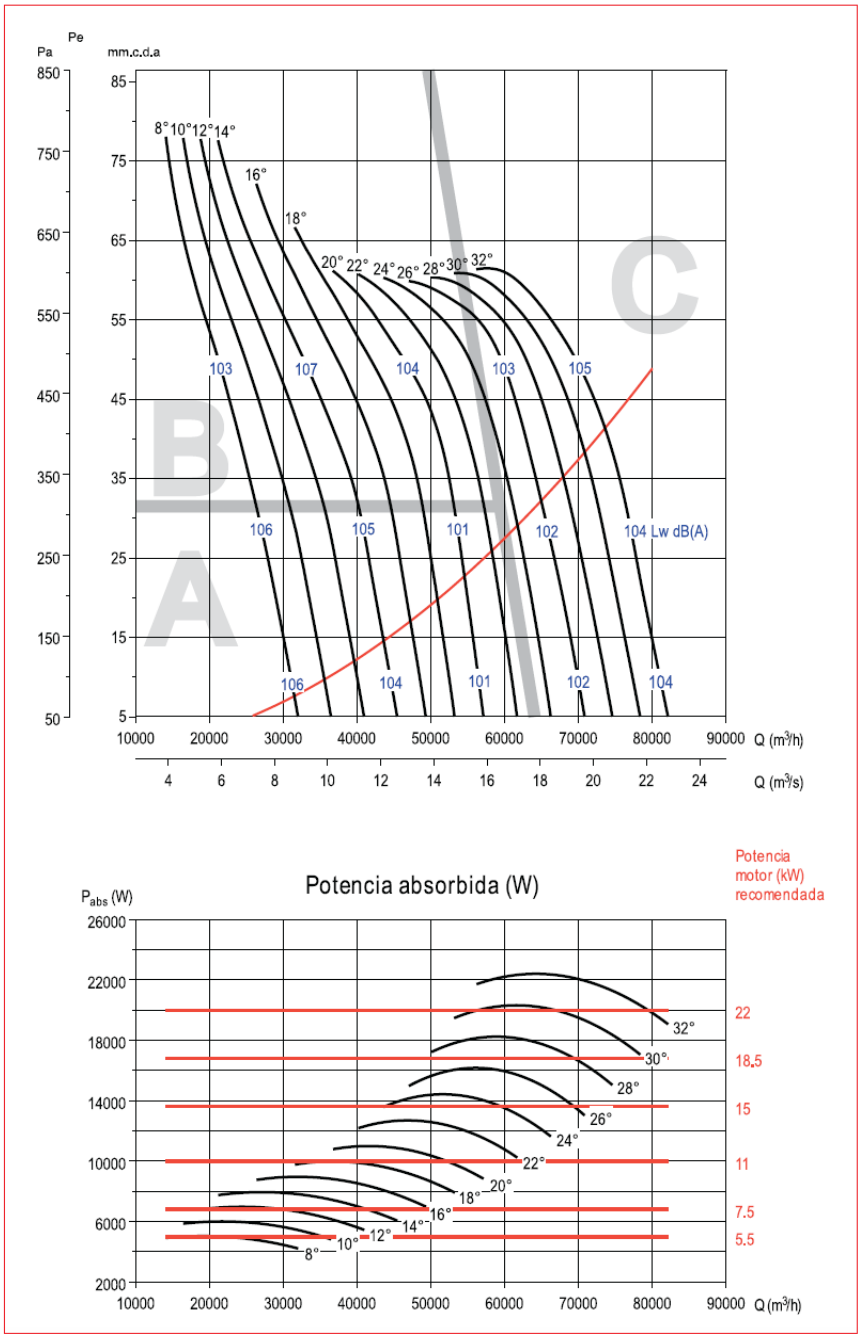
LOS VALORES DE RUIDO DADOS EN LAS GRAFICAS CORRESPONDEN A POTENCIAS SONORAS (Lw dB(A)). PARA TRANSFORMAR A PRESION SONORA (Lp dB(A))

THGT / TGT	
Número de polos	4
Diámetro nominal (mm)	1000
Número de palas	9

THGT/4-1000-9/_°-_ kW
TGT/4-1000-9/_°-_ kW

Hz	A	B	C
63	40	38	32
125	26	19	19
250	14	9	11
500	6	5	7
1000	4	5	5
2000	7	7	6
4000	12	13	10
8000	20	21	17

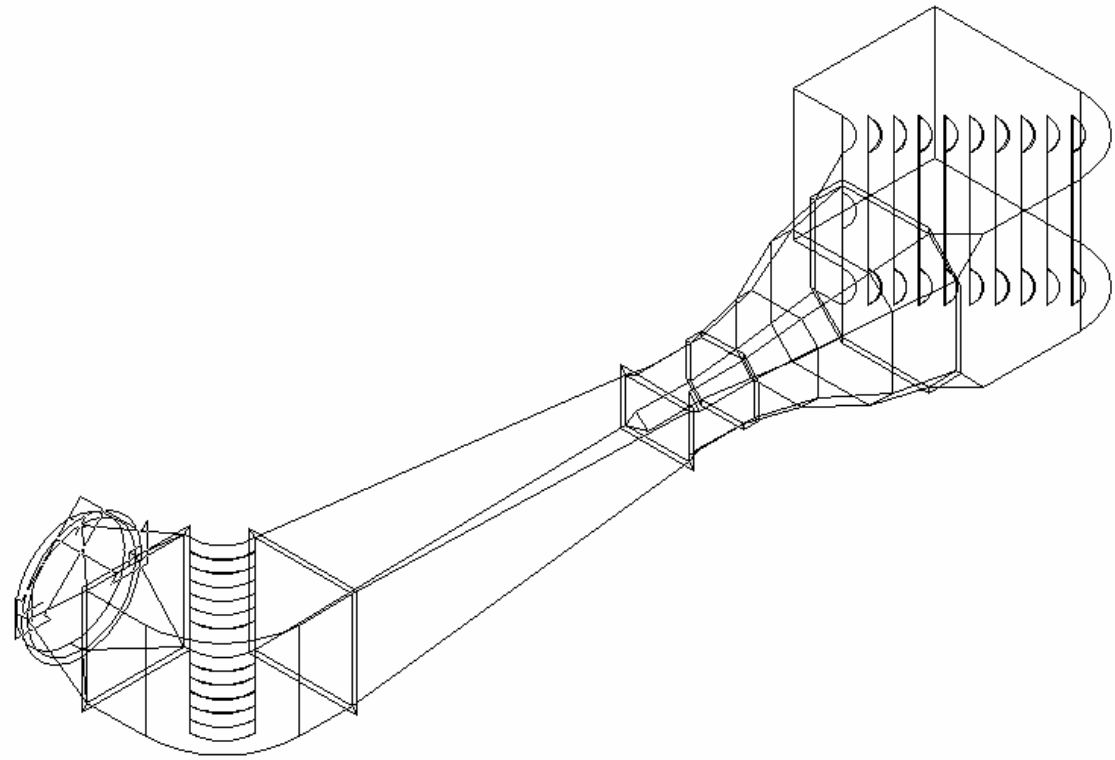
Tabla de factores de correción para el cálculo de los espectros de nivel sonoro.



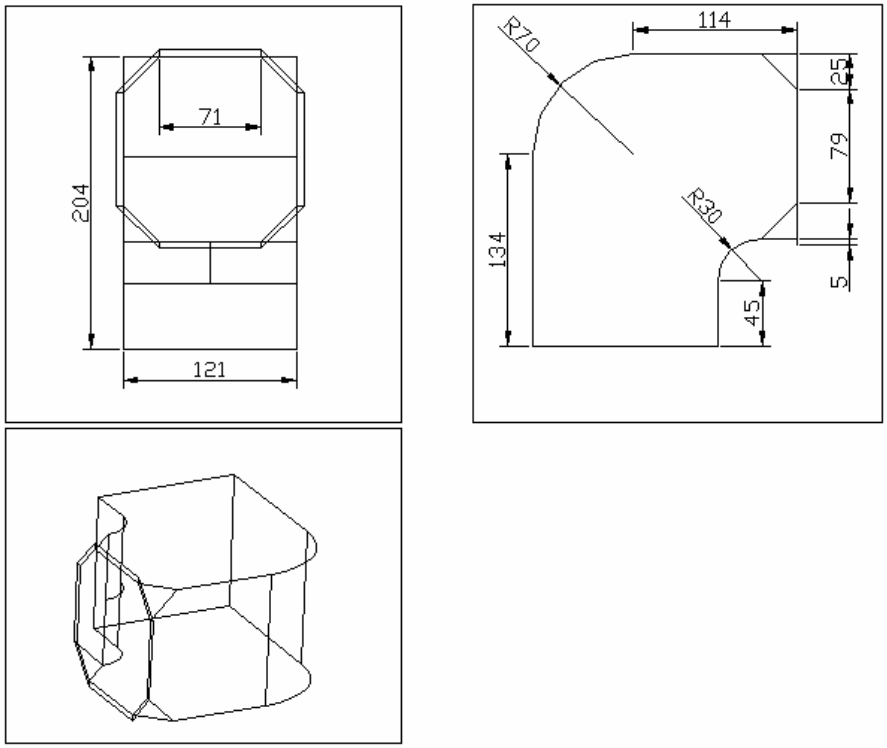
ANNEX 2. Document amb les vistes acotades: dissenys preliminars i dissenys finals.

Dins d'aquest annex es troben, per cadascun dels dissenys: vistes de les geometries finals i les seves parts acotades, el format dels deflectors i vistes de les estructures de suport.

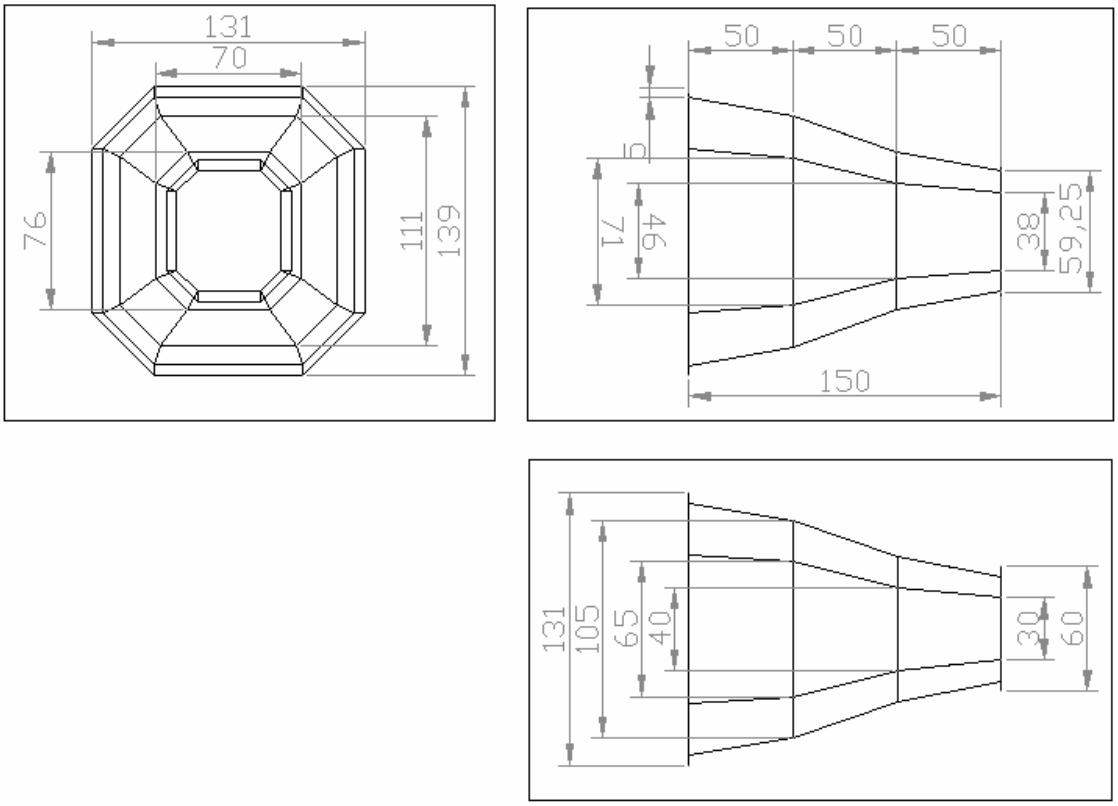
- **Túnel prim**



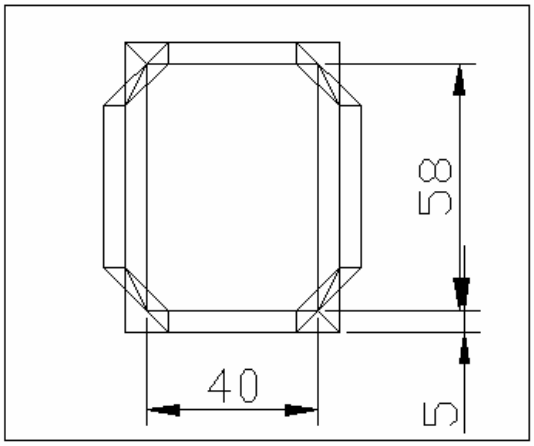
Corba d'entrada:

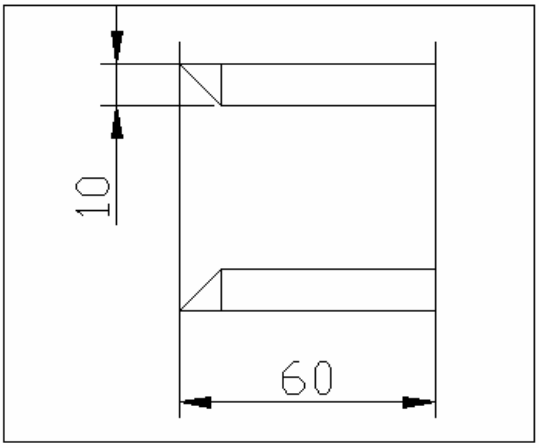


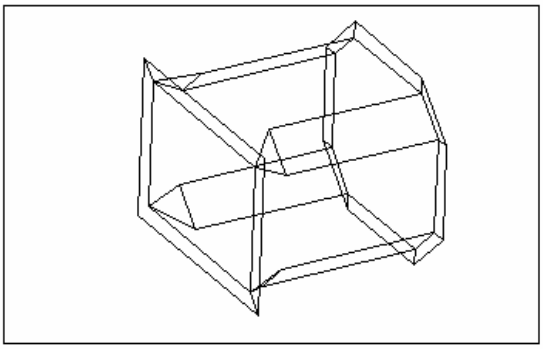
Tovera:



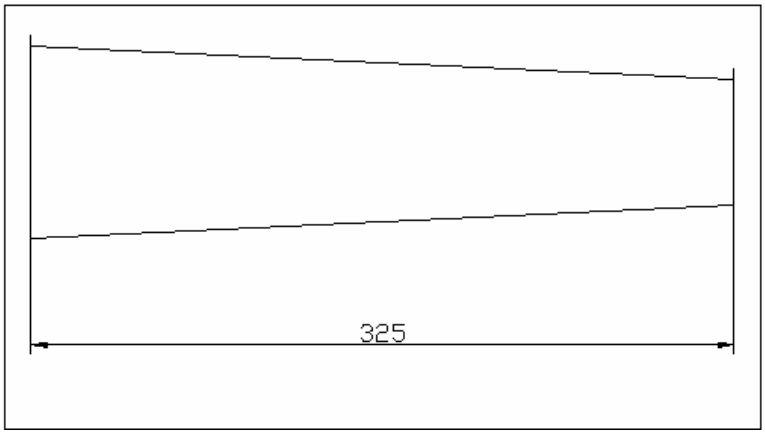
Cambra d'assaig:

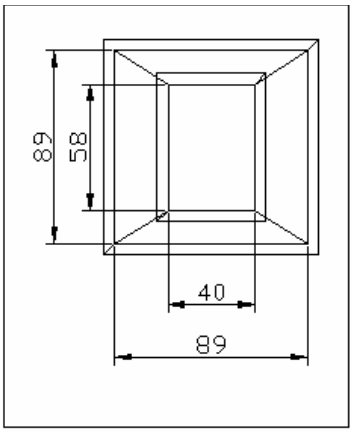




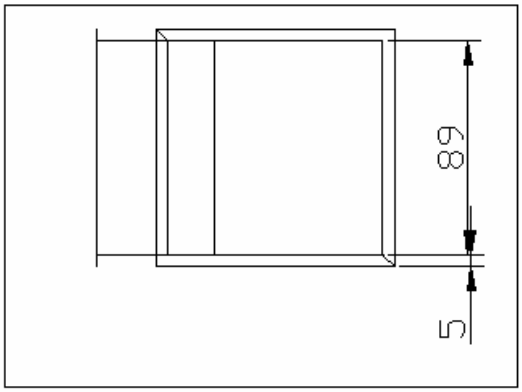


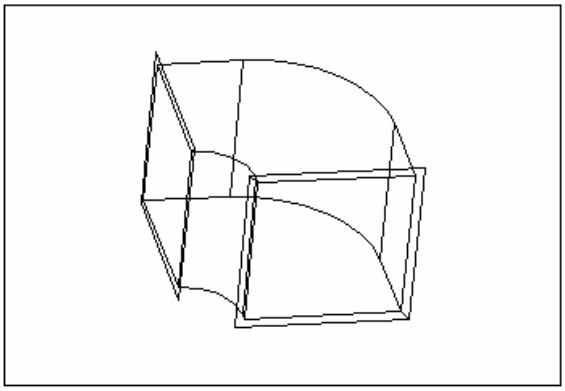
Difusor:

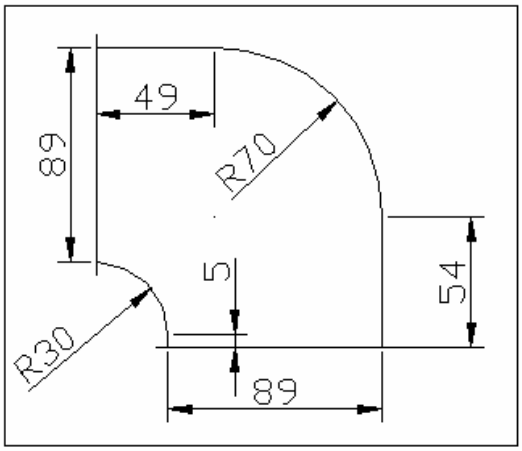




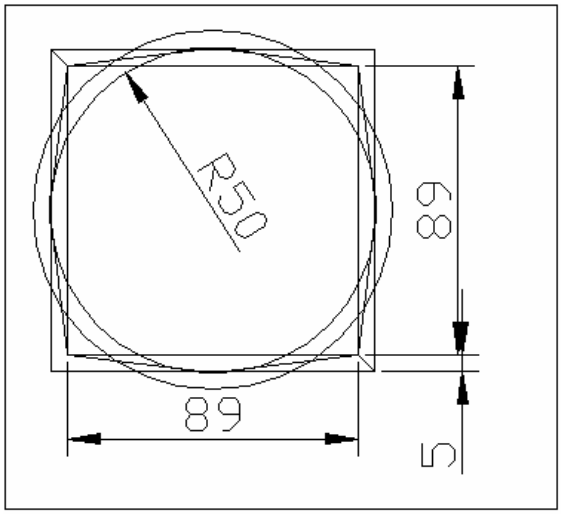
Corba Sortida:

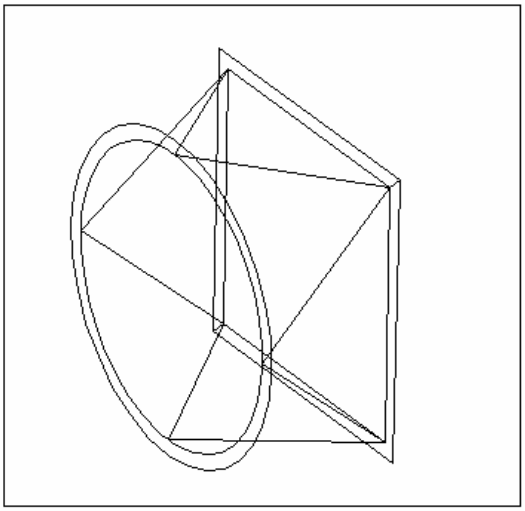


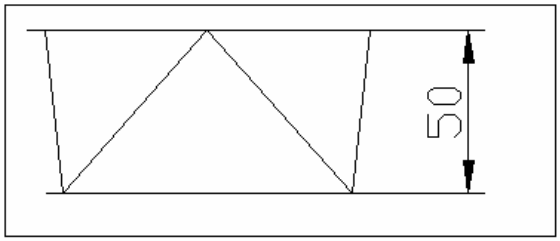




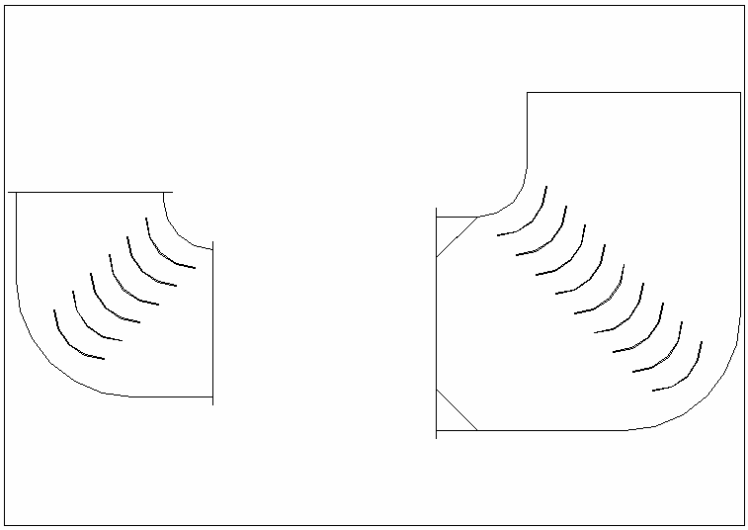
Acoblament:







Deflectors:



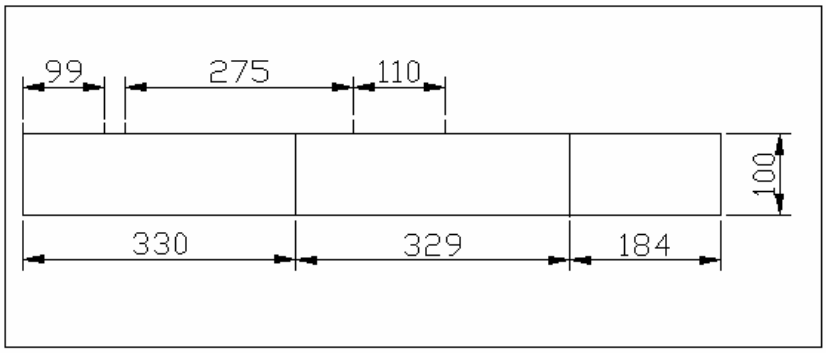
A la corba d'entrada:

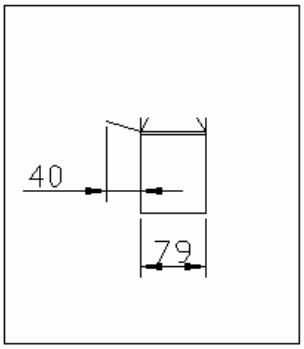
Num. de deflectors	9
Radi	30

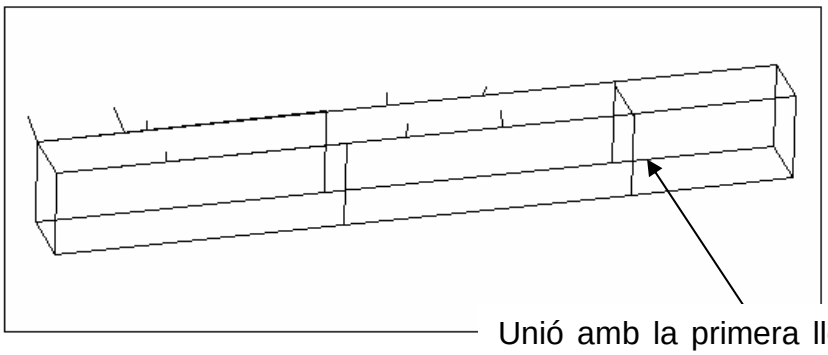
A la corba de sortida:

Num. de deflectors	6
Radi	30

Suport:



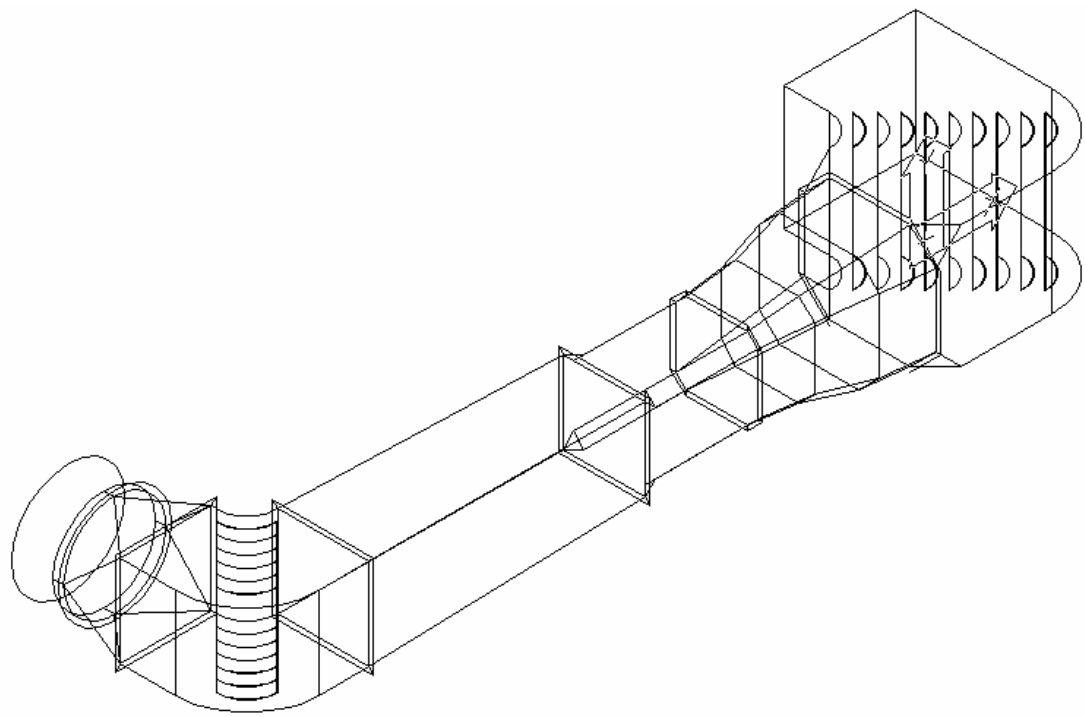




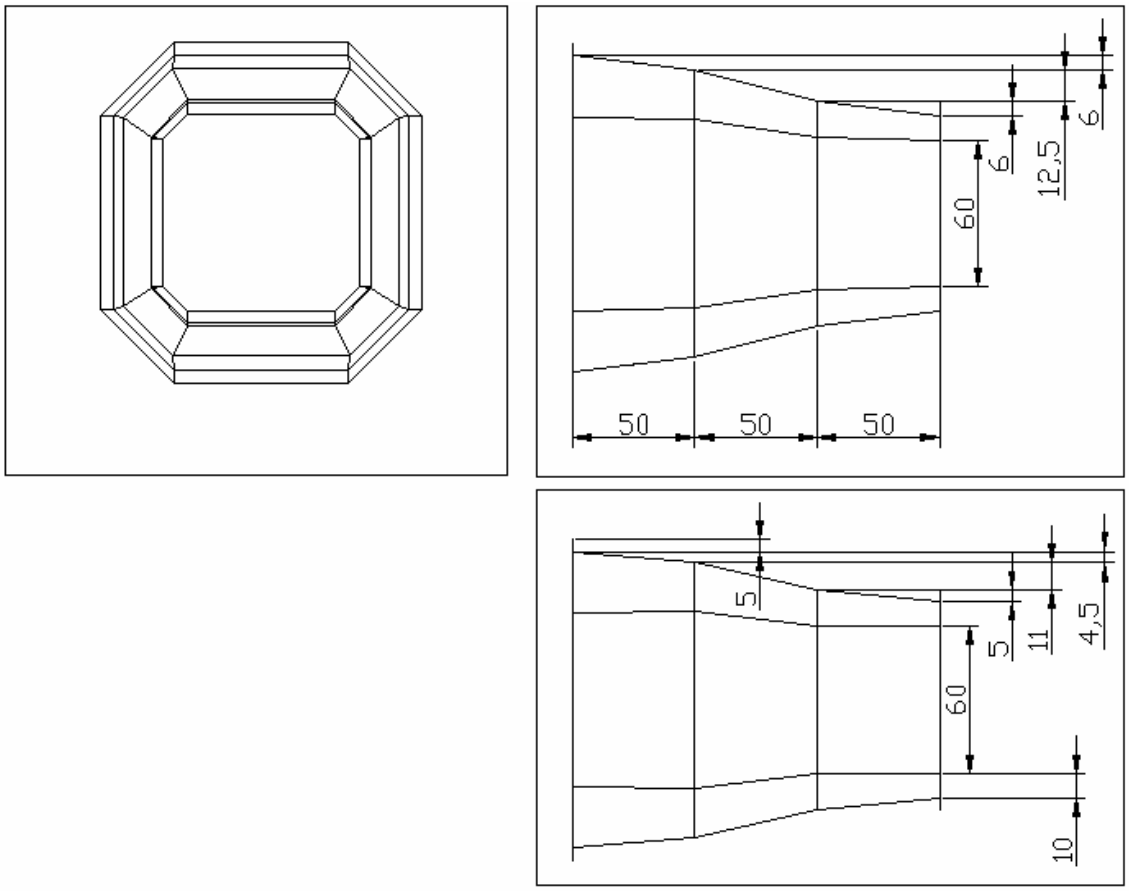
Unió amb la primera llengua (doble columna, una per cada costat de la llengua)

- **Túnel mitjà**

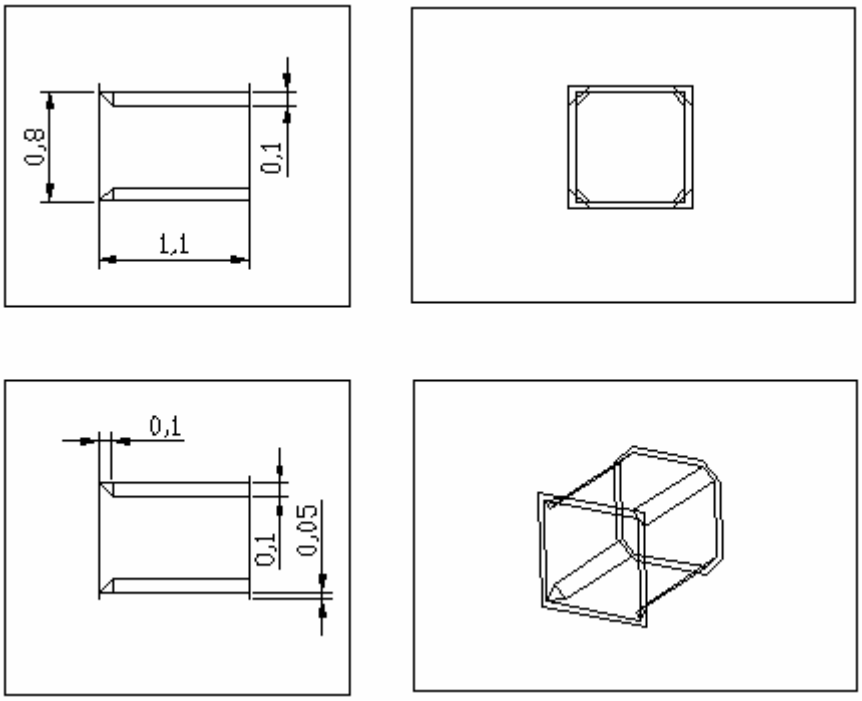
El disseny del túnel mitjà coincideix amb el túnel prim en les corbes d'entrada i sortida i en l'acoblament. Per tant, també té en comú el format dels deflectors i l'estructura suport.



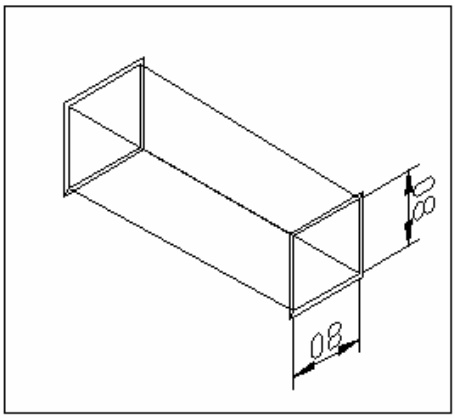
Tovera:

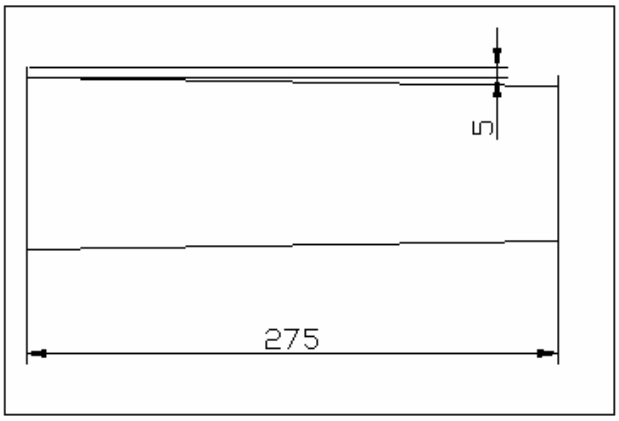


Cambra d'assaig:

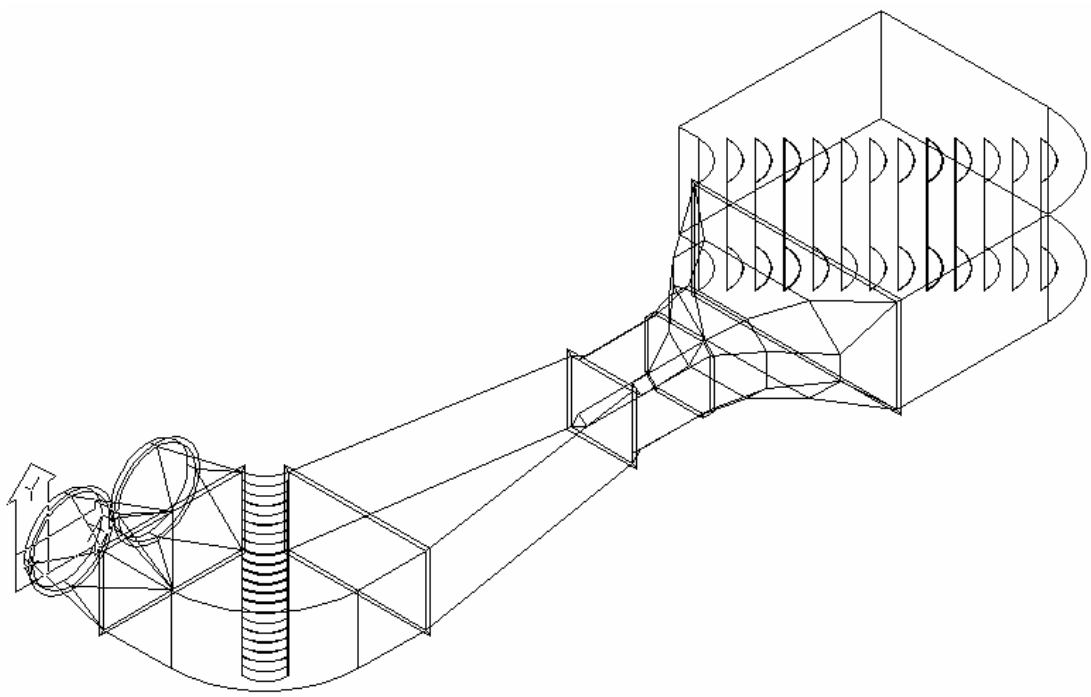


Difusor:

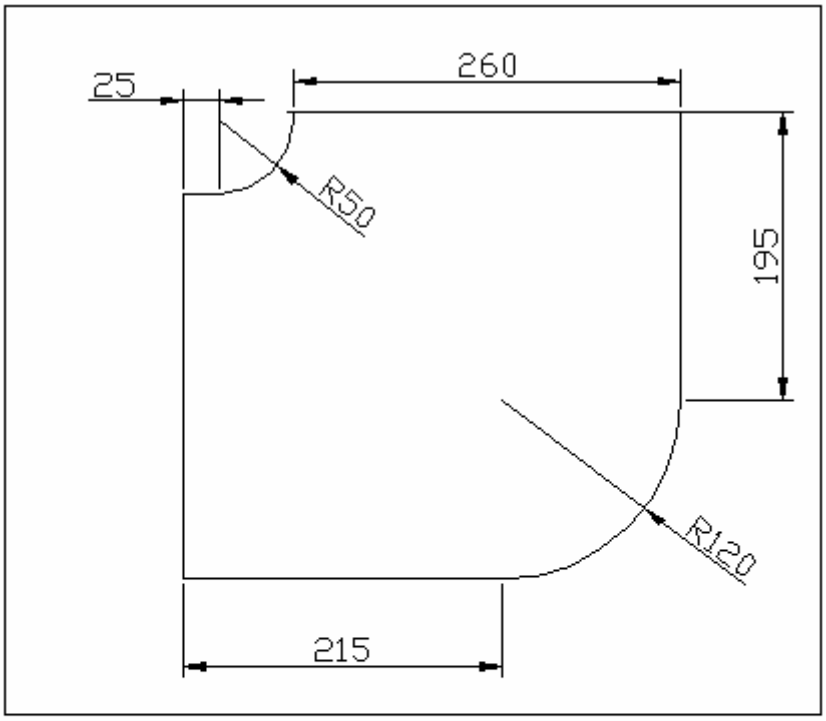


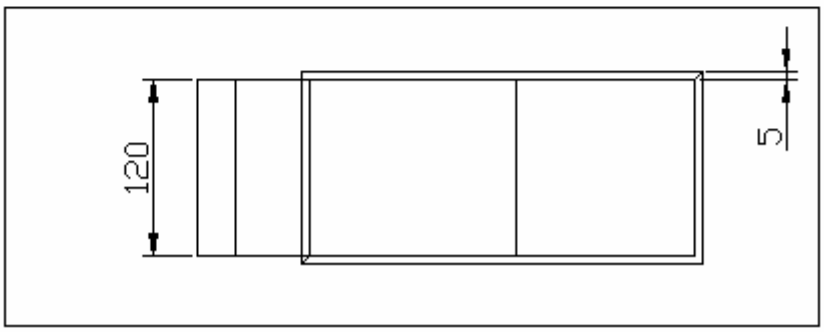


- **Túnel gruixut**

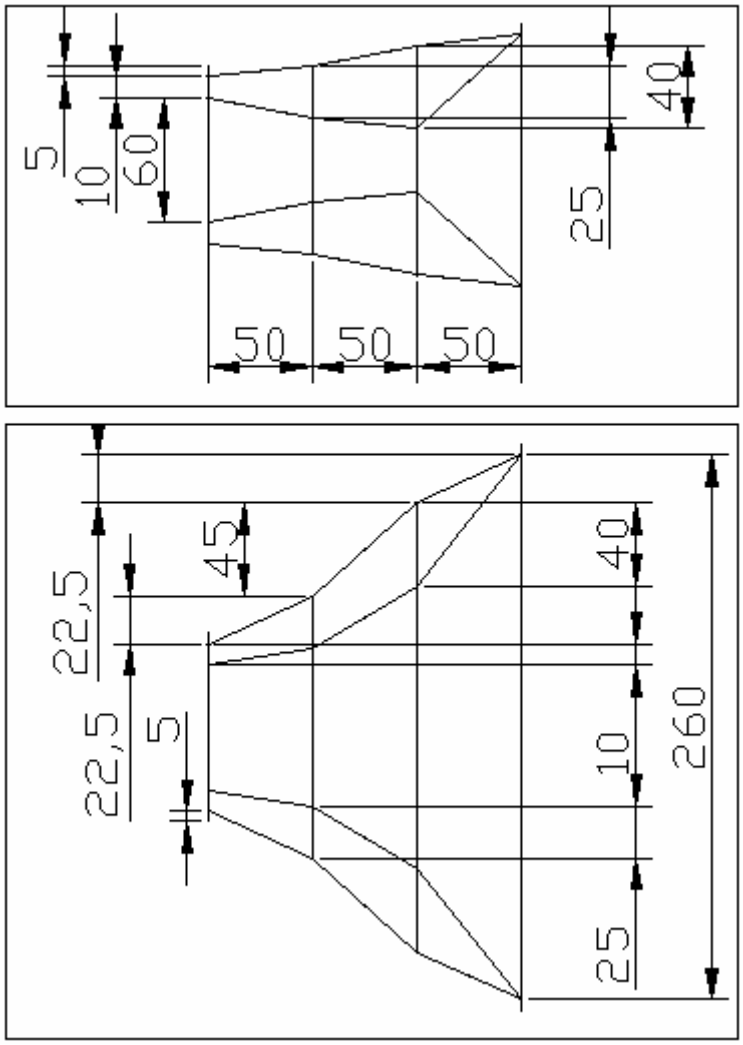


Corba d’entrada:

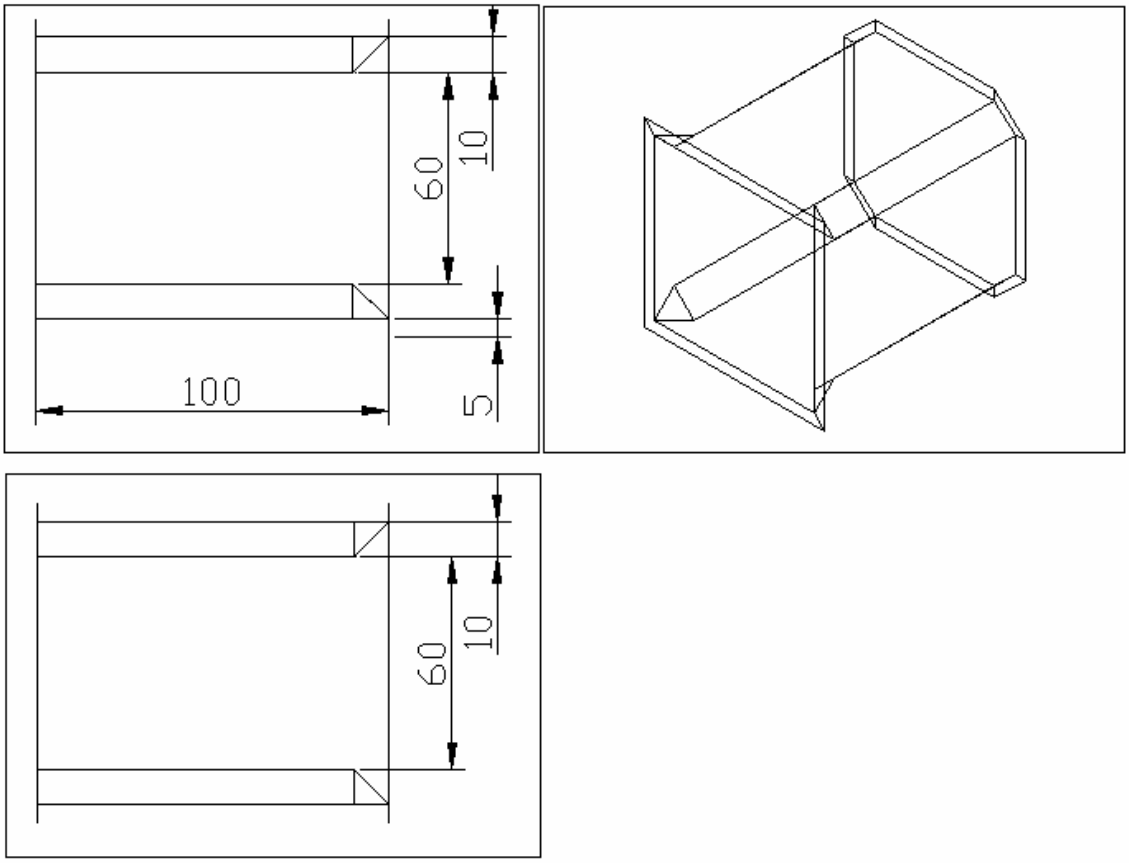




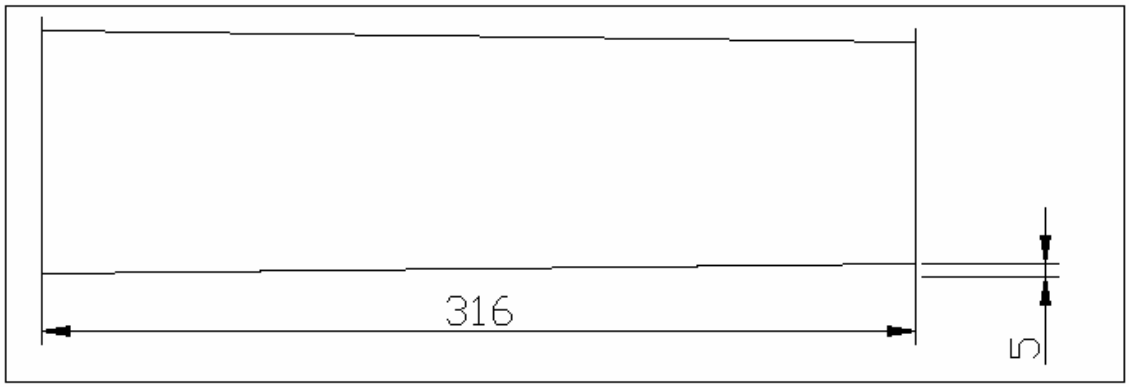
Tovera:

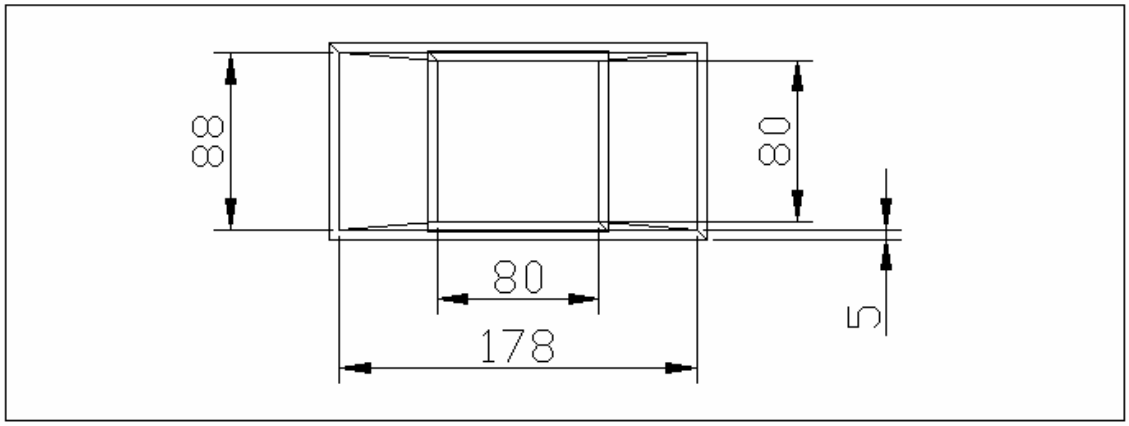


Cambra d’assaig:

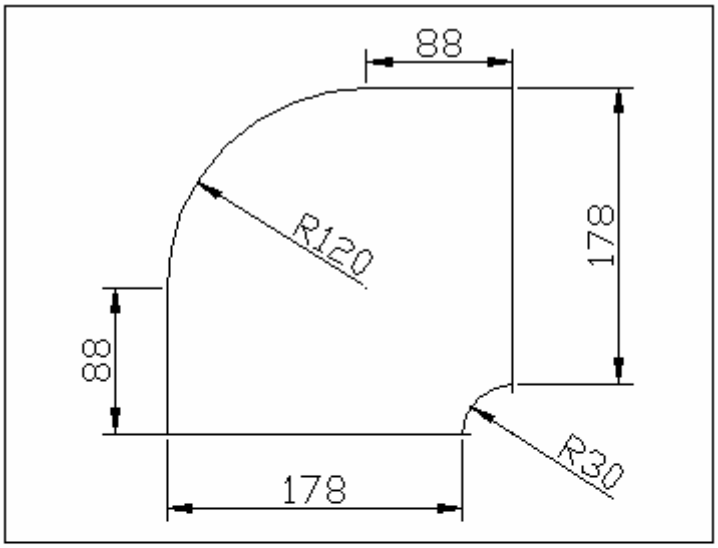


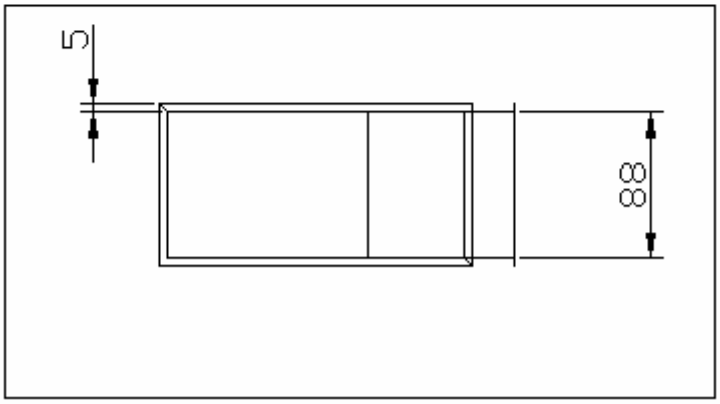
Difusor:



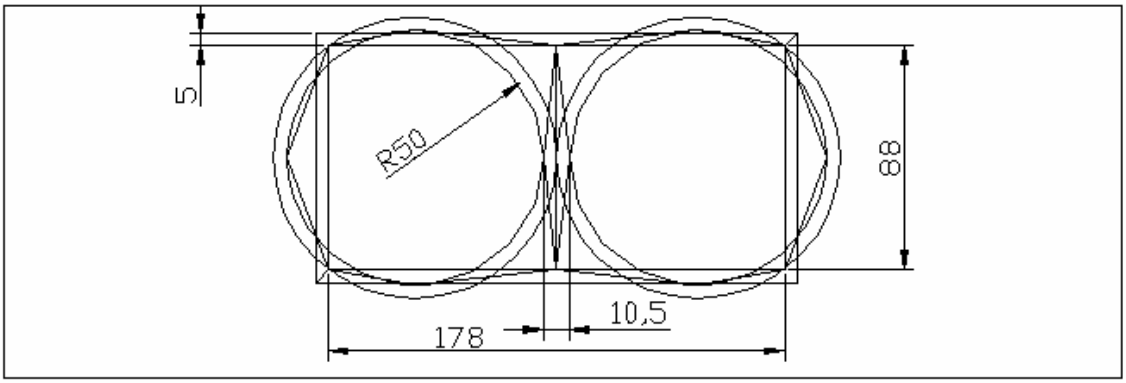


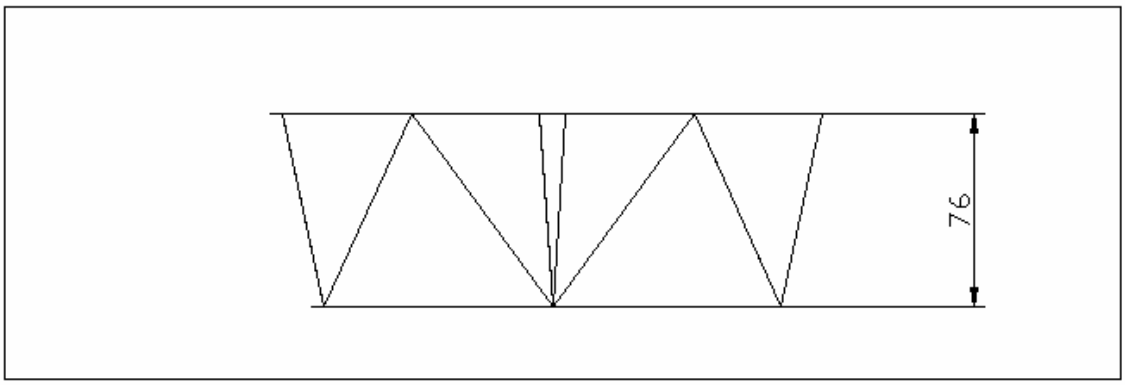
Corba de sortida:



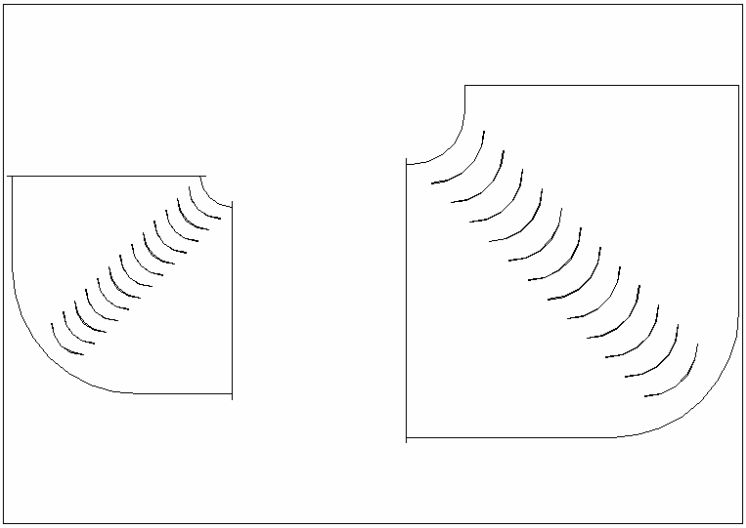


Acoblament:





Deflectors:



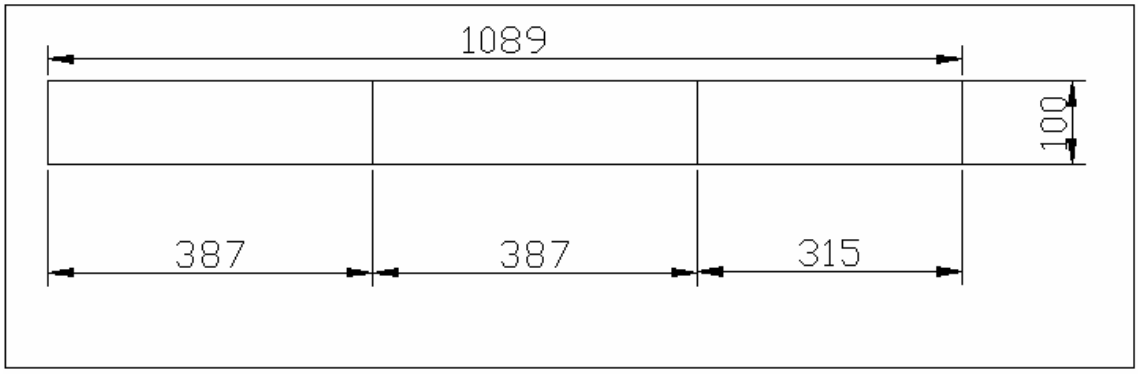
A la corba d'entrada:

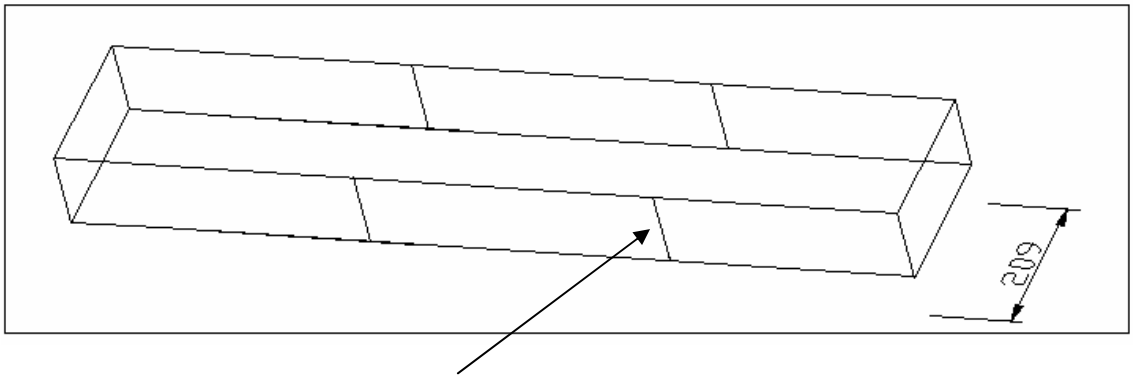
Num. de deflectors	12
Radi	50

A la corba de sortida:

Num. de deflectors	13
Radi	30

Suport:





Tall de la primera llengua (doble columna)

ANNEX 3. Conjunt de proves amb diferents malles per trobar la òptima.

Com s'explica al document, es necessari provar diferents malles per arribar a la que ofereixi uns resultats suficientment realistes amb el mínim nombre d'elements, per així efectuar el càlcul amb el mínim cost en temps de computació.

En les pròximes pàgines es mostren les diferents malles provades: una imatge ampliada i un diagrama de velocitats de cadascuna. En tots els casos s'ha fet servir la geometria 2D del disseny preliminar del túnel prim (és igual la geometria que es faci servir ja que només importa la diferència entre els resultats).

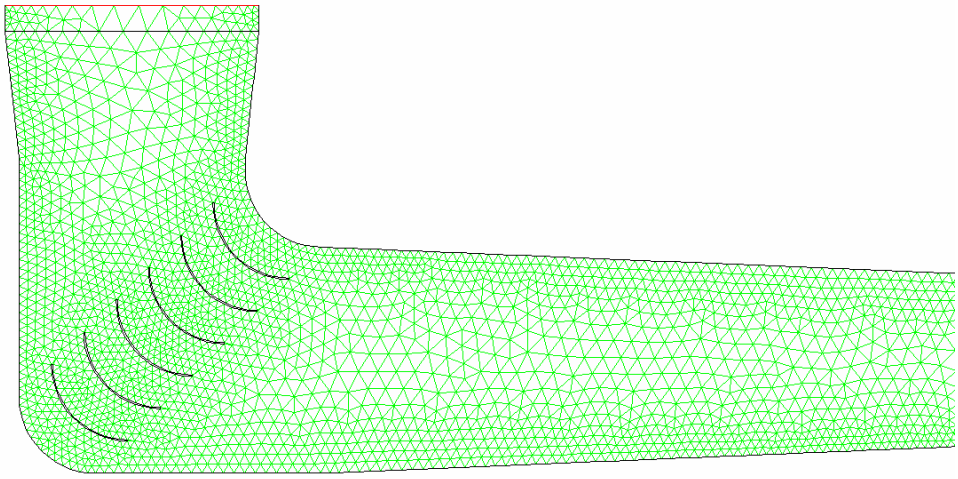
El procés de tria és el de provar malles cada vegada més precises fins arribar a uns resultats molt semblants als anteriors. Aleshores la malla escollida és l'anterior per ser la menys precisa amb bons resultats.

MALLA 1

Size Function:

Start Size	**3**
Growth Rate	**1.2**
Size Limit	**10**

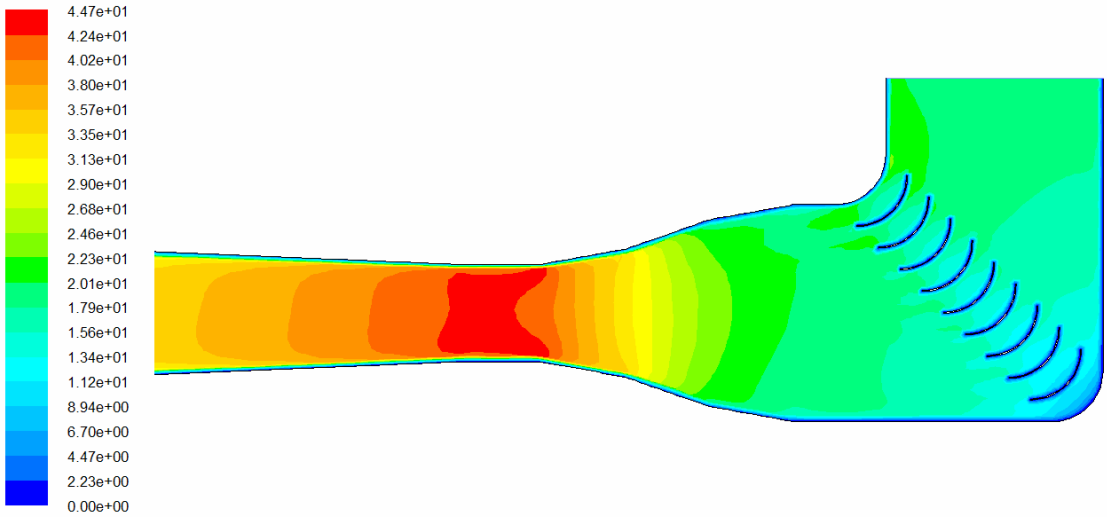
Foto de la malla:



Grid

Jul 02, 2007
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, ske)

Contorns de velocitat:



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

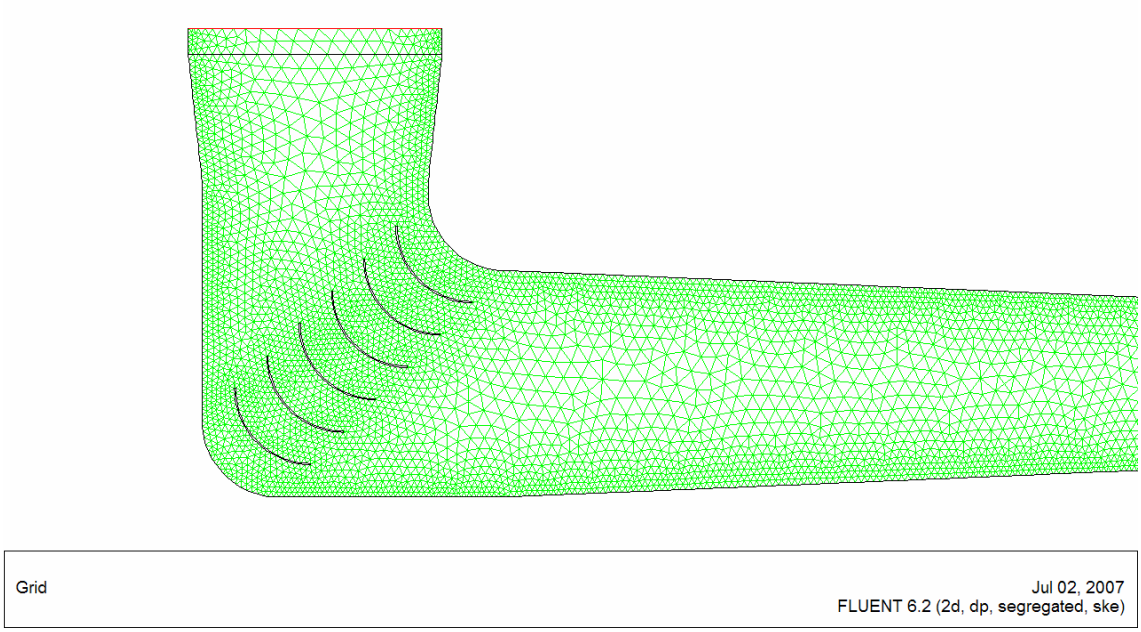
Jul 02, 2007
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, ske)

MALLA2

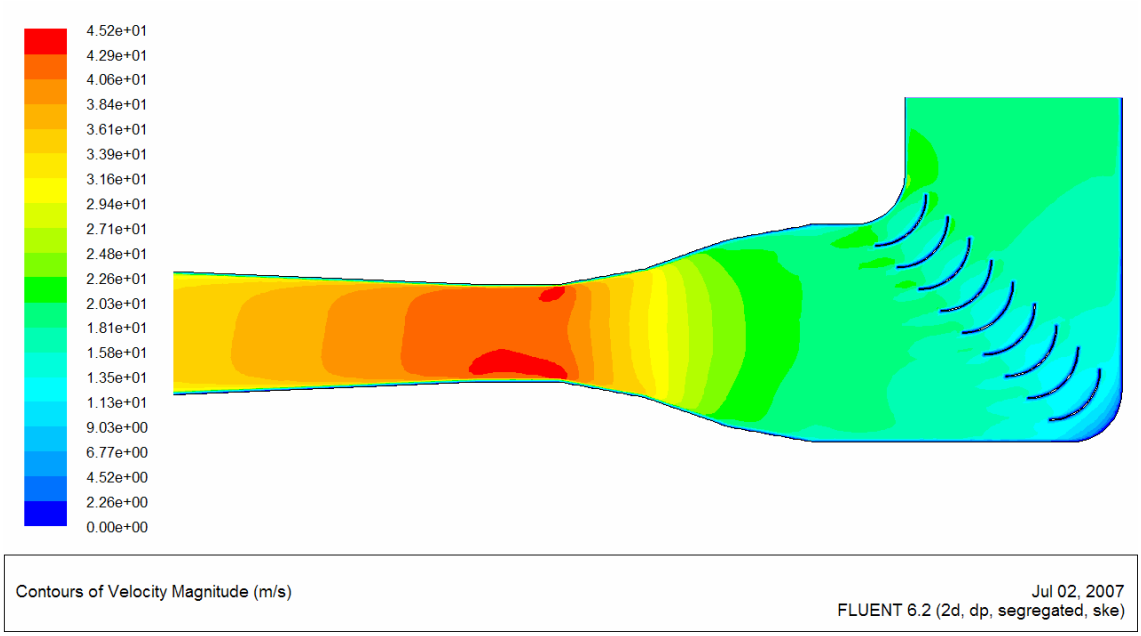
Size Function:

Start Size	**2**
Growth Rate	**1.2**
Size Limit	**8**

Foto de la malla:



Contorns de velocitat:



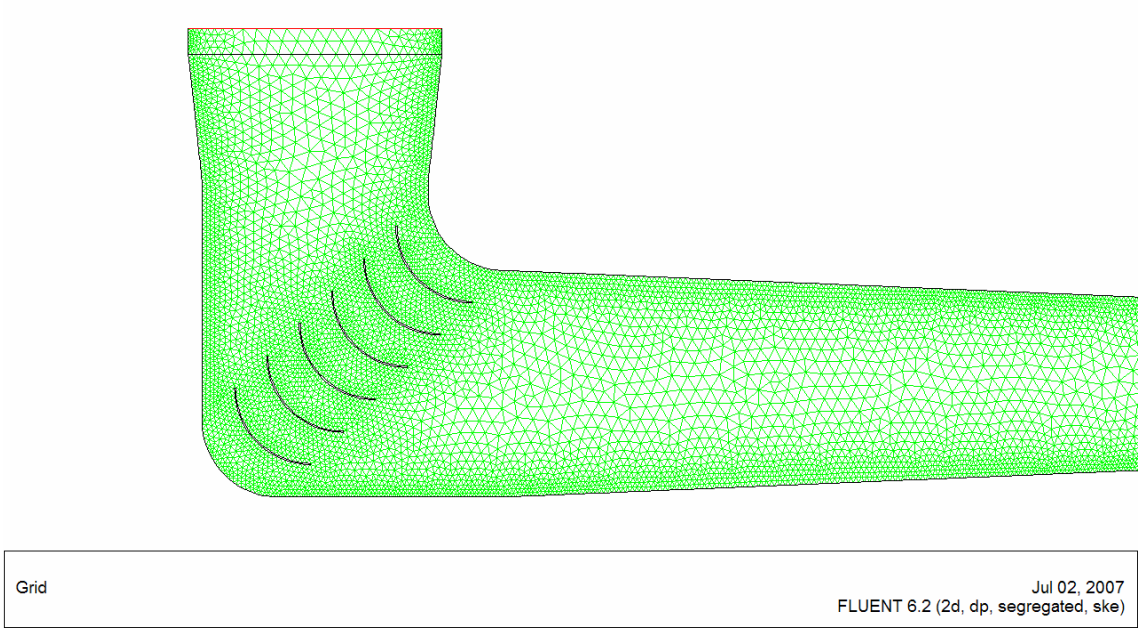
El perfil canvia molt respecte l'anterior. L'anterior es descarta.

MALLA3

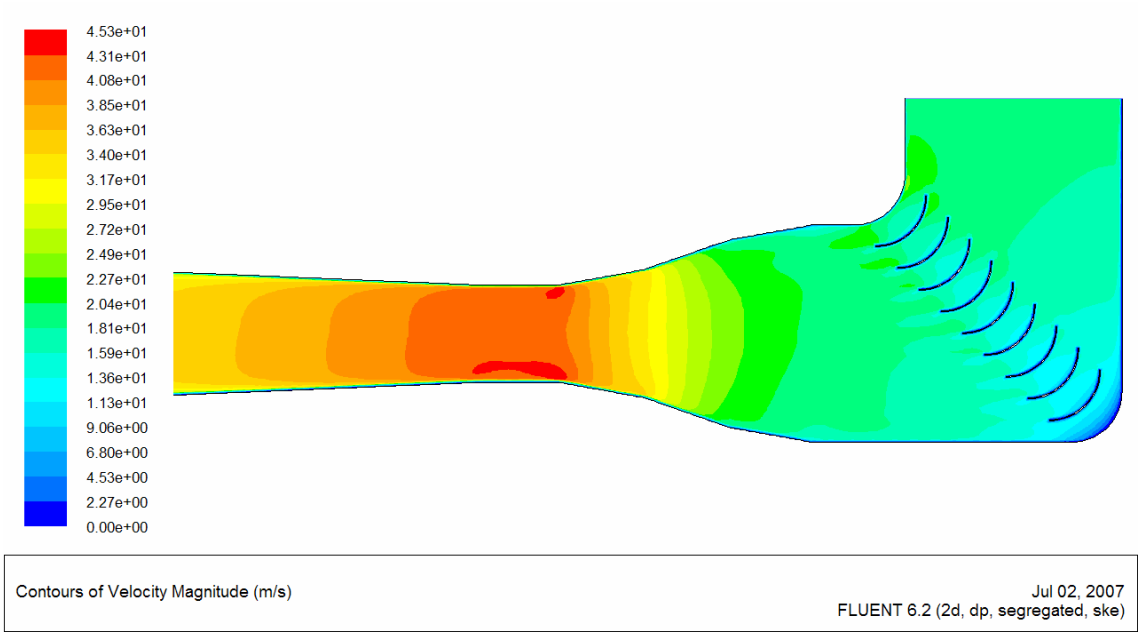
Size Function:

Start Size	**1.5**
Growth Rate	**1.2**
Size Limit	**6**

Foto de la malla:



Contorns de velocitat:



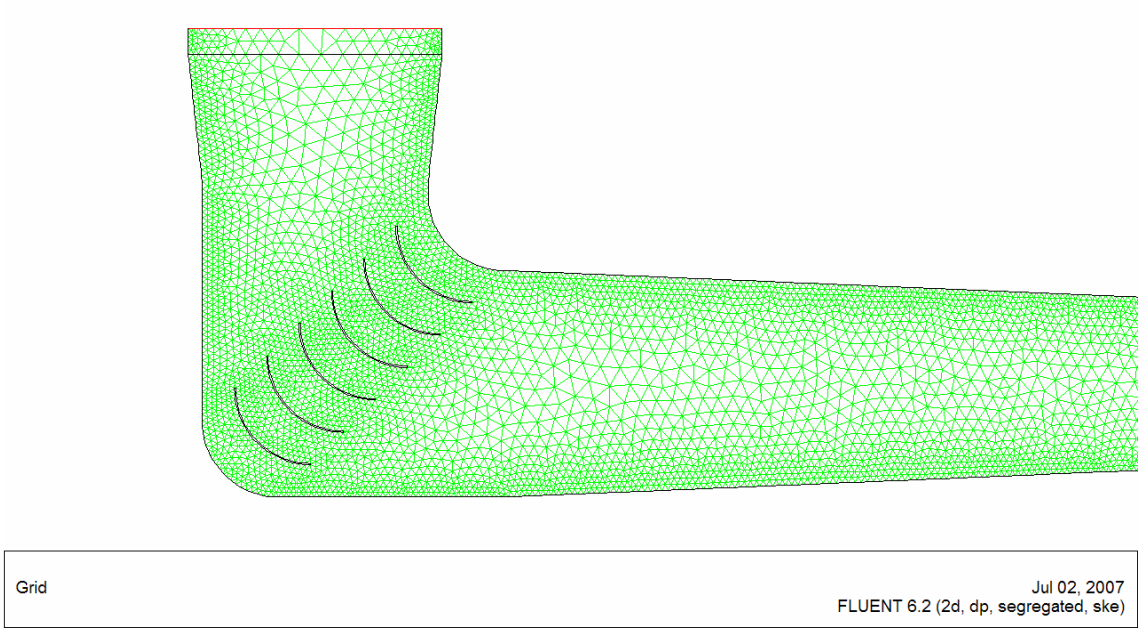
El perfil és molt semblant a l'anterior. S'agafa com a malla bona la número 2. Tot i això, es decideix augmentar la mida límit per veure si el resultat segueix sent vàlid.

MALLA4

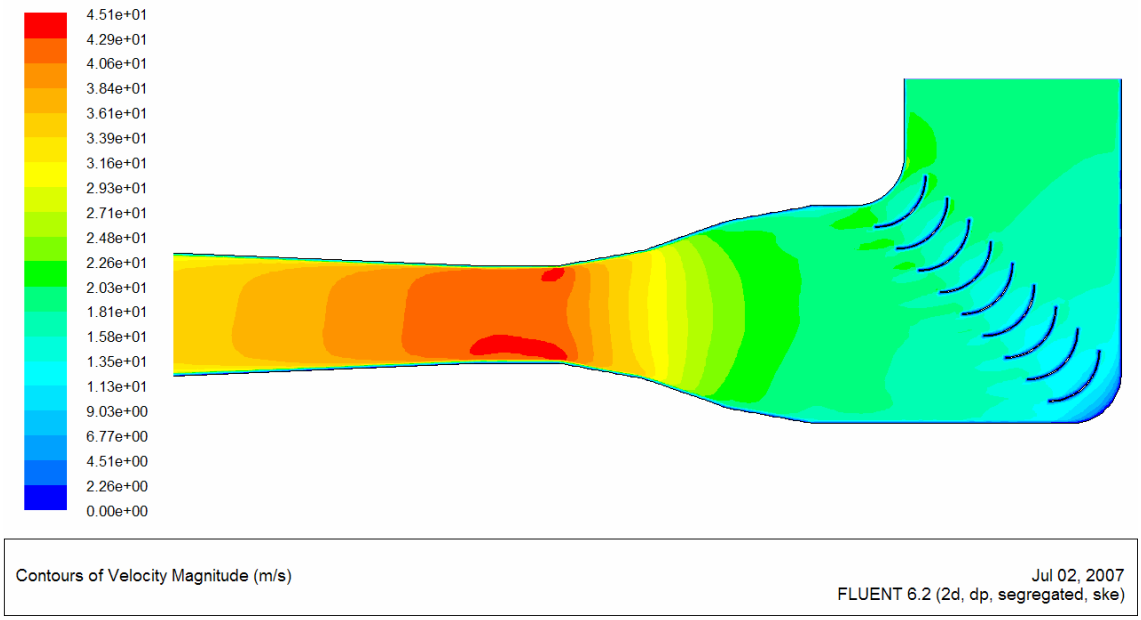
Size Function:

Start Size	**2**
Growth Rate	**1.2**
Size Limit	**10**

Foto de la malla:



Contorns de velocitat:



Els resultats pràcticament no canvien. Aquesta és la malla definitiva.

ANNEX 4. Compendi de trucs útils i solucions als problemes típics que es presenta treballant amb el GAMBIT.

A continuació hi ha una llista de problemes del GAMBIT que s'han hagut de resoldre durant la realització del projecte. Van dirigits a usuaris potencials del programa. GAMBIT és una eina útil per crear geometries i les seves malles però presenta molts errors que a primera vista no tenen sentit. La conclusió final és que no és un programa robust i cal seguir una sèrie de pautes per utilitzar-lo.

NOTA: Tot el document es refereix a la geometria com a volum, ja que es refereix al cas 3D. En 2D, les solucions són equivalents si substituïm els volums per cares i les cares per arestes.

- **Definir Boundary Layer: FAN (ventilador).**

Per definir una superfícies d'aquest tipus amb el GAMBIT i poder-la fer servir més endavant amb FLUENT quan es llegeixi la malla creada per GAMBIT, cal que sigui una cara compartida per dos volums diferents. Això vol dir que no es pot col·locar un ventilador en una cara d'un volum que faci frontera amb l'exterior, com ara a l'extrem d'un tub. L'única solució és fer que hi hagi dos volums un a cada costat del FAN, i que aquests comparteixin la cara que és el fan.

Una solució per fer-ho és col·locar el ventilador a poca distància d'on estava previst per guanyar un tros de volum a l'altre costat o allargar el volum, i després retallar-lo amb la funció *Split*. Si no es fa seguint aquest procés, la cara no serà compartida pels dos volums i el FLUENT no ho acceptarà. A la es veu un FAN correcte i un de no acceptat pel FLUENT.

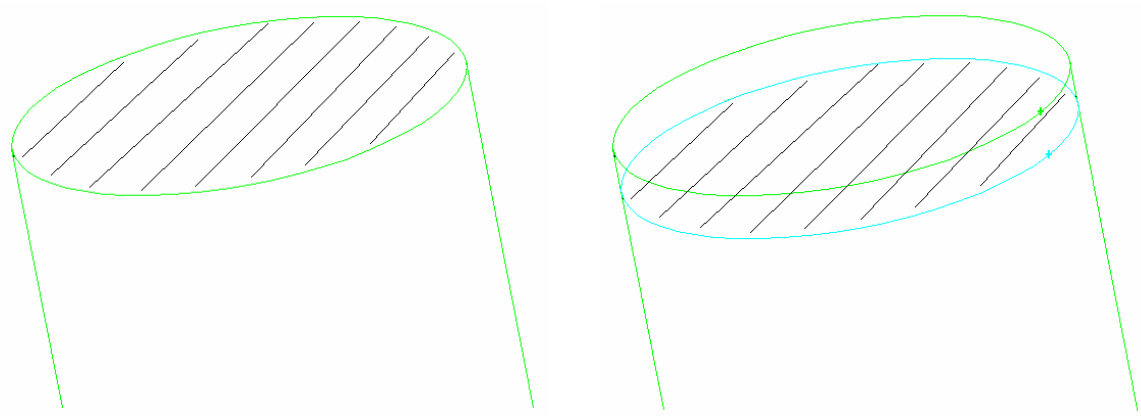


Figura 8.1: A l'esquerra una superfície FAN incorrecta que FLUENT no acceptaria, i a la dreta, una superfície correcta.

- **Arreglar els *Negative Volumes***

El primer pas després de carregar una malla amb el FLUENT és comprovar la malla (*Grid - Check*). L'únic error que pot donar aquesta funció si la malla prové del GAMBIT és que avisi que el volum té *negative volumes*, i no deixi inicialitzar el càlcul. Aquest problema és degut a que algun punt de la geometria de la que prové la malla té un valor "no acceptat".

Aquests punts sorgeixen, entre altres causes, quan es retalla la geometria amb talls on hi ha dos plans que tenen arestes que es tallen. De manera que cal ésser curós en tallar volums. Per arreglar un punt d'aquest tipus cal: 1. localitzar-lo: amb la funció informació de punts, es seleccionen tots els punts i es van mirant les coordenades de cadascun d'ells. Els punts no acceptats són els que tenen coordenades que no han estat definides per l'usuari i tenen molts decimals. 2. Eliminar-lo: per fer-lo desaparèixer cal construir un tros de volum que l'envolti completament i unir aquest amb el volum original de manera que el punt no acceptat quedi engolit per la unió.

- **Mallar dos volums diferents**

Quan tenim una geometria composta per dos o més volums i volem incloure dins una mateixa malla les malles dels diferents volums (com en el cas de tenir un FAN), cal mallar cada volum per separat per evitar possibles problemes. Això comporta que si es vol utilitzar una S*ize Function* se n'ha de muntar una per cada volum.

- **Retallar un cara**

Per fer servir la funció *Split* amb una cara s'ha d'emprar una altra cara. Si es retalla fent servir una aresta, el GAMBIT convertirà les cares resultants en cares virtuals, que donaran problemes a l'hora de mallar. Per solucionar-ho cal construir cares addicionals que segueixin la forma de les arestes que es volien utilitzar per retallar. Una opció senzilla és extrudir les arestes amb la funció *Sweep Edges*.

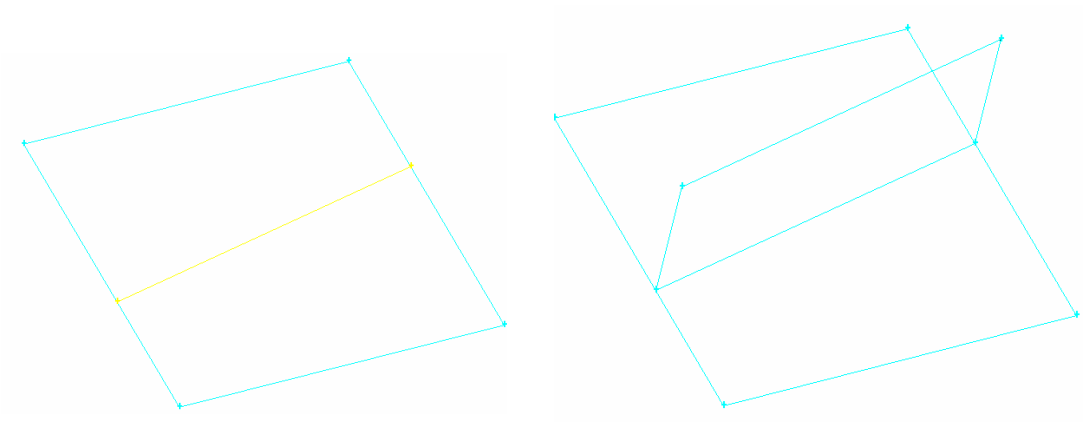


Figura 8.2: A l'esquerra la cara que es vol retallar amb una aresta. A la dreta, l'aresta extrudida per formar la cara amb la qual es podrà retallar.

- **Crear una malla que l'ordinador no suporta**

Si el volum a mallar és molt gran o es demana molta precisió, pot succeir que es requereixi una malla amb una quantitat de punts que la memòria RAM de l'ordinador no suporti. En aquest cas, la millor opció és reduir la malla a costa de perdre precisió o buscar una computadora més potent; però si aquestes opcions no són viables es pot mallar per trams.

Això vol dir dividir el volum a mallar en volums prou petits que es puguin mallar individualment. La divisió d'aquests volums s'ha de fer seguint les mateixes pautes que en el cas del FAN: una cara que sigui la zona de divisió entre dos volums ha de ser compartida pels dos. Per últim, per a que més endavant el FLUENT entengui que les diferents malles són parts de una única malla, cal definir aquestes parets interiors com a *Interior*, un tipus de *Boundary Condition* disponible.

- **Obrir un arxiu CURRENTLY OPEN**

Si es tanca bruscament, o per simple equivocació del programa, de vegades el GAMBIT diu que no es pot obrir un arxiu perquè ja està obert ("ERROR: IDENTIFIER "ARXIU" CURRENTLY OPEN"). Aquest error es soluciona eliminant l'arxiu *.lok que es troba dins la carpeta del que es vol obrir.

- **Recomanacions**

Per últim, un parell de recomanacions a seguir per evitar entrebancs:

Sempre que es vulgui fer servir les funcions per unir o extreure volums (*Unite* i *Substract*), abans convé eliminar tots els punts, arestes i cares presents a la zona. Si no, es crearan punts o arestes no desitjades allà on es trobin aquests elements, i probablement faran que la malla produeixi errors del tipus dels volums negatius.

Es recomana, sempre que sigui possible, fer servir la funció *Size Function* en lloc de *Create Boundary Layer*, per la seva senzillesa i per presentar les opcions a fer servir de manera més entenedora. *Create Boundary Layer* pot arribar a ser igual d’útil, però per usuaris amb un nivell mitjà sobre el programa és fàcil equivocar-se o confondre’s. *Size Function* presenta menys complicacions.