



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER  
LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS**

**AUTOR: Inglés Molina, Raúl**

GRAU: Enginyeria Mecànica

DIRECTOR: Carbonell Ventura, Montserrat

DEPARTAMENT: Mecànica de Fluids

**PRESENTAT: Juliol, 2017**

# RESUM

En aquest projecte s'ha dissenyat un túnel de vent de mides reduïdes enfocat a la docència. Aquest túnel permet realitzar experiments aerodinàmics de mesura de forces amb models a escala impresos amb impressores 3D.

Per poder realitzar aquests experiments de forma correcta, s'ha tractat de trobar un flux de qualitat, seguint els paràmetres límit que estableixen els experts en la matèria.

El túnel de vent dissenyat, disposarà d'una cambra de proves que permetrà l'experimentació amb models de 5,3 cm de diàmetre, amb una velocitat de flux de fins 25,5 m/s.

Per la realització d'aquest projecte s'han fixat uns certs objectius: estudiar els diferents tipus de túnels de vent amb aplicacions docents existents, definir el túnel de vent que millor s'adapti als requeriments plantejats, dissenyar el túnel de vent i selecció de la seva instrumentació electrònica, amb la seva posterior simulació en CFD, mitjançant Siemens NX 10 per al modelat i Solidworks 2016 per a la simulació.

També s'ha realitzat un exemple de pràctica de laboratori que es podria realitzar, s'han establert les instruccions de muntatge, funcionament i manteniment i s'ha realitzat el pressupost de l'equip i una comparativa amb les alternatives comercials.

Com a limitació cal destacar, que no s'ha realitzat un estudi exhaustiu de la part electrònica, essent un punt a millorar del túnel proposat.

## Paraules clau (màxim 10):

Túnel de vent	Docència	Laboratori	Models 3D
Perfils aerodinàmics	Baixa velocitat	Siemens NX 10	Solidworks

# ABSTRACT

---

In this project, has designed a small wind tunnel focused on teaching. This tunnel allows aerodynamic experiments of force measurement with printed scale models with 3D printers.

To be able to carry out these experiments correctly, we have sought to find a quality flow, following the limit parameters set by the experts in the field.

The designed wind tunnel will have a test room that will allow experimentation with models of 5.3 cm of diameter, with a flow rate up to 25.5 m/s.

For the realization of this project, certain objectives have been set: study the different types of wind tunnels with existing teaching applications, define the wind tunnel that best suits the requirements set, design the wind tunnel and select the electronic instrumentation, with its subsequent simulation in CFD, using Siemens NX 10 for modeling and Solidworks 2016 for simulation.

An example of a laboratory practice that could be performed has also been done, assembly, operation and maintenance instructions have been established and the team budget has been compiled and a comparison with commercial alternatives.

As a limitation, it should be noted that an exhaustive study of the electronic part has not been carried out, is a point to improve the proposed tunnel.

**Keywords (10 maximum):**

Wind tunnel	Teaching	Laboratory	3D Models
Aerodynamic profiles	Low-speed	Siemens NX 10	Solidworks

# SUMARI

INTRODUCCIÓ.....	14
Objectiu general.....	14
Objectius específics.....	14
Antecedents.....	14
Limitacions.....	15
<b>1 MARC TEÒRIC.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Teoria de la mecànica de fluids.....</b>	<b>16</b>
1.1.1 Hipòtesis del continu.....	16
1.1.2 Viscositat.....	17
1.1.3 Anàlisi dimensional.....	18
1.1.3.1 Dimensions i unitats.....	19
1.1.3.2 Teorema $\pi$ de Buckingham.....	19
1.1.4 Nombres adimensionals.....	21
1.1.4.1 Número de Reynolds.....	22
1.1.4.2 Número de Mach.....	23
1.1.4.3 Coeficient de pressió.....	23
1.1.4.4 Coeficients d'arrossegament i sustentació.....	23
1.1.5 Semblança.....	23
1.1.5.1 Semblança completa (perfecta o total).....	24
1.1.5.2 Semblança incompleta (imperfecta o restringida).....	25
1.1.6 Flux laminar.....	26
1.1.7 Flux turbulent.....	26
1.1.8 Teoria de la capa límit.....	27
1.1.8.1 Capa límit laminar.....	28
1.1.8.2 Capa límit turbulenta.....	28
1.1.9 Principals equacions de l'aerodinàmica.....	28
1.1.9.1 Equació de continuïtat.....	28
1.1.9.2 Segona llei de Newton (Equació de la quantitat de moviment).....	29
1.1.9.3 Teorema de Bernoulli.....	30
1.1.9.4 Teoria de Darcy-Weisbach.....	30
1.1.10 Flux compressible.....	31
1.1.11 Resistències al flux.....	32
1.1.11.1 Resistència de forma.....	32
1.1.11.2 Resistència de superfície.....	33
1.1.11.3 Resistència total.....	33
1.1.12 Força de sustentació.....	34
<b>1.2 Túnel de vent.....</b>	<b>34</b>
1.2.1 Tipus de túnel de vent.....	35
1.2.1.1 Circuit obert.....	36
1.2.1.2 Circuit tancat.....	37
1.2.1.3 Túnel subsònic.....	39
1.2.1.4 Túnel transsònic.....	39
1.2.1.5 Túnel supersònic.....	40
1.2.1.6 Túnel hipersònic.....	40
1.2.1.7 Túnel amb cambra d'assaigs tancada.....	40
1.2.1.8 Túnel amb cambra d'assaigs oberta.....	40

1.2.2	Instrumentació electrònica dels túnels de vent .....	40
1.2.3	Calibració .....	43
1.2.3.1	Pressió.....	43
1.2.3.2	Velocitat.....	44
1.2.3.3	Cabal .....	45
1.2.3.4	Calibració de balances .....	46
1.2.4	Aplicacions .....	46
<b>2</b>	<b>DISSENY DEL TÚNEL DE VENT .....</b>	<b>49</b>
<b>2.1</b>	<b>Definició de les característiques principals .....</b>	<b>49</b>
2.1.1	Alternatives de disseny .....	49
2.1.1.1	Dimensions .....	49
2.1.1.2	Tipus de flux.....	50
2.1.1.3	Condicions inicials .....	51
<b>2.2</b>	<b>Cambrà de proves .....</b>	<b>52</b>
2.2.1	Determinació de les dimensions de la cambrà de proves .....	52
2.2.1.1	Àrea útil de la cambrà de proves.....	52
2.2.1.2	Factor de bloqueig .....	53
2.2.2	Determinació del tipus de flux.....	54
2.2.3	Càlcul del cabal necessari .....	55
2.2.4	Pèrdues a la secció de proves.....	55
<b>2.3</b>	<b>Con de contracció .....</b>	<b>56</b>
2.3.1	Dimensionament del con de contracció .....	56
2.3.2	Pèrdues al con de contracció.....	59
<b>2.4</b>	<b>Cambrà d'ajustos.....</b>	<b>60</b>
2.4.1	Malla estabilitzadora .....	61
2.4.1.1	Dimensionament de la malla estabilitzadora .....	61
2.4.1.2	Pèrdues a la malla estabilitzadora.....	61
2.4.2	Direccionador de flux .....	62
2.4.2.1	Dimensionament del direccionador de flux.....	62
2.4.2.2	Pèrdues al direccionador de flux.....	63
<b>2.5</b>	<b>Anell d'entrada.....</b>	<b>64</b>
2.5.1	Pèrdues a l'anell d'entrada .....	65
<b>2.6</b>	<b>Difusor .....</b>	<b>66</b>
2.6.1	Dimensionament del difusor .....	66
2.6.2	Pèrdues al difusor.....	67
<b>2.7</b>	<b>Càlcul de pèrdues totals .....</b>	<b>69</b>
2.7.1	Corba característica de la instal·lació .....	70
<b>2.8</b>	<b>Sistema de propulsió .....</b>	<b>71</b>
2.8.1	Ventilador .....	71
2.8.2	Motor .....	74
<b>2.9</b>	<b>Punt de funcionament del sistema .....</b>	<b>74</b>
<b>2.10</b>	<b>Banc i unions .....</b>	<b>76</b>
<b>2.11</b>	<b>Models.....</b>	<b>77</b>
2.11.1	Semiesfera, esfera i esfera allargada .....	78

2.11.2	Placa fina plana .....	78
2.11.3	Naca .....	79
2.11.3.1	Força de sustentació màxima: Naca 0012 .....	79
2.11.4	Automòbil.....	80
2.11.5	Projectil .....	81
<b>3</b>	<b>SIMULACIÓ.....</b>	<b>82</b>
3.1	Etapes de la simulació .....	82
3.2	Modelat del túnel de vent .....	82
3.3	Pre procés.....	83
3.3.1	Condicions de contorn .....	83
3.3.2	Ventilador .....	84
3.3.3	Mallat .....	84
3.4	Càlcul .....	85
3.5	Post procés.....	86
3.5.1	Línies de flux .....	87
3.5.2	Velocitat del flux.....	87
3.5.3	Pressió del flux.....	88
3.5.3.1	Pressió absoluta .....	88
3.5.3.2	Pressió relativa .....	88
3.5.4	Vorticitat .....	89
3.5.5	Resultats .....	90
<b>4</b>	<b>DISSENY DEL SISTEMA DE MESURAMENT.....</b>	<b>92</b>
4.1	Balança.....	92
4.1.1	Parts de la balança .....	92
4.1.2	Funcionament.....	93
4.1.3	Suport dels models.....	94
4.2	Sistema electrònic.....	94
4.2.1	Sensor FSR sèrie 400 .....	94
4.2.2	Sensor RFP sèrie 602 .....	95
4.2.3	Divisor de tensió.....	97
4.2.4	Arduino .....	98
4.2.5	Connexions a la placa Arduino.....	99
4.2.6	Programació de la placa Arduino .....	101
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE CONTROL I CALIBRATGE .....</b>	<b>105</b>
5.1	Control del ventilador.....	105
5.2	Instrumentació de calibració .....	105
<b>6</b>	<b>ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES .....</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>PRESSUPOST.....</b>	<b>110</b>
7.1	Cost de fabricació.....	110

7.2	Alternatives en el mercat .....	112
7.2.1	Armfield C15 .....	112
7.2.2	Armfield C2 .....	113
7.2.3	Omega WTM-1000.....	114
7.2.4	Comparativa .....	115
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTACIÓ AMB EL TÚNEL DE VENT.....</b>	<b>116</b>
8.1	Metodologia bàsica de la experimentació .....	116
8.2	Factors a tenir en compte per realitzar proves aerodinàmiques .....	117
8.3	Pràctica de laboratori: mesurament dels coeficients de resistència, sustentació.....	117
8.3.1	Introducció.....	117
8.3.2	Instal·lació.....	118
8.3.3	Objectiu.....	118
8.3.4	Consideracions teòriques .....	118
8.3.5	Metodologia experimental .....	118
8.3.6	Resultats .....	118
<b>9</b>	<b>GESTIÓ DEL “END OF LIFE” .....</b>	<b>119</b>
<b>10</b>	<b>LEGISLACIÓ.....</b>	<b>122</b>
10.1	Requisits de les màquines .....	122
10.2	Reial decret 1215/1997. Disposicions mínimes de seguretat i de salut .....	123
10.3	CE del sistema de propulsió.....	128
<b>11</b>	<b>AVALUACIÓ DE RISCOS .....</b>	<b>129</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>131</b>
<b>13</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>132</b>
	ANNEX A Manuals.....	134
	ANNEX B Plànols.....	173
	ANNEX C Especificacions tècniques d'elements del túnel.....	210
	ANNEX D Informe tècnic Solidworks Flow Simulation.....	276
	ANNEX E Full programació.....	297
	ANNEX F Túnel de vent del mercat.....	300
	ANNEX G Pràctica de laboratori.....	314
	ANNEX H Normes Deixalleria Punt Net.....	326

## SUMARI DE FIGURES

---

<b>Figura 1.1</b> Esquema que representa un fluid comprès entre una làmina inferior fixa i una làmina superior mòbil.	17
<b>Figura 1.2</b> Variació de la viscositat i densitat de l'aire entre -40 i 50 °C de temperatura a pressió atmosfèrica.	18
<b>Figura 1.3</b> Representació del flux laminar.	26
<b>Figura 1.4</b> Representació del flux turbulent.	27
<b>Figura 1.5</b> Representació del comportament de la velocitat en les capes laminar i turbulenta.	27
<b>Figura 1.6</b> Representació del comportament del flux en les diferents zones.	29
<b>Figura 1.7</b> Diagrama de Moody.	31
<b>Figura 1.8</b> Comparació de deixants de flux d'una esfera llisa (capa límit laminar) i una esfera amb una zona rugosa al front (capa límit turbulenta).	32
<b>Figura 1.9</b> Comparació entre una alta resistència de superfície (a) amb una alta resistència de forma (b).	33
<b>Figura 1.10</b> Esquema de les parts d'un túnel aerodinàmic obert i aspirat.	35
<b>Figura 1.11</b> Túnel de vent tancat per models a escala real.	37
<b>Figura 1.12</b> Anemòmetre de fil calent.	42
<b>Figura 1.13</b> Sensor balança.	43
<b>Figura 1.14</b> Anell piezomètric de múltiples tubs.	44
<b>Figura 1.15</b> Patró de la regla logarítmica de Tchebycheff.	45
<b>Figura 2.1</b> Model de la cambra de proves amb Siemens NK 10.	54
<b>Figura 2.2</b> Con de contracció modelat amb Siemens NX 10.	58
<b>Figura 2.3</b> Cambra d'ajustos modelada amb Siemens NX 10.	60
<b>Figura 2.4</b> Direccionador de flux modelat amb Siemens NX 10.	63
<b>Figura 2.5</b> Anell d'entrada modelat amb Siemens NX 10.	64
<b>Figura 2.6</b> Gràfic per al càlcul del coeficient d'una entrada de flux amb radi.	65
<b>Figura 2.7</b> Difusor modelat amb Siemens NX 10.	67
<b>Figura 2.8</b> Corba característica del ventilador HEP/EW 25-2/H de Sodeca.	72
<b>Figura 2.9</b> Corba aproximada del ventilador HEP/EW 25-2/H de Sodeca.	73
<b>Figura 2.10</b> Suport pel ventilador modelat amb Siemens NX 10.	73
<b>Figura 2.11</b> Gràfica de les corbes característiques de la instal·lació i del ventilador.	74
<b>Figura 2.12</b> Banc que suportarà el túnel de vent, modelat en Siemens NX 10.	77
<b>Figura 2.13</b> Els tres tipus de juntes de cautxú Tipus 1 (a), Tipus 2 (b) i Tipus 3 (c).	77



<b>Figura 2.14</b> Models semiesfera, esfera i esfera allargada de 50 mm de diàmetre.	78
<b>Figura 2.15</b> Model placa plana 60x100x2 mm	78
<b>Figura 2.16</b> Model de Naca 0012 (a) i 6509 (b) de 50 mm de profunditat.	79
<b>Figura 2.17</b> Model Honda NSX, automòbil de carrer d'alt rendiment.	80
<b>Figura 2.18</b> Model Fórmula E, monoplaça de molt alt rendiment de propulsió 100% elèctrica.	80
<b>Figura 2.19</b> Model de bala de 9 mm (a) i bala de calibre .50 (b).	81
<b>Figura 3.1</b> Modelat del túnel de vent per simulació amb Solidworks 2016.	83
<b>Figura 3.2</b> Selecció de volum de control i entrades i sortides del flux.	83
<b>Figura 3.3</b> Selecció de les especificacions del ventilador per simular.	84
<b>Figura 3.4</b> Seccions del mallat.	85
<b>Figura 3.5</b> Configuració del mallat.	79
<b>Figura 3.6</b> Simulació de les línies de flux amb Solidworks 2016.	87
<b>Figura 3.7</b> Simulació de velocitat de flux amb Solidworks 2016.	87
<b>Figura 3.8</b> Simulació de la pressió absoluta del flux amb Solidworks 2016.	88
<b>Figura 3.9</b> Simulació de la pressió relativa del flux amb Solidworks 2016.	88
<b>Figura 3.10</b> Simulació de la vorticitat del flux amb Solidworks 2016.	89
<b>Figura 3.11</b> Tall transversal a la cambra de proves on se situarien els models.	89
<b>Figura 4.1</b> Modelat de les parts internes de la balança (sense la carcassa) en posició inversa per a que es puguin observar els eixos i els sensors correctament	92
<b>Figura 4.2</b> Transmissió de les forces de resistència, sustentació i càrrega aerodinàmica ("Downforce") que actuen sobre la balança.	93
<b>Figura 4.3</b> Balança instal·lada en la cambra de proves.	93
<b>Figura 4.4</b> Sensor de força per resistència FSR 400.	94
<b>Figura 4.5</b> Gràfica Resistència-Força del sensor FSR 400.	95
<b>Figura 4.6</b> Sensor de força per resistència RFP 602.	95
<b>Figura 4.7</b> Gràfica de calibració del sensor RFP.	96
<b>Figura 4.8</b> Gràfica de la calibració del sensor RFP 602 extrapolada de la gràfica del fabricant.	96
<b>Figura 4.9</b> Esquema del divisor de tensió.	97
<b>Figura 4.10</b> Gràfic de la variació de voltatge amb la força aplicada millorant la sensibilitat segons la resistència utilitzada del sensor FSR 400.	97
<b>Figura 4.11</b> Placa Arduino Uno.	98
<b>Figura 4.12</b> Pantalla LCD HD44770.	99
<b>Figura 4.13</b> Esquema de connexions de la pantalla LCD HD44770.	100
<b>Figura 4.14</b> Esquema de connexions dels elements electrònics a la placa Arduino.	100
<b>Figura 4.15</b> Balança i carcassa que protegeix els elements electrònics.	101

<b>Figura 4.16</b> Text a la pantalla LCD.	101
<b>Figura 5.1</b> Punts de col·locació de l'anemòmetre tèrmic per a una precisa calibració (mm).	106
<b>Figura 5.2</b> Forats de calibratge tapats.	106
<b>Figura 6.1</b> Túnel de vent proposat.	107
<b>Figura 7.1</b> Túnel aerodinàmic Armfield C15-10.	112
<b>Figura 7.2</b> Túnel aerodinàmic Armfield C2.	113
<b>Figura 7.3</b> Mini túnel aerodinàmic Omega WTM-1000.	114
<b>Figura 9.1</b> Recorregut de l'Edifici A de la universitat fins la deixalleria.	119
<b>Figura 10.1</b> Logotip que demostra que el ventilador de Sodeca HEP/EW 25-2/H compleix amb la directiva CE.	128

## SUMARI DE TAULES

---

<b>Taula 1.</b> Instrumentació bàsica per un túnel de vent.	41
<b>Taula 2.</b> Matriu d'alternatives de túnel de vent.	50
<b>Taula 3.</b> Condicions de l'aire a nivell del mar.	51
<b>Taula 4.</b> Valors de les alçades del perfil del con de contracció.	58
<b>Taula 5.</b> Pèrdues de càrrega al túnel de vent sense model.	69
<b>Taula 6.</b> Valors aproximats de la corba característica del ventilador.	72
<b>Taula 7.</b> Goals de la simulació amb Solidworks 2016.	90
<b>Taula 8.</b> Especificacions tècniques del disseny del túnel de vent.	107
<b>Taula 9.</b> Pressupost dels materials i fabricació del túnel de vent proposat.	110
<b>Taula 10.</b> Comparativa del projecte amb algunes alternatives del mercat.	115
<b>Taula 11.</b> Agrupació de les parts del túnel per zona de deixalla.	120
<b>Taula 12.</b> Avaluació de riscos en el muntatge i ús del túnel de vent.	129

# GLOSSARI DE SIGNES, SÍMBOLS, ABREVIATURES, ACRÒNIMS I TERMES

---

## SIGNES

**A**: àrea [m<sup>2</sup>]

**C**: coeficient [adimensional]

**D**: diàmetre [m]

**d**: diàmetre [m]

**F**: força [N]

**f**: factor de fricció [adimensional]

**g**: acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>]

**H**: alçada manomètrica d'una màquina hidràulica [mcf] o alçada dimensional [m]

**h**: pèrdues de càrrega

**K**: coeficient de pèrdues [adimensional]

**L**: longitud [m]

**Ma**: nombre de Mach [adimensional]

**m**: cabal màssic [kg/s]

**n**: règim de gir [rpm]

**P**: perímetre [m]

**p**: pressió [Pa]

**Q**: cabal volumètric [m<sup>3</sup>/s]

**Re**: nombre de Reynolds [adimensional]

**t**: temps [s]

**U**: velocitat [m/s]

**V**: vector de velocitat [m/s<sup>2</sup>] o

**w**: costat d'una cel·la de la malla [mm]

**x**: punt a estudiar [m]

**z**: alçada [m]

## Subíndexs dels signes

**anell**: anell entrada

**av**: mitjana

**ca**: cambra ajustos  
**cc**: con de contracció  
**cp**: cambra de proves  
**D**: arrossegament (C o F)  
**d**: difusor  
**df**: direccionador de flux  
**f**: fricció  
**h**: hidràulic (D)  
**h, ca**: hidràulic cambra ajustos (D)  
**L**: sustentació (C o F)  
**m**: mullat (P), malla (w), model  
**p**: prototipus  
**R**: relació  
**rc**: relació contracció (L o A)  
**s**: màquina hidràulica (H)  
**so**: so (velocitat)  
**v**: ventilador  
**w**: filferro (d)  
**x**: punt a estudiar  
 $\infty$ : corrent lliure (p o U)

## SÍMBOLS

$\alpha$ : factor corrector de l'energia cinètica [adimensional], relació de velocitats de gir [adimensional]  
 $\beta$ : porositat [adimensional]  
 $\partial$ : símbol de la derivada  
 $\gamma$ : pes específic [N/m<sup>3</sup>]  
 $\Delta$ : diferència (resta d'elements)  
 $\delta$ : gruix de capa [m]  
 $\varepsilon$ : rugositat absoluta [mm]  
 $\eta$ : rendiment [%]  
 $\theta$ : angle [°]  
 $\mu$ : viscositat dinàmica o absoluta [Ns/m<sup>2</sup>]

$\nu$ : viscositat cinemàtica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\rho$ : densitat [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\Sigma$  : símbol de sumatori, tots els elements inclosos en aquest signe es sumen entre ells

$\sigma$ : solidesa [adimensional]

$\tau$ : esforç tallant [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

$\nabla$ : vector gradient, relacionat amb una funció, indica la direcció per on la variació és més gran i el seu mòdul representa el valor d'aquesta variació

$\frac{du}{dy}$ : gradient de velocitat [ $\text{s}^{-1}$ ]

## ABREVIATURES

**FSR**: Force-sensing Resistor, sensor que permet calcular pressions o forces, disminueix la seva resistència elèctrica quan se li administra una força determinada

**mca, m.c.a o m.c.aire**: metres de columna d'aire, és una unitat de pressió que equival a una columna d'aire d'un metre d'alçada sobre la gravetat terrestre

**mcf, m.c.f o m.c.fluid**: metre de columna de fluid, unitat de pressió que equival a una columna del fluid treballat d'un metre d'alçada sobre la gravetat terrestre

## TERMES

**Connectors Faston**: connexions elèctriques mascle-femella de la marca Faston que permet una connexió de cables senzilla.

**Datasheet**: full d'especificacions que subministren els fabricants (generalment en anglès).

**Directiva CE**: certificat Europeu que indica la seguretat d'una màquina o equip.

**Downforce**: terme utilitzat comunament en el món de l'automobilisme, és la càrrega aerodinàmica que sofreixen els automòbils quan circulen (el contrari dels avions).

**Goal**: opció de la que disposa la extensió d'anàlisi de flux del Solidworks 2016 que permet calcular automàticament certs paràmetres de la simulació.

**Honeycomb**: tipus de direccionador de flux, amb forma de cel·les hexagonals com un panell d'abelles.

**Siemens NX 10**: software de disseny assistit per ordinador (CAD).

**Silentblock**: casquets, generalment de cautxú, que eliminen les vibracions. Comunament s'anomenen per la marca més venuda (Silentblock).

**Solidworks 2016**: software de disseny assistit per ordinador (CAD).

## INTRODUCCIÓ

---

### OBJECTIU GENERAL

Estudiar i dissenyar un túnel de vent aplicat a la docència per a la realització de pràctiques de laboratori corresponents a assaigs amb perfils aerodinàmics.

El disseny s'enfoca en les proves que puguin realitzar els estudiants de la universitat. Les proves consistirien a muntar models a escala o objectes de geometries simples (esferes, cubs, cons, etc), per visualitzar el camp de flux, i mesurament de forces aerodinàmiques, entre altres proves que podrien ser realitzades. Fins i tot, aquests models, podrien ser dissenyats pels alumnes i, aprofitant les impressores 3D de l'escola, es podrien arribar a fabricar i utilitzar en les pràctiques.

També donaria l'oportunitat de disposar de pràctiques del tema d'aerodinàmica dins del temari de les assignatures del Departament de Mecànica de Fluids. A més, estaria disponible pels alumnes que vulguin realitzar un estudi aerodinàmic mitjançant models i la Teoria de la Semblança, facilitant futurs treballs finals de grau.

### OBJECTIUS ESPECÍFICS

- Estudiar els diferents tipus de túnels de vent amb aplicacions docents existents.
- Definir el túnel de vent que millor s'adapti als requeriments plantejats.
- Dissenyar el túnel de vent i selecció de la seva instrumentació electrònica.
- Realitzar simulacions en CFD.
- Definir les pràctiques de laboratori que es podrien realitzar.
- Establir les instruccions de muntatge, funcionament i manteniment.
- Realitzar el pressupost de l'equip i la comparativa amb les alternatives comercials.

### ANTECEDENTS

La UPC, a Terrassa, té un túnel de vent de fabricació pròpia, un equip que consisteix en un túnel de circuit obert i amb càmera tancada de 20 cm de diàmetre per a la realització de mesures de velocitat, pressió i visualització de flux, així com per al calibratge de sondes. Inclou una balança de tres components per a la determinació de forces aerodinàmiques.

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

L'Escola Politècnica Superior de Vilanova i la Geltrú disposa d'un laboratori pel Departament de Mecànica de Fluids, el qual disposa de maquetes per a realitzar pràctiques de mecànica de fluids, pneumàtica, màquines hidràuliques, transmissió de calor i màquines tèrmiques. No obstant, no disposa de cap túnel de vent per poder realitzar estudis aerodinàmics.

En el mercat, existeixen diferents fabricants com Armfield o Edibon amb diverses opcions de túnels de vent, amb diverses dimensions i configuracions, fins i tot, alguns es poden controlar per ordinador. També existeix un mini túnel de vent amb unes dimensions molt reduïdes del fabricant Omega que destaca per la seva portabilitat, però tots ells amb un cost elevat.

## LIMITACIONS

A causa de la naturalesa didàctica del disseny, les dimensions del túnel aerodinàmic han de permetre la instal·lació i el seu correcte funcionament dintre del laboratori, que és un espai reduït on hi ha altres tipus de maquetes que permeten realitzar experiments. A més, la grandària dels models ha d'adequar-se a les capacitats dels estudiants, i s'ha de tenir present que la grandària dels mateixos condicionarà de forma directa la grandària del túnel.

És a dir, el túnel de vent ha de cabre dins del laboratori sense interferir en els altres aparells i permetent bona mobilitat als alumnes i professors dintre del mateix, fixant així les dimensions màximes. En quan a les dimensions mínimes, s'ha de tenir en compte les mesures dels models a utilitzar, que en principi serien les capaces de realitzar per una impressora 3D, establint així les dimensions mínimes que ha de tenir la cambra de proves on es ficaran els models.

A més, s'ha de tenir present que no és un aparell precisament econòmic. S'hauria de buscar el mínim cost possible i comparar-ho amb les ofertes que hi ha en el mercat.

Com limitacions d'aquest treball de grau, comentar que l'estudi exhaustiu de la part electrònica del túnel de vent queda fora dels objectius marcats en el treball.



## 1 MARC TEÒRIC

---

### 1.1 TEORIA DE LA MECÀNICA DE FLUIDS

Un fluid és aquella substància que es deforma contínuament a l'aplicar-li un esforç tangencial per petit que aquest sigui, considerada com un mitjà continu, que manca de forma pròpia, per la qual cosa adopta la forma del recipient que ho conté. D'aquesta manera, entre els diferents elements d'un fluid homogeni hi ha una forces d'atracció febles i poden reordenar-se lliurement sense afectar a les propietats macroscòpiques del fluid, és a dir, hi ha un moviment relatiu entre els diferents elements del fluid, entre aquests es troben els líquids i els gasos.

#### 1.1.1 Hipòtesis del continu

Aquest apartat on es comenta la hipòtesi del continu està basat en la explicació del llibre "Fundamentos de mecànica de fluidos" [1]. Les molècules d'un gas estan separades entre si per distàncies molt majors que les dimensions de les molècules mateixes. Fins i tot en un líquid, en el qual les molècules estan estretament empaquetades, la massa (que resideix essencialment en els nuclis atòmics) està molt lluny d'estar distribuïda uniformement a l'espai. No obstant això, en moltes aplicacions pràctiques, tan sols ens interessa el comportament de la matèria en una escala macroscòpica. Aquest és el cas de la Mecànica de Fluids, de tal manera que podem ignorar en la pràctica l'estructura molecular del fluid quan descrivim el seu moviment.

La hipòtesi bàsica de la Mecànica de Fluids consisteix a suposar que, a escala macroscòpica, un fluid es comporta com si estigués dotat d'una estructura perfectament contínua (o com si no tingués estructura alguna). Per tant, magnituds com la massa, la quantitat de moviment i l'energia es consideren uniformement distribuïdes en cada element diferencial de volum del fluid (en lloc d'estar concentrades en una petita fracció d'aquest, com realment succeeix).

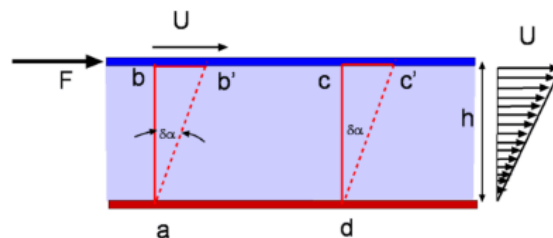
En el nostre estudi analitzarem el flux d'un fluid amb expressions matemàtiques i analítiques i per això és necessari considerar que l'estructura molecular del fluid és reemplaçada per un mitjà hipotètic continu tal i com la hipòtesi del continu explica, això és a causa que, per exemple la velocitat en un punt de l'espai dintre d'un espai molecular és indefinida (sempre seria zero), excepte quan una molècula ocupi aquest punt exacte, en aquest moment seria la velocitat de la molècula i no la velocitat mitjana de la massa de les partícules que estan al seu voltant.

Això s'evita si es considera que la velocitat en un punt és la velocitat mitjana de totes les molècules que envolten aquest punt.

### 1.1.2 Viscositat

La viscositat és una propietat que tendeix a retardar el flux d'un fluid (viscós). Si es tenen dues plaques i entre elles hi ha un fluid i després s'aplica una força que fa que la placa superior es mogui s'aprecia una deformació del fluid. Un fluid no viscós, és un fluid que no es veu afectat per forces viscoses. Això permet fluir a través de parets sense pèrdua de velocitat a causa de la fricció. A més tampoc es formen vòrtex turbulents. En el cas de que sigui a més un fluid incompressible llavors s'anomena fluid ideal.

En el cas d'un fluid real, considerant la condició de no lliscament, la capa de fluid en contacte amb la làmina mòbil té la mateixa velocitat que ella, mentre que l'adjacent a la paret fixa està en repòs. La velocitat de les diferents capes intermèdies augmenta uniformement entre ambdues làmines tal com suggereixen les fletxes.



**Figura 1.1** Esquema que representa un fluid comprès entre una làmina inferior fixa i una làmina superior mòbil. [www.sc.ehu.es]

Com a conseqüència d'aquest moviment, una porció de líquid que en un determinat instant té la forma ABCD, al cap d'un cert temps es deformarà i es transformarà en la porció AB'C'D'. En la figura 1.1 es pot observar que la velocitat del fluid  $U$  varia des de zero fins al valor de la velocitat de la placa, es forma llavors un gradient de velocitat causat per la viscositat i en la seva forma més simple, flux unidireccional, aquest gradient presenta una variació lineal amb la distància de separació de les plaques.

Aquest gradient de velocitat causa esforços tallants en el fluid, considerat newtonià, que estan relacionats per mitjà d'una proporcionalitat directa donada per:

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

On  $\tau$  és l'esforç tallant [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],  $\mu$  és la viscositat dinàmica o absoluta [ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ] i  $\frac{du}{dy}$  és el gradient de velocitat [ $\text{s}^{-1}$ ].

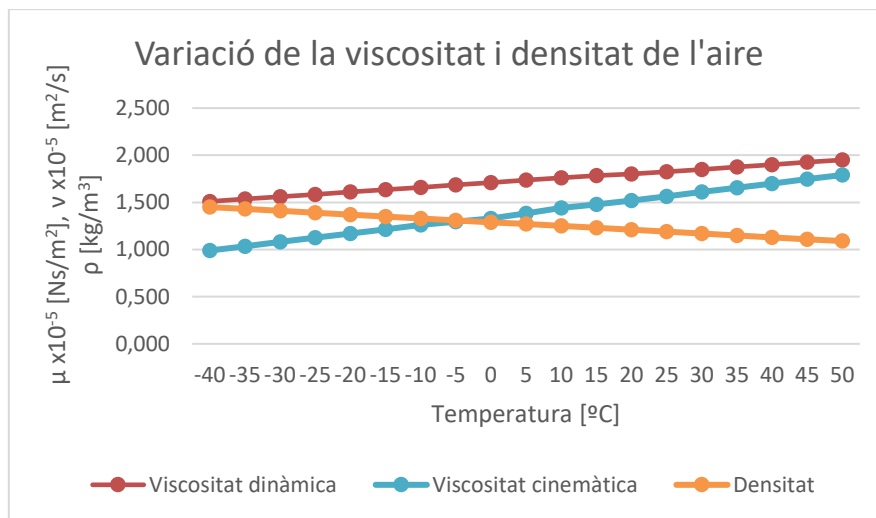
# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Un altre paràmetre de viscositat és la viscositat cinemàtica, que és simplement una expressió que relaciona la viscositat dinàmica amb la densitat del fluid, l'expressió que relaciona aquestes variables és:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

On  $\nu$  és la viscositat cinemàtica mesurada en  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\mu$  és la viscositat dinàmica en  $\text{Ns}/\text{m}^2$  i  $\rho$  és la densitat mesurada en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



**Figura 1.2** Variació de la viscositat i densitat de l'aire entre -40 i 50 °C de temperatura a pressió atmosfèrica. [www.civil.frba.utn.edu.ar]

En el cas del túnel de vent, treballarem a temperatura ambient, és a dir entre 15 i 30 °C, agafant com a temperatura ambient nominal 20 °C. Obtenint una viscositat i densitat de [1]:

$$\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ Ns}/\text{m}^2 \quad \nu = 1,52 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad \rho = 1,21 \text{ kg}/\text{m}^3$$

## 1.1.3 Anàlisi dimensional

Aquest apartat es basarà en el contingut dels apunts del tema 2 d'Enginyeria de Fluids (ENFL) [2]. Els paràmetres adimensionals aprofundeixen de manera significativa nostra comprensió dels fenòmens de flux de fluids. Permeten aplicar resultats experimentals limitats en nombre a situacions en què es tinguin diferents dimensions físiques i, de vegades diferents propietats de fluid.

### 1.1.3.1 Dimensions i unitats

Les dimensions de la mecànica són força [F] ó massa [M], longitud [L] i temps [T]; elles estan relacionades amb la segona llei de moviment de Newton ( $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ).

Per a tots els sistemes físics, probablement seria necessari introduir dues dimensions addicionals, una que tracti amb l'electromagnètica i l'altra amb els efectes tèrmics.

La segona llei del moviment de Newton en forma dimensional és:

$$F = MLT^{-2}$$

Que mostra que solament tres de les dimensions són independents. Un sistema comú, empleat en anàlisi dimensional és el sistema MLT.

### 1.1.3.2 Teorema $\pi$ de Buckingham

El teorema  $\pi$  de Buckingham demostra que, en un problema físic que inclou  $n$  variables en les quals hi ha  $m$  dimensions, les quantitats es poden ordenar en  $n-m$  paràmetres adimensionals independents. Siguin  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  les variables implicades, tals com la pressió, viscositat, velocitat, etc. Se sap que totes les variables són essencials a la solució, per la qual cosa ha d'existir alguna relació funcional:

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0$$

Si  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$  representen algunes agrupacions adimensionals de la  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  llavors amb  $m$  dimensions implicades, existeix una equació de la forma:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

Existeixen diferents mètodes per determinar els paràmetres adimensionals, entre ells el Teorema  $\pi$  de Buckingham que consisteix en seleccionar un nombre igual a  $m$  entre les variables  $A$ , amb diferents dimensions, i que continguin entre elles les  $m$  dimensions i usar-les com a variables repetitives, juntament amb una de les altres  $A$  variables per cada  $\pi$ . Cada paràmetre adimensional es trobarà mitjançant el producte de les variables repetitives elevades a uns exponents per cadascuna de les variables no repetitives. Per exemple, sigui que  $A_1, A_2, A_3$  continguin M, L, T no necessàriament en cadascuna, sinó en forma col·lectiva.

Llavors el primer paràmetre  $\pi$  està compost com:

$$\pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4$$

El segon com:

$$\pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5$$

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

I fins:

$$\pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_n$$

En aquestes equacions es determinaran els exponents perquè cada  $\pi$  sigui adimensional. Les dimensions de les variables A se substitueixen i el sumatori dels exponents de M, L, T es fixen iguals a zero respectivament, aquests produeixen tres equacions amb tres incògnites per a cada paràmetre  $\pi$ , amb el que es poden determinar els exponents x, y, z del paràmetre  $\pi$ .

Si solament estan implicades dues dimensions, dues de les variables A s'escullen com a variables repetitives i s'obtenen dues equacions amb els dos exponents incògnits per a cada terme de  $\pi$ . En molts casos l'agrupació de termes A és tal que l'arranjament adimensional és evident per inspecció. El cas més simple és aquell quan dues quantitats tenen les mateixes dimensions.

En resum, els passos a seguir si es vol realitzar un anàlisi dimensional són els següents [3]:

1. Enumerar les variables relacionades amb el problema.
2. Expressar cadascuna de les variables en termes de dimensions bàsiques.
3. Determinar el número necessari de termes  $\pi$ .
4. Escollir un número de variables repetides, on el número requerit és igual al número de variables de referència.
5. Formar un terme  $\pi$  multiplicant una de les variables no repetides pel producte de variables repetides, cadascuna elevada a un exponent que faci adimensional la combinació.
6. Realitzar el pas 5 per cadascuna de les variables repetides.
7. Comprovar que tots els termes  $\pi$  resulten ser adimensionals.
8. Expressar la forma final com una relació entre els termes  $\pi$  i deduir el seu significat.

## EXEMPLE [2]

Suposem que la força  $F_D$  sobre un cos esfèric immers en el corrent d'un fluid depèn només del seu diàmetre  $D$ , velocitat del corrent  $U$ , de la densitat del fluid  $\rho$  i de la seva viscositat  $\mu$ :

$$F_D = f(D, U, \rho, \mu)$$

Llavors:

- Cabal:  $F_D = MLT^{-2}$
- Diàmetre:  $D = L$
- Velocitat del flux:  $U = LT^{-1}$
- Densitat:  $\rho = ML^{-3}$
- Viscositat:  $\mu = ML^{-1}T^{-1}$

S'utilitzen tres dimensions  $k$ , i amb cinc variables  $n$  hi haurà un paràmetre  $\pi$ :

$$\pi_i = n - k = 5 - 3 = 2 \text{ paràmetres adimensionals}$$

Substituint les dimensions obtenim:

$$\pi_1 = L^{x_1}(LT^{-1})^{y_1}(ML^{-3})^{z_1}MLT^{-2} = M^0L^0T^0$$

$$\pi_2 = L^{x_2}(LT^{-1})^{y_2}(ML^{-3})^{z_3}ML^{-1}T^{-1} = M^0L^0T^0$$

Els exponents de cada dimensió han de ser iguals en cada costat de l'equació.

Per a L, M i T tenim:

$$\begin{array}{rcl} x_1 + y_1 - 3z_1 + 1 = 0 & & x_2 + y_1 - 3z_1 - 1 = 0 \\ z_1 + 1 = 0 & & z_1 + 1 = 0 \\ -y_1 - 2 = 0 & & -y_1 - 1 = 0 \end{array}$$

Resolent el sistema obtenim el valor dels exponents:

$$\begin{array}{rcl} x_1 = -1 & y_1 = -2 & z_1 = -2 \\ x_2 = -1 & y_2 = -1 & z_2 = -1 \end{array}$$

Llavors:

$$\pi_1 = \frac{F_D}{\rho D^2 U^2} = C_D \quad \pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D} = \frac{1}{Re}$$

Quedant la funcionalitat entre paràmetres adimensionals:

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho D^2 U^2} = f'\left(\frac{\rho U D}{\mu}\right) \rightarrow C_D = f'(Re)$$

El  $\frac{1}{2}$  no provoca que deixi de ser un nombre adimensional, però si estem parlant de coeficient de resistència és necessari incloure-ho.

#### 1.1.4 Nombres adimensionals

Com s'ha vist en l'apartat anterior, un nombre adimensional és un número que no té unitats físiques que ho defineixin. Els nombres adimensionals es defineixen com a productes o quocients de variables que sí tenen unitats de tal forma que totes aquestes se simplifiquen. Depenent del seu valor aquests nombres tenen un significat físic que caracteritza unes determinades propietats per a alguns sistemes.

Les forces presents en un fenomen en el qual un cos es mou a través d'un fluid o un fluid a través d'un cos, es poden distingir com a degudes a la viscositat del mitjà, a la seva elasticitat, a la seva inèrcia i per força de gravetat. Es pot dir que són proporcionals a determinades variables, així:

- Força d'inèrcia  $\approx \rho l^2 U^2$
- Força viscosa  $\approx \mu l U$
- Força de gravetat  $\approx \rho l^3 g$
- Força elàstica  $\approx \rho a^2 l^2$

On  $\rho$  és la densitat,  $l$  és una dimensió característica (pot ser longitud, diàmetre, etc),  $U$  és la velocitat relativa fluid-cos,  $g$  és l'acceleració de la gravetat i  $a$  és la velocitat de les ones mecàniques en el fluid.

Es pot relacionar aquestes forces per determinar en aquest cas particular condicions aerodinàmiques:

- *Número de Reynolds* =  $\frac{F_{inèrcia}}{F_{viscosa}}$
- *Número de Mach* =  $\frac{F_{inèrcia}}{F_{elàstica}}$

#### 1.1.4.1 Número de Reynolds

El nombre de Reynolds és el que arriba a tenir més importància en els fenòmens aerodinàmics de baixes velocitats, quan les forces d'inèrcia arriben a cert nivell més alt que les forces viscoses, el flux entra en inestabilitat i es presenten els fenòmens de turbulència, a més el nombre de Reynolds està implicat en les forces de fricció interna del fluid i per això és important la descripció de pèrdues.

El nombre de Reynolds relaciona la densitat, viscositat dinàmica, velocitat i dimensió típica d'un flux, en una expressió adimensional. Aquest nombre o combinació adimensional apareix en molts casos relacionat amb el fet que el flux pugui considerar-se laminar (nombre de Reynolds petit) o turbulent (nombre de Reynolds gran). Des d'un punt de vista matemàtic, el nombre de Reynolds d'un problema o situació concreta es defineix per mitjà de la següent fórmula:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

On  $Re$  és el número de Reynolds,  $\rho$  és la densitat [ $\text{kg/m}^3$ ],  $U$  és la velocitat del fluid [ $\text{m/s}$ ],  $L$  és la dimensió característica del sistema [ $\text{m}$ ] i  $\mu$  és la viscositat dinàmica del fluid [ $\text{kg/ms}$ ].

Quan el conducte és un tub circular, la longitud característica és el diàmetre intern del mateix ( $D$ ). Si no és circular, s'utilitza el diàmetre hidràulic  $D_h$  de dimensió característica:

$$D_h = \frac{4A}{P_m}$$

On  $D_h$  és el diàmetre hidràulic [ $\text{m}$ ],  $A$  és l'àrea transversal al flux de la secció [ $\text{m}^2$ ] i  $P_m$  és el perímetre mullat [ $\text{m}$ ], que és la suma de la longitud dels límits de la secció que està en contacte amb el fluid.

#### 1.1.4.2 Número de Mach

Un dels paràmetres més importants que es presenten en l'anàlisi de flux compressible, és el nombre de Mach, el qual és la relació de la velocitat local del flux a la velocitat local del so dins del fluid:

$$Ma = \frac{U}{U_{so}}$$

On  $Ma$  és el número de Mach,  $U$  és la velocitat del fluid [m/s] i  $U_{so}$  és la velocitat del so [m/s]. En el sentit de forces, el nombre de Mach és la relació existent entre les forces inercials i les forces originades per la compressibilitat del fluid.

#### 1.1.4.3 Coeficient de pressió

És un paràmetre adimensional que representa la relació entre la pressió estàtica i la pressió dinàmica, i és freqüentment usat en estudis d'aerodinàmica.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$$

On  $C_p$  és el coeficient de pressió [adimensional],  $p$  és la pressió [N/m<sup>2</sup>],  $p_\infty$  és la pressió de referència del corrent lliure [N/m<sup>2</sup>],  $\rho$  és la densitat [kg/m<sup>3</sup>] i  $U_\infty$  és la velocitat de corrent lliure [m/s].

#### 1.1.4.4 Coeficients d'arrossegament i sustentació

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad ; \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$

On  $C_D$  és el coeficient d'arrossegament [adimensional],  $F_D$  és la força d'arrossegament [N],  $C_L$  és el coeficient de sustentació [adimensional],  $F_L$  és la força de sustentació [N],  $\rho$  és la densitat [kg/m<sup>3</sup>],  $U$  és la velocitat [m/s] i  $A$  és l'àrea característica [m<sup>2</sup>], perpendicular al flux en el cas de l'arrossegament i paral·lela en el cas de la sustentació.

#### 1.1.5 Semblança

Molts problemes de Mecànica de Fluids en enginyeria deuen de ser resolts mitjançant l'experimentació, ja que no existeix una solució analítica completa. Com per exemple:

- Força de resistència a l'avanç i força de sustentació en aerodinàmica.
- Resistència superficial a l'avanç de vaixells.
- Flux (i erosió) en rius i ports, etc.



En tots aquests casos, la construcció i test de diversos dissenys alternatius, tots construïts a escala real i operant a les condicions previstes de velocitat del vent, aigua, etc, està fora de lloc. La única alternativa és l'experimentació amb models construïts a escala. Aquest apartat es basa en la referència [2].

### 1.1.5.1 Semblança completa (perfecta o total)

El primer requisit pel test de models és que aquest sigui una reproducció a escala de l'objecte real, es a dir que sigui una rèplica del prototipus, és la anomenada **semblança geomètrica**.

Qualsevol longitud del model es relaciona amb la longitud corresponent del prototipus mitjançant un **factor d'escala ( $\lambda$ )**:

$$L_m = \lambda \cdot L_p$$

On  $L_m$  és la longitud característica del model [m] i  $L_p$  és la longitud característica del prototipus [m].

La semblança geomètrica requereix per tant:

- Que la forma del model i prototipus sigui la mateixa.
- Que totes les longituds entre model i prototipus estiguin amb el mateix factor d'escala.
- Que tots els angles corresponents siguin iguals.

Ara bé per que hi hagi una semblança completa (perfecta o total), s'ha d'acomplir, a més a més, que hi hagi semblança cinemàtica i semblança dinàmica.

La **semblança cinemàtica** requereix que les velocitats en punts homòlegs del corrent, entre model i prototipus, guardin la mateixa relació de proporcionalitat i tinguin la mateixa direcció.

La **semblança dinàmica** requereix la semblança de les forces actuant entre model i prototipus. Els diagrames de forces en model i prototipus han de ser semblants. Per tant:

$$Re_m = Re_p$$

$$Fr_m = Fr_p$$

$$We_m = We_p$$

On  $Re_m$  és el nombre de Reynolds del model [adimensional] i  $Re_p$  és el nombre de Reynolds del prototipus [adimensional, el mateix passa amb altres nombres adimensionals com el nombre de Froude i el de Weber.

Sempre que s'aconsegueixi la semblança dinàmica tindrem semblança completa perfecta, donat que el fet de que s'aconsegueixi la semblança dinàmica comporta que es doni la semblança geomètrica i la semblança cinemàtica.

### 1.1.5.2 Semblança incompleta (imperfecta o restringida)

Considerem que volem determinar la força de resistència a l'avanç d'un gran vaixell en base a l'experimentació en un model a escala reduïda. La força de resistència és deguda a les forces viscoses i a les forces de resistència de les ones superficials:

$$C_D = f(Re, Fr)$$

Suposem que utilitzem un model amb una escala:

$$\lambda = \frac{1}{25} = \frac{L_m}{L_p}$$

Les condicions de Semblança Perfecta poden expressar-se com la igualtat dels paràmetres adimensionals, en aquest cas:

$$\text{Si } Re_m = Re_p \text{ i } Fr_m = Fr_p \text{ llavors: } C_{D,m} = C_{D,p}$$

$$Fr_m = Fr_p: \frac{U_m}{(g_m L_m)^{1/2}} = \frac{U_p}{(g_p L_p)^{1/2}} \rightarrow U_m / U_p = \left( \frac{L_m}{L_p} \right)^{1/2} = \frac{1}{5}$$

$$Re_m = Re_p: \frac{U_m L_m}{\nu_m} = \frac{U_p L_p}{\nu_p} \rightarrow \nu_m / \nu_p = \frac{1}{5} \cdot \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{125}$$

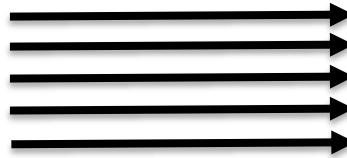
On  $U_m$  i  $U_p$  són les velocitats del model i el prototipus respectivament [m/s],  $g_m$  i  $g_p$  són les acceleracions de la gravetat del model i prototipus [ $m/s^2$ ],  $\nu_m$  i  $\nu_p$  són les viscositats cinemàtiques del model i del prototipus [ $m^2/s$ ] i  $L_m$  és la longitud característica del model [m] i  $L_p$  és la longitud característica del prototipus [m],

El prototipus operarà en aigua, per tant el model hauria d'experimentar-se en un fluid de viscositat cinemàtica 125 vegades inferior a la de l'aigua. Aquest fluid en principi no existeix. De fet l'únic fluid a utilitzar a efectes pràctics és també l'aigua. Així doncs, en aquest cas no és possible que els números de Reynolds i Froude del model i prototipus s'acompleixin simultàniament, sinó és construït un model a escala real (1:1).

En aquest tipus de casos, ens haurem de conformar amb una semblança imperfecta o restringida, que consisteix en menysprear la importància relativa d'alguns dels paràmetres i fer que s'acompleixi la igualtat de la resta de paràmetres adimensionals.

### 1.1.6 Flux laminar

Es diu flux laminar o corrent laminar, al tipus de moviment d'un fluid quan aquest és perfectament ordenat, suau, de manera que el fluid es mou en làmines paral·leles sense entremesclar-se. Es diu que aquest flux és aerodinàmic, és a dir, cada partícula de fluid segueix una trajectòria suau, anomenada línia de corrent.

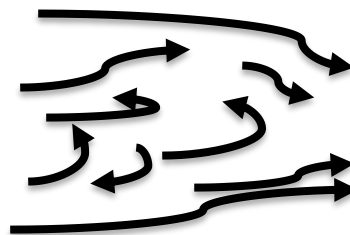


**Figura 1.3** Representació del flux laminar. [Autor]

Existeix flux laminar en fluids amb velocitats baixes o viscositats altes, quan es compleix que el nombre de Reynolds és inferior a 2300 (flux intern) a  $5 \cdot 10^5$  (flux extern –superfície plana llisa paral·lela al flux-).

### 1.1.7 Flux turbulent

El flux turbulent és més comunament desenvolupat a causa que la naturalesa té tendència cap al desordre i això en termes de fluxos significa tendència cap a la turbulència. Aquest tipus de flux es caracteritza per trajectòries circulars erràtiques, semblants a remolins. El flux turbulent ocorre quan les velocitats de flux són generalment molt altes o en fluids en els quals les forces viscoses són molt petites.



**Figura 1.4** Representació del flux turbulent. [Autor].

La turbulència pot originar-se per la presència de parets en contacte amb el fluid o per l'existència de capes que es moguin a diferents velocitats. A més, un flux turbulent pot desenvolupar-se ben sigui en un conducte llis o en conducte rugós. Es defineix com a flux turbulent al fluid que presenta un nombre de Reynolds major a 4000 (flux intern) i a  $3 \cdot 10^6$  (flux extern –capa plana llisa paral·lela al flux-).

### 1.1.8 Teoria de la capa límit

Si un cos es moguéssim en el buit o en un fluid no viscos ( $\mu = 0$ ) es desplaçaria sense esforç ( $\tau = 0$ ). Sent l'aire i l'aigua fluids molt poc viscosos no s'entenia per què oferien tanta resistència, a menys que el gradient de velocitat a la paret fos molt gran.

Per això ha d'existir una capa que de vegades és pot mesurar en micres, on la velocitat de les làmines passen de valer 0 en la paret a obtenir un 99% de la velocitat del flux, aquesta capa va ser anomenada per Prandtl (el fundador de la Mecànica de Fluids moderna), com capa límit.

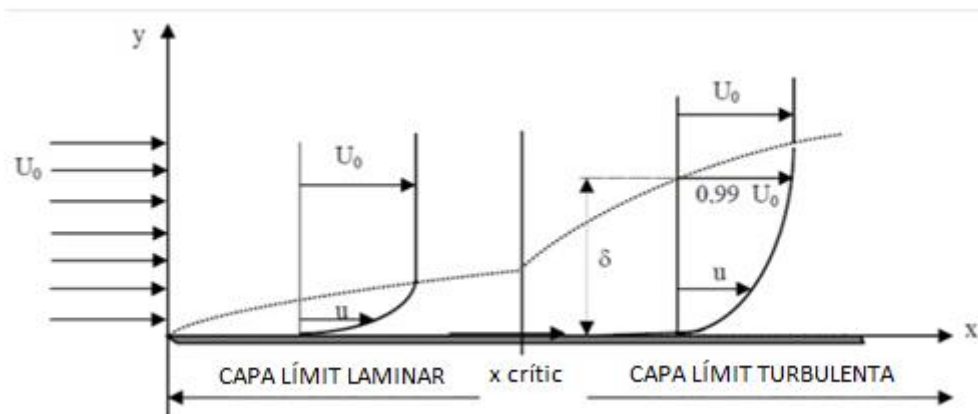


Figura 1.5 Representació del comportament de la velocitat  $U$  en les capes laminar i turbulenta. [Autor]

Si imaginem una placa molt fina i afilada com en la figura 1.5, el flux no sofreix pertorbació entrant a la làmina i seria flux laminar al principi. A mesura que avança, l'espessor de la capa augmenta i el perfil de velocitats canvia, l'esforç tallant en la paret va disminuint fins que no pot controlar la turbulència i la capa deixa de ser laminar, passant per una zona de transició fins a la zona turbulenta.

Al passar a la zona turbulenta, l'espessor de la capa augmenta de cop. La turbulència homogeneïtza les velocitats de les distintes làmines i el perfil deixa de ser parabòlic per ser potencial. Al llarg de la superfície, l'espessor de la capa augmenta i l'esforç tallant disminueix, fins a anul·lar-se a l'infinit si la superfície és plana.



Figura 1.6 Representació del comportament del flux en les diferents zones. [4]

### 1.1.8.1 Capa límit laminar

Imaginant una placa plana de  $L$  m de longitud, que és paral·lela al moviment relatiu del fluid, per trobar l'espessor de la capa límit a una distància genèrica es pot aplicar la següent equació:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}} = \frac{5}{\sqrt{\frac{Ux}{\nu}}}$$

On  $\delta$  és el gruix de capa [m],  $x$  és la distància del punt a estudiar respecte el principi de la placa [m],  $Re_x$  és el nombre de Reynolds a la distància on es voldria trobar el gruix de la capa límit [m],  $U$  és la velocitat relativa del flux [m/s],  $L$  és la longitud abans esmentada i  $\nu$  és la viscositat cinemàtica [m<sup>2</sup>/s]. [5].

### 1.1.8.2 Capa límit turbulenta

Imaginant una placa plana de la mateixa manera que a l'apartat anterior de la capa límit laminar suposant que tenim contorn llis, per trobar l'espessor de la capa límit a una distància genèrica es pot aplicar la següent equació:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,38}{Re_x^{\frac{1}{5}}}$$

On  $\delta$  és l'espessor de capa,  $x$  és la distància del punt a estudiar respecte el principi de la placa,  $Re_x$  és el nombre de Reynolds a la distància on es voldria trobar l'espessor de la capa límit,  $U$  és la velocitat relativa del flux,  $L$  és la longitud abans esmentada i  $\nu$  és la viscositat cinemàtica [5].

## 1.1.9 Principals equacions de l'aerodinàmica

### 1.1.9.1 Equació de continuïtat

El principi de conservació de la massa pot ser escrita en forma diferencial:

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

On  $\rho$  és la densitat del fluid [kg/m<sup>3</sup>],  $t$  és el temps [s] i  $V$  és el vector velocitat del fluid [m/s], essent  $\nabla$  l'operador divergència.

En cas de considerar flux en estacionari, l'equació de continuïtat s'expressa com:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0$$

De forma que en flux màssic entre dos punts 1 i 2 en un mateix conducte:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$

$$\rho_1 U_1 A_1 = \rho_2 U_2 A_2$$

On  $U$  és la velocitat [m/s] i  $A$  és l'àrea transversal al flux (m<sup>2</sup>).

En cas de poder considerar flux incompressible ( $\rho_1 = \rho_2$ ) i  $Q_1 = Q_2$ .

### 1.1.9.2 Segona llei de Newton (Equació de la quantitat de moviment)

L'aplicació de la segona llei de Newton a un element elemental de massa pot ser expressada com:

$$\Sigma \vec{F} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} dx \cdot dy \cdot dz$$

On el sumatori de forces actuant sobre l'element de massa serien les forces volumètriques (força gravitatòria) i les forces de superfície (degudes a pressions i esforços tangencials):

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad [\text{Força / Volum}]$$

En el cas de flux no viscos s'obté l'equació d'Euler:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g}$$

Mentre que per a un fluid newtonià amb flux incompressible, l'equació és la coneguda com equació de Navier-Stokes:

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$$

On les components del tensor de tensions són per un flux tridimensional:

$$\tau_{xx} = 2\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad \tau_{yy} = 2\mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \tau_{zz} = 2\mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

Pel que l'expressió de l'equació de Navier-Stokes en les tres direccions de l'espai és:

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

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

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

### 1.1.9.3 Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli afirma que energia total d'un sistema de fluids amb flux uniforme roman constant al llarg de la trajectòria de flux. En un fluid hi ha tres formes d'energia presents; l'energia potencial, l'energia cinètica i l'energia de flux. Si s'assumeixen dos punts al llarg de la trajectòria, distanciat un de l'altre, la magnitud de les energies en un punt poden variar pel que fa a l'altre, però la sumatòria total de les energies sempre serà la mateixa.

Quan el diàmetre d'un tub per on passa el flux es modifica, la velocitat també es modifica. De seguida, el canvi en l'energia cinètica necessita ser compensat per la reducció o augment de la pressió.

L'equació de Bernoulli s'usa per determinar els valors de càrrega de depressió, càrrega d'elevació i canvi de la càrrega de velocitat, conforme el fluid circula a través del sistema.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + h_f \pm H_s$$

On  $p$  és la pressió del fluid en un punt,  $\gamma$  és el pes específic del fluid (massa del fluid multiplicada per gravetat),  $U$  és la velocitat del fluid,  $\alpha$  factor corrector de l'energia cinètica (1 per turbulent i 2 per laminar),  $g$  és l'acceleració de la gravetat i  $z$  és l'alçada d'un punt mesurada des d'un nivell de referència,  $h_f$  són les pèrdues per fricció i  $H_s$  és l'alçada manomètrica d'una màquina hidràulica (positiu depenent de si és una turbina o negatiu si es una bomba).

### 1.1.9.4 Teoria de Darcy-Weisbach

El francès Henry Darcy i l'alemany Julius Weisbach van deduir experimentalment una fórmula per calcular en un tub les pèrdues per fricció:

$$\Delta h = f \frac{L U^2}{D 2g}$$

On  $\Delta h$  són les pèrdues expressades en forma d'alçada (mcf, metres de columna de fluid),  $f$  és el factor de fricció de Darcy,  $L$  és la longitud del tub,  $D$  és el diàmetre,  $U$  és la velocitat del fluid i  $g$  és l'acceleració de la gravetat. El factor de fricció en flux laminar és:

$$f = \frac{64}{Re}$$

On  $Re$  és el número de Reynolds. Aquesta variable es vàlida per tubs llisos o rugosos sempre i quan el flux sigui laminar.

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Per al flux turbulent, el factor de fricció s'ha de deduir mitjançant la equació desenvolupada per Colebrook y White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,869 \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,523}{Re\sqrt{f}} \right)$$

O bé, l'equació desenvolupada per Swamee-Jain:

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Valida dins dels intervals:  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$  i  $5000 \leq Re \leq 10^8$ .

On  $\varepsilon$  és la rugositat absoluta del tub. També es pot determinar de forma gràfica mitjançant el diagrama de Moody, però la precisió dels resultats pot ser menor degut al factor humà.

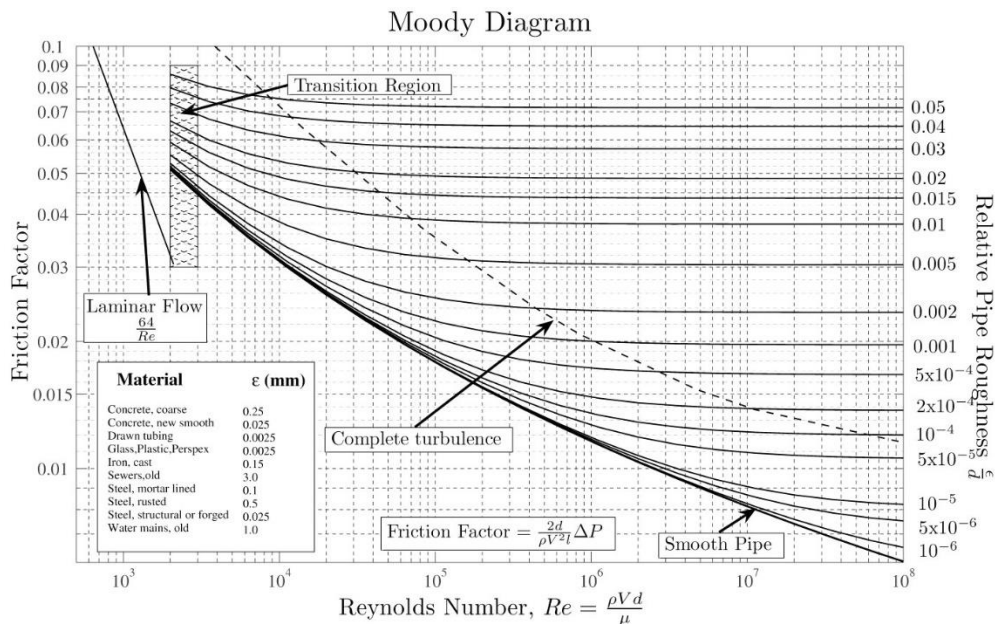


Figura 1.7 Diagrama de Moody.

## 1.1.10 Flux compressible

Tots els fluids són compressibles, incloent els líquids. Quan els canvis de volum són molt grans en un flux, es considera que aquest flux és compressible, és a dir, mostren una variació significativa de la seva densitat com a resultat de fluir, això succeeix quan la velocitat del flux és propera a la velocitat del so. Aquests canvis solen succeir principalment en gasos, degut a que per obtenir aquestes velocitats de flux de líquids es necessita pressions d'aproximadament 1000 atmosferes, en canvi un gas només necessita una relació de pressions de 2:1 per arribar a velocitats sòniques.



Els gasos en general són molt compressibles, en canvi, la majoria de líquids són molt poc compressibles. Per exemple, un canvi de 500 kPa provoca un canvi de densitat en l'aigua de només el 0,024 %, en canvi, aquest mateix canvi de pressió en l'aire, provoca un canvi de densitat del 250 %.

Els fluxos compressibles poden ser classificats de diverses maneres, la més utilitzada utilitza el número de Mach com a paràmetre:

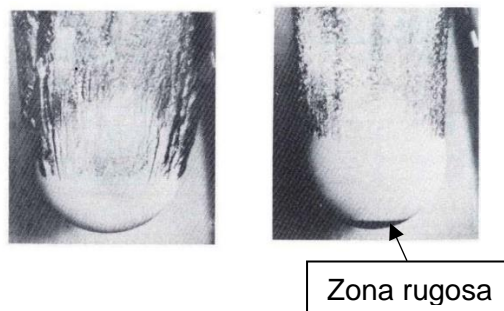
- **Pràcticament incompressible:**  $Ma < 0,3$  en qualsevol part del flux. Les variacions de densitat degudes al canvis de pressió poden ser depreciables, considerant densitat constant.
- **Flux subsònic:**  $Ma > 0,3$  en alguna part del flux però sense excedir 1 en cap part.
- **Flux transsònic:**  $0,8 \leq Ma \leq 1,2$ . Aquest flux és difícil d'analitzar degut a que normalment no es poden distingir les parts viscoses de les no viscoses.
- **Flux supersònic:**  $1,2 < Ma \leq 5$ .
- **Flux hipersònic:**  $Ma > 5$ .

#### 1.1.11 Resistències al flux

Quan un flux d'un fluid més o menys viscos, ja sigui aire, aigua, oli, etc, passa per l'interior o l'exterior d'un objecte, es creen unes resistències a l'avanç del flux o l'avanç de l'objecte, aquestes resistències es divideixen en resistència de forma i de superfície.

##### 1.1.11.1 Resistència de forma

Amb determinades formes i característiques del flux es pot originar desprendiment de la capa límit, creant un deixant, provocant una menor pressió per darrera l'objecte i, en conseqüència, una resistència a l'avanç, anomenada resistència de forma. Si es vol disminuir aquesta resistència, es té que dissenyar el contorn de forma que la separació succeeixi molt endarrere o que no succeeixi.

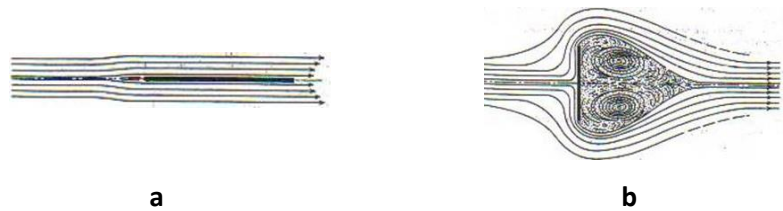


**Figura 1.8** Comparació de deixants de flux d'una esfera llisa (capa límit laminar) i una esfera amb una zona rugosa al front (capa límit turbulenta). [Autor]

La capa límit laminar és força més susceptible al desprendiment de la capa límit que la capa límit turbulenta, pel que els deixants formats darrera dels cossos són més grans si la capa límit és laminar (veure figura 1.8). Si la separació de la capa límit té lloc en la capa límit laminar, i en la part frontal del cos es col·loca una rugositat adequada, fent turbulenta la capa límit des del principi, l'esforç tallant augmenta a la primera part de la peça i triga més en anul·lar-se (punt de separació), per tant, l'estela es fa més estreta i la resistència de forma disminueix.

### 1.1.11.2 Resistència de superfície

És la resistència que s'obté del fregament del fluid amb l'objecte. Quanta més superfície estigui en contacte amb el fluid en moviment, més resistència oferirà.



**Figura 1.9** Comparació entre una alta resistència de superfície (a) amb una alta resistència de forma (b). [6]

### 1.1.11.3 Resistència total

La resistència a l'avanç o total és la suma de les resistències de forma i superfície. Com s'ha comentat abans (apartat 1.1.3), fent anàlisi dimensional es pot obtenir que:

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

On  $C_D$  és el coeficient de resistència o arrossegament [adimensional],  $F_D$  és la resistència d'avanç [N],  $A$  és l'àrea perpendicular al flux [ $m^2$ ],  $\rho$  és la densitat del fluid [ $kg/m^3$ ] i  $U$  és la velocitat del mateix [m/s] [6].

En la majoria de cossos com esferes, cilindres, cotxes, míssils, projectils, etc, la força predominant és la resistència de forma.

### 1.1.12 Força de sustentació

La força de sustentació és la força perpendicular a la direcció del flux i de sentit a la zona de menor pressió estàtica. A l'igual que la força de resistència, mitjançant anàlisi dimensional s'obté:

$$F_L = C_L A \frac{1}{2} \rho U^2$$

On  $F_L$  és la força de sustentació [N],  $A$  és la superfície que produeix sustentació [ $m^2$ ],  $C_L$  és el coeficient de sustentació [adimensional],  $\rho$  és la densitat [ $kg/m^3$ ],  $U$  és la velocitat [m/s]. Essent  $\frac{1}{2} \rho U^2$  la pressió dinàmica, que es produeix quan la inèrcia del moviment del fluid produeix un increment de la pressió estàtica al colpejar sobre una superfície perpendicular al moviment [6].

Per tant, per augmentar la força de sustentació, haurem d'augmentar, o bé, la superfície de l'element que produeix sustentació, la densitat del fluid, la velocitat del flux relatiu o bé el coeficient de sustentació que depèn de l'objecte en qüestió.

## 1.2 TÚNELS DE VENT

Aquest apartat es basa en l'article "Diseño aerodinámico de un túnel de viento a bajas velocidades" [7] i en el llibre "Low-speed tunnel testing" [8]. En enginyeria, un túnel de vent o túnel aerodinàmic és una instal·lació de recerca en el qual s'obtenen fluxos d'aire rectilini i uniforme a una velocitat determinada en la càmera d'assajos, es desenvolupa per assistir als estudis dels efectes del moviment de l'aire al voltant dels objectes sòlids.

El primer túnel de vent va ser construït per Wenham en 1871 i posteriorment altres investigadors com Reynolds, Tsiolkovsky, Lilienthal, Langley, Prandtl, von Karman, entre altres, van utilitzar aquests túnels en els seus treballs experimentals introduint millores en el seu disseny.

Un túnel de vent és una eina útil en la recerca de la mecànica dels fluids tenint com a principals avantatges la reducció de l'objecte d'estudi a un model a escala, optimització en el disseny i funcionament del model, control de les condicions de flux, repetibilitat dels assajos, així com el temps i l'economia, que generen avantatges enfront de les proves que es realitzen en el camp. No obstant això, el túnel presenta l'inconvenient de l'elevat cost d'instal·lació, especialment per a l'assaig d'objectius de grandària real. Avui dia, la utilitat d'un túnel de vent és òbvia (el primer que es pensa és en els túnels de vent dels fabricants d'automòbils), ja existeixen túnels de vent de grans dimensions, capaços d'assajar models a escala real i que funcionen en una àmplia gamma de velocitats, com els túnels supersònics.

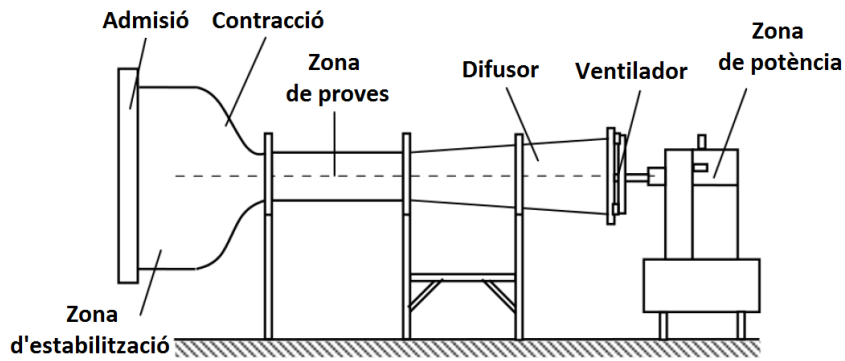


Figura 1.10 Esquema de les parts d'un túnel aerodinàmic obert i aspirat. [Autor]

La majoria dels dissenys de túnels de vent tenen sis components o seccions característiques com són les zones d'admissió, d'estabilització, de contracció, de prova o d'assaig, el difusor i la unitat de potència o ventilador. Aquestes parts es mostren en la Figura 1.10. El disseny total, crea un flux d'aire a alta velocitat i de baixa turbulència, que és dirigit a través de la secció de prova i permet que en els processos de recerca es mesurin les interaccions, que produeixen el conjunt flux d'aire-model, com les forces resultants, els coeficients aerodinàmics, els efectes de turbulència, entre uns altres.

Les innovacions introduïdes, principalment en la seva construcció, planta de potència i regulació, fan que siguin altament costosos i d'altres prestacions, així com adequat per a una gran varietat d'aplicacions, com per exemple, assajos aeronàutics, enginyeria civil, arquitectura, energies renovables, medi ambient, entrenament esportiu i recerca i desenvolupament agrícola.

### 1.2.1 Tipus de túnels de vent

Existeixen diverses maneres de classificar els túnels de vent. Atenent al tipus de configuració, els túnels poden ser: **oberts**, on un ventilador succiona l'aire a través del conducte del túnel i després, expulsa l'aire de nou a l'exterior; o **tancats**, anomenat també túnel de recirculació perquè l'aire és forçat a circular en forma indefinida per l'interior del túnel.

Dintre dels túnels de vent oberts hi ha una altra possible classificació: els **bufats**, el que té el grup de ventiladors abans de la càmera d'assajos i els **aspirats**, el que té el grup de ventiladors després de la càmera d'assajos. Les dues configuracions tenen avantatges i inconvenients, una vegada més dependrà de l'ús que vulguem donar-li. Per fer-nos una idea, el túnel bufat proporciona més velocitat que l'aspirat. Si mirem la uniformitat del flux, veiem que en la configuració d'aspiració el flux és més regular i uniforme.

Una altra forma de classificació dels túnels és d'acord al seu règim de treball o tipus de flux, és a dir, a la velocitat de l'aire a la zona de prova, aquí es classifiquen com: **subsònics**, on la velocitat

de l'aire a la zona de prova no supera la velocitat crítica amb nombre de Mach menors de 0.75; **transsonics** amb  $0.75 < M < 1.2$ ; **supersònics** amb  $1.2 < M < 5$ ; o **hipersònics** amb  $M > 5$ .

També es poden classificar pel disseny de la secció de prova, els túnels de vent es classifiquen com: amb **secció d'assaig tancada**, on la secció de prova és una continuació de la secció de sortida de la zona de contracció i està limitada per parets sent generalment una zona de secció constant; o bé, amb **secció d'assaig oberta**, on la secció d'assajos no està confinada per les parets, l'aire de l'interior del túnel es barreja amb l'exterior, disminuint gairebé totalment el problema d'errors introduïts a causa de la proximitat de les parets al model i la seva interferència amb el flux.

### 1.2.1.1 *Circuit obert*

Aquests tipus de túnels aerodinàmics són els més simples, fàcils i econòmics de dissenyar i construir, a més de poder-se fabricar en dimensions reduïdes. En aquest tipus de túnel com el representat a la Figura 1.10, l'aire entra directament des de l'exterior fins la secció de proves i després és expulsat a l'exterior. A més, es veuen menys afectats per les fluctuacions de temperatura i disturbis en el retorn de l'aire, per l'existència d'un volum d'aire disponible molt més gran.

Existeixen dos tipus bàsics de túnels de cycle obert, els bufats i els aspirats. Les seves diferències radiquen en la posició del ventilador. El ventilador del túnel bufat, es situa a l'entrada o contracció del túnel i el de l'aspirat s'ubica a la sortida, després del difusor.

El túnel de bufat és el més flexible degut a que el ventilador es situa a l'interior del túnel, d'aquesta manera es pot intercanviar la secció de proves amb variacions importants del flux, i fins i tot, es pot arribar a eliminar el difusor, facilitant l'accés a la secció de proves i els instruments de mesura. No obstant, provoca pèrdues de potència. Són túnels energèticament més eficients que els aspirats, d'aquesta manera els costos d'operació es redueixen. La desacceleració del fluid en el difusor és més eficient, reduint les pèrdues de càrrega.

El túnel aspirat és més propens a sofrir inestabilitats en el flux que el bufat, d'altra banda existeix menys turbulències per que l'aire no travessa el ventilador abans d'entrar a la secció de proves.

#### 1.2.1.1.1 Parts dels túnels de vent oberts

Cada component o secció característica realitza una funció en l'esquema, que s'explica breument a continuació.

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

La **zona d'admissió** és pràcticament l'entrada al conducte principal del túnel i la seva funció és evitar la desestabilització dels corrents d'aire i la formació i propagació de les turbulències que es deuen a canvis abruptes de la velocitat del vent.

La **zona d'estabilització** és una zona d'àrea constant on es troben el corrector del flux i les reixetes estabilitzadores. Permet que el flux entrant pugui passar a la zona de contracció com un flux uniforme i de poca turbulència.

La **zona de contracció** és una zona on ocorre la disminució de l'àrea de pas del túnel i la seva funció és accelerar el flux i disminuir les variacions de velocitat. En aquesta zona, el fluid s'accelera fins a aconseguir la velocitat de disseny a la zona de prova.

La secció de treball o **secció de proves** és la zona on normalment s'instal·la el model d'estudi i on la velocitat del flux aconsegueix el seu règim de prova, sent les línies de corrent uniformes i paral·leles.

El **difusor** té la funció principal de disminuir la velocitat de sortida del flux, gràcies a un increment de l'àrea de pas. Amb això, s'augmenta gradualment la pressió i es disminueix la velocitat del flux, la qual cosa fa disminuir les pèrdues per fricció.

Finalment, l'aire per si solament no va a passar espontàniament pel túnel de vent. Perquè l'aire travessi el túnel és necessari induir a l'aire a travessar el túnel. Això s'aconsegueix amb una **unitat de potència**, que en la majoria dels casos és un **ventilador**, que proporciona la força necessària per moure l'aire a través del túnel de vent.

### 1.2.1.2 Circuit tancat

Com el seu nom indica, connecten directament la sortida del difusor amb l'entrada del túnel. Aquests túnels són normalment més llargs i difícils de construir, a més el seu disseny és més exigent ja que es centren en buscar la qualitat del flux.



**Figura 1.11** Túnel de vent tancat per models a escala real. [www.f1aldia.com]

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

En la cambra de proves, es genera un corrent d'aire de velocitat controlada, el sistema de propulsió (ventilador i l'equip regulador), s'encarrega de fer circular l'aire. Consta així mateix de difusors la funció del qual és uniformitzar el corrent d'aire. La contracció disminueix la secció de forma suau fins a la càmera de proves, accelerant el corrent fins a la velocitat que ha de tenir en ella, i complint funcions importants des del punt de vista de la qualitat del corrent, com són el disminuir el nivell de turbulència i el millorar la uniformitat del perfil de velocitats i l'adreça del corrent. En ser un túnel de circuit tancat, és necessari forçar al corrent a realitzar girs, però de manera ordenada, sense elevar més enllà del raonable la pèrdua de càrrega ni introduir perturbacions en el corrent.

Aquests túnels aerodinàmics poden incloure compressors de múltiples etapes i arribar a crear fluxos transsònics o supersònics.

### 1.2.1.2.1 Parts dels túnels de vent tancats

Aquest tipus de túnels de vent, tenen més parts que els oberts:

Com en els túnels de vent oberts, la secció de treball o **secció de proves** és la zona on normalment s'instal·la el model d'estudi i on la velocitat del flux aconsegueix el seu règim de prova, sent les línies de corrent uniformes i paral·leles.

Després de la cambra de proves, es col·loca un **difusor** de baix angle (com els túnels oberts). Té la funció principal de disminuir la velocitat de sortida del flux, gràcies a un increment de l'àrea de pas. Amb això, s'augmenta gradualment la pressió i es disminueix la velocitat del flux, la qual cosa fa disminuir les pèrdues per fricció.

A diferència dels túnels aerodinàmics oberts, els tancats tenen quatre **cantonades** que permeten retornar el flux d'aire que ha sortit de la cambra de proves fins l'entrada de la mateixa. Aquestes cantonades tenen àleps per guiar el flux i disminuir les pèrdues. La primera i segona cantonada han de ser iguals entre elles, el mateix passa amb la tercera i la quarta.

Després de la primera cantonada, hi pot haver una **secció constant** o un **difusor d'angle reduït**. Tot seguit se sol instal·lar una **mall de seguretat** per evitar que hi puguin entrar elements que puguin afectar el funcionament del ventilador que hi ha més endavant.

Després de la segona cantonada se situa el **ventilador**, que proporciona la força necessària per moure l'aire a través del túnel de vent. El ventilador, impulsa l'aire per un altre **difusor de baix angle** que segueix les mateixes normes que els altres dos.

Tot seguit, l'aire passarà per la tercera cantonada i entrarà en una **secció constant** amb un **intercanviador de calor** que permet regular la temperatura del fluid, enviant el fluid a la quarta cantonada.

Després de la quarta cantonada, es col·loca un **difusor de gran angle**, en el qual s'hi ha d'instal·lar una o més malles estabilitzadores.

La **zona d'estabilització** va després del difusor de gran angle, és una zona d'àrea constant on es troben el corrector del flux i les reixes estabilitzadores. Permet que el flux entrant pugui passar a la zona de contracció com un flux uniforme i de poca turbulència.

Per últim, abans d'entrar a la cambra de proves, la **zona de contracció** és una zona on ocorre la disminució de l'àrea de pas del túnel i la seva funció és accelerar el flux i disminuir les variacions de velocitat. En aquesta zona, el fluid s'accelera fins a aconseguir la velocitat de disseny a la zona de prova.

### **1.2.1.3** *Túnel subsònic*

Els túnels de vent de poca velocitat s'utilitzen per les operacions de baix nombre de Mach, amb velocitats en la cambra de proves de fins 400 km/h (aproximadament 100 m/s o 0,3 Ma). L'aire es mou amb un sistema de propulsió fet amb un ventilador axial gran que augmenti la pressió dinàmica amb la finalitat d'evitar pèrdues del fluid viscos.

### **1.2.1.4** *Túnel transsònic*

Els túnels de vent transsònics ( $0,75 < Ma < 1,2$ ) o subsònics alts ( $0,4 < Ma < 0,75$ ) es dissenyen amb els mateixos principis que els subsònics. Els túnels de vent transsònics poden aconseguir velocitats properes a la velocitat del so. La velocitat més alta s'aconsegueix a la secció de proves. El número de Mach és aproximadament 1 amb zones subsòniques i supersòniques combinades en el flux.

La prova a velocitats transsòniques presenta problemes addicionals, principalment degut a la reflexió de les ones expansives de les parets de la secció de proves. Per tant, es necessiten parets perforades o ranurades per reduir la reflexió del xoc de les parets. Com que succeeixen interaccions viscoses i no viscoses importants (com la interacció de les ones expansives o de la capa límit), el número de Mach i Reynolds són importants.



#### **1.2.1.5 Túnels supersònics**

Aquest túnel de vent produeix velocitats de flux supersòniques, sobrepassant la barrera del so ( $1,2 < Ma < 5$ ). El número de Reynolds es varia canviant el nivell de densitat. Per tant, es necessita un quocient d'alta pressió (per  $Ma=4$ , el quocient hauria de ser de l'ordre de 10). A part d'això es pot produir condensació o líquefacció, això significa que un túnel aerodinàmic necessita ser sec o amb facilitat de preescalfament. Aquest tipus de túnel de vent té una gran demanda d'energia, tot i que les seves operacions han de ser intermitents.

#### **1.2.1.6 Túnels hipersònics**

La velocitat d'aquests túnels varia de Mach 5 a Mach 15. Com els túnels aerodinàmics supersònics, aquests tipus de túnels han de funcionar de manera intermitent amb els quocients de molt alta pressió quan s'inicialitzen. Com que la temperatura augmenta amb el flux, en l'interior, l'aire tendeix a tornar-se líquid. Degut a això, el preescalfament és particularment crític.

#### **1.2.1.7 Túnels amb cambra d'assaigs tancada**

En aquest cas, la cambra de proves romandrà tancada, sense deixar que l'aire del flux s'escapi i creant una zona de secció constant. Això redueix les pèrdues de càrrega pel cabal que pugui sortir del flux normal. Les dimensions dels models hauran de ser inferiors a les de la cambra.

#### **1.2.1.8 Túnels amb cambra d'assaigs oberta**

La cambra d'assaigs d'aquests tipus de túnels de vent quedarà oberta, permetent que una part del flux s'escapi per les seves obertures. En una càmera oberta podrem posar models més grans i l'aire de l'interior del túnel es mescla amb l'exterior, reduint el problema d'errors introduïts a causa de la proximitat de les parets al model i la seva influència en el flux. El desavantatge que té és que tenim el flux d'aire menys controlat, a més d'augmentar la pèrdues relacionades amb l'aire que s'escapa.

### **1.2.2 Instrumentació electrònica dels túnels de vent**

La instrumentació necessària per fer proves en un túnel de vent és altament especialitzada en vista de que depèn de la informació que es desitja obtenir de la condició de flux en la secció de proves, per la qual cosa no és possible seleccionar un conjunt complet d'instrumentació sense incórrer en costos molt elevats. Dit això, hi ha una sèrie d'equips clau que són comuns a les

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

proves que s'han esmentat en aquest document, necessaris per a l'execució de pràctiques de laboratori, demostracions, i recerques qualitatives.

<b>Sistema</b>	<b>Components</b>	<b>Funció</b>
<i>Caracterització del flux</i>	-Sensors de velocitat -Sensors de pressió	-Mesurar velocitats locals -Mesurar pressions locals -Quantificar el grau de turbulència -Calibrar el túnel de vent
<i>Visualització del flux</i>	-Generadors de fum -Distribuïdors de partícules -Càmeres d'alta velocitat -Processadors d'imatges	-Mostrar les línies de flux -Mostrar les zones turbulentes o estancades -Registrar imatges -Posprocés d'imatges per verificar velocitat i vòrtex
<i>Balança per models</i>	-Dinamòmetres -Models per Calibració -Codificadors de posició	-Mesurar forces que suporta el model -Obtenir factors de correcció de paret -Calibrar el túnel de vent
<i>Mesura automàtica</i>	-Sistemes d'adquisició de dades -Accessoris i transductors -Controladors industrials (PLC)	-Registrar mesures de posició, velocitat, pressió i càrrega -Comunicació bidireccional amb el sistema de control dels ventiladors

**Taula 1.** Instrumentació bàsica per un túnel de vent. [9]

Uns dels elements més utilitzats en l'equipament d'un túnel aerodinàmic de laboratori són els transductors de pressió, de càrregues, de velocitat i les balances.

Un transductor és un dispositiu que en rebre un senyal d'entrada d'un cert sistema subministra un senyal de sortida a un altre. Els transductors convencionals de pressió funcionen gràcies a algun element elàstic que es deforma a causa del senyal d'entrada del sistema de pressions, proporcionant un senyal de desplaçament al sistema mecànic de mesura.

Molts instruments porten a més una segona unitat que transforma el desplaçament en un senyal elèctric, la qual cosa facilita l'automatització del procés de mesura, a causa de la facilitat amb la qual els senyals elèctrics poden ser amplificades, transmeses, controlades i llegides. Els transductors que incorporen en el seu disseny aquesta segona unitat elèctrica, són coneguts com a transductors elèctrics i es poden classificar en actius o passius:

- Un **transductor elèctric actiu** és aquell que genera directament un senyal elèctric en funció del desplaçament del sistema mecànic.
- Un **transductor passiu** és, al contrari, el que requereix una entrada elèctrica auxiliar que és modificada en funció del desplaçament del sistema elàstic.

Hi ha transductors que utilitzen exclusivament elements elàstics sòlids: com a tubs en espiral la deformació del qual depèn de la pressió en el seu interior, manxes, diafragmes, etc, encara que aquest tipus de transductors solen ser de poca aplicació en un laboratori a causa de la

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

conveniència que un senyal de sortida sigui elèctrica. Respecte als transductors elèctrics, un exemple típic de transductors actius són els piezoelèctrics, mentre que en el grup dels passius estan inclosos els basats en l'ús de galgues extensiomètriques.

També són transductors passius les cèl·lules de càrrega. En essència, una cèl·lula de càrrega és una barra metàl·lica instrumentada amb extensòmetres. En aplicar una càrrega axial, la deformació a tracció o compressió de la barra, mesura amb els extensòmetres, proporciona un mesurament de la càrrega aplicada.

Respecte als mesuradors de velocitat, sens dubte el més conegut és el tub de Pitot. L'equació de Bernoulli estableix la relació entre la pressió estàtica i la dinàmica al llarg d'una línia de corrent en un flux no viscos, incompressible i estacionari, és a dir, la pressió total de totes les partícules fluïdes que discorren al llarg d'una mateixa línia de corrent és la mateixa.

Una altra manera, més sofisticada, de mesurar velocitats en fluids és el que es coneix amb el nom de anemometria de fil calent, que es basa en el fet que un fil conductor escalfat elèctricament sotmès a una corrent incident és refredat per aquesta. La resistència elèctrica del fil depèn de la temperatura i aquest fet proporciona un mitjà per mesurar la temperatura fàcilment o per mantenir-la constant si això és el que es desitja. El fil sol ser de diàmetre molt petit (menys d'una desena de mil·límetre) i està integrat en un pont de Wheatstone per mesurar amb precisió els canvis de resistència elèctrica del fil, modificant-se l'alimentació de manera que la temperatura del fil romangui constant. La potència elèctrica requerida per mantenir la temperatura constant proporciona una mesura de la refrigeració produïda pel moviment de l'aire, i aquesta, de la velocitat.



**Figura 1.12** Anemòmetre de fil calent. [www.pce-iberica.es]

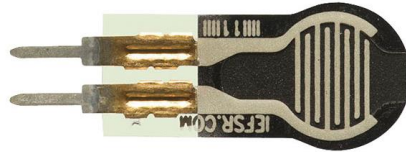
La balança aerodinàmica és un instrument precís per al mesurament de les forces i moments actuants sobre un model en un túnel de vent. A diferència de les balances comunes, que serveixen per mesurar forces actuant en una adreça coneguda, les balances de túnel de vent han de mesurar no tan sols forces aerodinàmiques l'adreça de les quals de la resultant és desconeguda, sinó que també moments al voltant de certs eixos, a causa d'aquesta resultant.

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

La principal característica d'una balança de túnel de vent és la quantitat de components a mesurar, depenent de l'assaig a considerar, aquest nombre pot variar d'un a sis. Depenent de la seva localització, les balances de túnel de vent poden ser classificades en 2 grups:

- **Balances externes** situades fora del model i dins de la càmera de proves.
- **Balances internes** situades a l'interior del model o els seus suports.



**Figura 1.13** Sensor de balança. [Interlink Electronics FSR 400 Datasheet, Annex C]

### 1.2.3 Calibració

El primer pas després d'acabar el túnel de vent és el determinar les característiques del flux. Primer és necessari aclarir les magnituds de les variables i definir els instruments de mesurament, tant per a les proves com per al calibratge. Aquest apartat es basa en la referència [4].

#### 1.2.3.1 Pressió

En el mesurament de pressió es distingeixen 3 categories bàsiques, estàndard, galgues mecàniques, i transductors electromecànics. Els instruments estàndard són usats per als calibratges més precisos. Els manòmetres de columna líquida són els més precisos i comuns.

Els instruments de galgues mecàniques són més econòmics i els dispositius més usats per mesurar pressió. I els transductors electromecànics cada vegada es fan més comuns. L'anell piezomètric de múltiples tubs és una opció molt convenient per establir condicions de pressió adequats per ser mesurats.

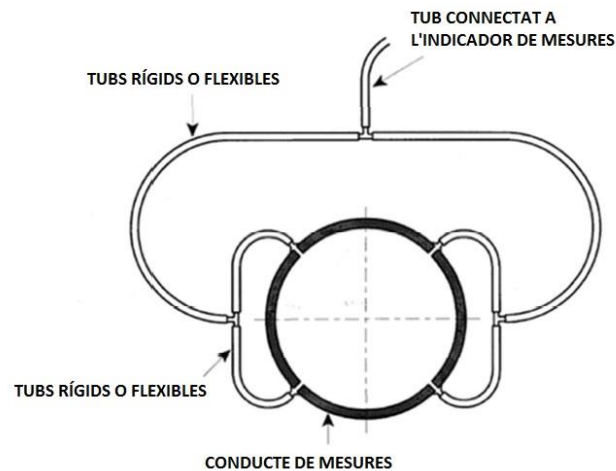


Figura 1.14 Anell piezomètric de múltiples tubs. [Autor]

### 1.2.3.2 Velocitat

El mesurament de velocitat es realitza mitjançant anemòmetres. Existeixen diferents tipus d'anemòmetres com el de deflexió de plaquetes, el de propulsor o paleta rotatòria, el de culleres, el tèrmic i el làser (Doppler), entre uns altres.

També s'utilitza el tub Pitot. Est és usat per mesurar la pressió total. El tub Pitot estàtic és el més comú i serveix per mesurar la pressió total i la pressió estàtica. Es determina la velocitat en un punt del camp de flux. L'equació per determinar la velocitat de l'aire per mitjà del mesurament de la pressió de velocitat està donada per:

$$U = \sqrt{\frac{2P_w}{\rho}}$$

On  $U$  és la velocitat que volem obtenir [m/s],  $P_w$  és la pressió de velocitat que es llegeix del tub Pitot [ $N/m^2$ ] i  $\rho$  és la densitat de l'aire [ $kg/m^3$ ].

Ja que la velocitat en cada secció d'un conducte no és uniforme, i la lectura del tub Pitot solament mesura la velocitat en un punt, ha de determinar-se una mitjana de velocitats (la més baixa en les parets i la major al centre de conducte). Per determinar aquestes velocitats en el plànol transversal s'ha de fer referència a la regla logarítmica de Tchebycheff.

Aquesta regla proporciona la millor precisió ja que la posició dels punts pren en compte l'efecte friccional de les parets i la caiguda de velocitat prop de les parets del conducte. L'explica molt clarament les distribucions de punts de mesurament tant per a conductes circulars com a rectangulars.

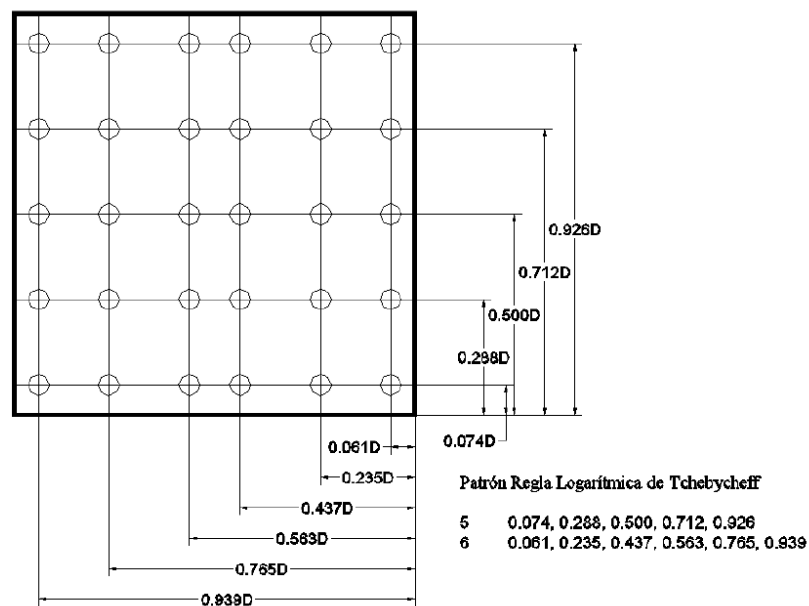


Figura 1.15 Patró de la regla logarítmica de Tchebycheff. [4]

Per a un conducte rectangular, el plànol transversal ha de contenir un mínim de 25 punts de mesurament. Per a conductes amb costats menors a 450mm, els punts han de col·locar-se al centre d'àrees igualment distribuïdes, amb no més de 150mm de separació, i un mínim de 2 punts per costat. Per a conductes majors als 1400 mm, la distància màxima entre punts és de 200mm.

Si és possible els punts de mesurament han de localitzar-se almenys 7.5 diàmetres del doll a baix i 3 diàmetres del doll a dalt de qualsevol pertorbació, com a cantonades o altres components que alterin la uniformitat del flux, els condicionadors de flux milloren considerablement la precisió dels mesuraments, i permet reduir les distàncies recomanades per realitzar-les.

### 1.2.3.3 Cabal

A pesar que existeixen mètodes per al mesurament de cabals, tots aquests impliquen canvis en la disposició del sistema, entorpint les condicions per mantenir el flux el més uniforme possible durant les proves aerodinàmiques. Aquests són els mètodes, encara que la intenció no és implementar-los en el túnel. Venturi, placa orifici, tovera; Fluxòmetres d'àrea variable (rotatoris); comptadors de desplaçament positiu; Fluxòmetre de turbina.

#### 1.2.3.4 Calibració de balances

El calibratge de la balança té com a objectiu els següents propòsits:

- Verificar el rang de càrrega disponible
- Determinar la corba de calibratge de cada component
- Conèixer la iteració de la balança
- Precisar la sensibilitat de cada component
- Mesurar el seu deflexió baix carrega
- Documentar la repetició dels mesuraments

El calibratge bàsicament és un procés que simula, sobre la balança, les càrregues aerodinàmiques en cada component, es registra les lectures en els sensors de força per resistència i després es calcula la corba de calibratge de cada sensor de balança, es processa la inversa de les corbes i s'obté una funció algebraica que permet estimar segons els mesuraments, en el conjunt de sensors, la càrrega en cada component.

#### 1.2.4 Aplicacions

Aquest apartat està basat en la referència [8]. Els túnels de vent es poden associar a recerques de molts tipus. Com per exemple:

**Patrons de moviment de vent prop d'accidents geogràfics.** Per mitjà d'imatges, fils de fum i sistemes de processament d'imatges afins, s'obté una perspectiva de les línies de flux i zones amb flux rotacional o estancat a les diferents àrees que inclogui el model físic. Els mesuraments directes de velocitat i pressió en general no són molt significatives atès que els efectes d'escala afecten molt la precisió dels resultats. Els factors d'escala usals es troben entre 1:750 i 1:5000.

**Camps de velocitats i pressions del vent.** Quan es tracti de models d'edificis i d'estructures i altres construccions amb factors d'escala entre 1:50 i 1:150, es poden fer mesuraments directes de velocitat i de pressió directament en la superfície del model o en zones allunyades de les parets del túnel de vent sense que es perdi precisió per interferència de l'instrument de mesurament. Amb els factors de correcció adequats es poden extrapolar els resultats a un model a escala natural amb precisió suficient per prendre decisions d'enginyeria.

**Patrons d'erosió i transport en terrenys.** Si es tria un material amb la cohesivitat, densitat i rugositat superficial adequades, es pot observar l'acció directa del vent atmosfèric en models a escala reduïda de terrenys susceptibles a l'erosió. Això és d'especial utilitat per a models de terrenys irregulars on es necessita conèixer l'efecte de la topografia, la vegetació i les barreres en els patrons i magnitud relativa dels processos d'erosió per vent. Necessiten complementar-se amb altres models fos del túnel que agreguin la component de les precipitacions o de l'erosió hidràulica.

**Patrons d'arrossegament d'inundacions per efecte del vent.** Per a certs factors d'escala funció de l'espessor de la capa d'aigua, es pot determinar la direcció i patró general de moviment d'aigua arrossegada per efecte del vent atmosfèric en models limitats de zones costaneres.

Aquests models són difícils de calibrar per a factors d'escala alts i en general són d'interès didàctic per a certes configuracions conegudes. Patrons de dany a vegetació en terrenys irregulars. Per mitjà de models de terrenys amb vegetació, es pot determinar per mesurament directe de velocitat el dany probable a la vegetació per àrees i per tipus de flux (zones estancades, d'alta turbulència, o d'altres velocitats per efecte Venturi). Com menor sigui el factor d'escala, més precisos seran els resultats, i això al seu torn depèn de la grandària real de la vegetació que es necessita valorar.

**Visualització de patrons de dispersió de contaminants.** En el model d'una fàbrica per exemple, es pot alliberar un marcador gasós o una suspensió de partícules per determinar la direcció, distribució i grau de dispersió que tindria. La precisió del model és funció de la densitat mitjana i de la difusivitat a escala del marcador en proporció a les relacions que es donarien a escala natural amb el contaminant que es desitja modelar.

**Experiments qualitius de ressonància per retroalimentació.** La interacció entre el vent atmosfèric i una estructura elàstica (com la vela d'una embarcació) és un fenomen complex, ja que és necessari que l'elasticitat del model porti una proporció molt precisa; a més, a escala natural l'afecten molts factors com la variabilitat de la velocitat del vent, vorticitat irregular i altres càrregues actives que no depenen del vent. Per tant, la construcció de models és molt costosa i d'utilitat limitada a una aplicació molt particular, però és un dels pocs camps en què els models numèrics encara no produeixen resultats suficientment precisos atès que la freqüència i manera de ressonància del fluid (estrictament el fluid no ressona, sinó que exhibeix patrons de turbulència en fase amb la deformació de l'estructura) l'afecta la deformació periòdica del sòlid elàstic, que al seu torn rep una càrrega variable perquè la seva orientació respecte al fluid canvia la càrrega que el fluid exerceix.

**Demostracions i experiments clàssics en mecànica de fluids.** Si bé, molts experiments i demostracions de mecànica de fluids es faciliten si es duen a terme en un túnel de vent de petites dimensions, hi ha algunes experiències que seran més valuoses en un túnel de vent amb una secció transversal de major grandària, encara quan la velocitat de flux sigui considerablement menor. Quan es necessiti visualitzar flux potencial tridimensional, o si es necessita generar un perfil de velocitats i pressions en un objecte de geometria complexa, la secció transversal ajuda al fet que els mesuraments resultin més repetibles i conseqüents amb resultats d'altres fonts, de models numèrics o plantejaments teòrics.

Moltes d'aquestes proves no responen a una disciplina única, ja que combinen la mecànica dels fluids amb la determinació dels efectes que té sobre un sistema, que pot ser elàstic, particulat, sòlid, o senzillament un estudi geomètric. Aquesta mateixa configuració de túnel de vent permetria a més proves relacionades amb la determinació de forces i turbulències locals en



construccions civils, verificació de sistemes amb ventilació natural o obtenció de velocitats de flux en àrees de trànsit per als vianants o vehicles.

**Docència.** D'altra banda, hi ha una gran quantitat d'activitats regulars de docència o de difusió general que poden aprofitar un flux constant d'aire en condicions controlades de velocitat i vorticitat, sempre que es disposi dels instruments de mesurament pertinents al tipus de prova que es desitja executar. Els túnels de vent per docència solen ser petits degut a les limitacions de pressupost i d'espai, ja que han de compartir el laboratori on estiguin situats amb altres aparells de la mateixa o altres disciplines.

Les aplicacions docents són aquelles que no necessiten d'un gran túnel de vent per a poder-se realitzar adequadament, solen estar relacionades amb el càlcul de forces que afecten a un objecte o amb les propietats del flux que afecta a l'objecte d'estudi:

- **Càlcul de coeficients de resistència i sustentació.** Aquesta és l'aplicació docent més bàsica i senzilla de realitzar. Amb els sensors corresponents, es mesuren les forces que afecten el model que s'està estudiant i coneixent les característiques del model i del flux del túnel de vent, es poden calcular els coeficients de resistència i de sustentació.
- **Mesura de diferències de pressió.** Aquesta aplicació se sol utilitzar en perfils alars, ja que la diferència de pressió en les ales d'un avió és una variable bàsica pel seu funcionament.
- **Mesura de la variació de velocitat del flux.** Aquesta aplicació vol determinar la variació de la velocitat del flux al voltant del model.
- **Observació de canvis en el flux canviant característiques del model.** Aquesta és la aplicació més difícil d'aconseguir en un túnel de vent de mida reduïda (amb models petits) i no aporta dades concretes, ja que és visual. Consisteix en deixar que el fluid mogui un fum al llarg del seu recorregut o bé una substància líquida, com la parafina, per la seva superfície per observar el seu moviment.
- **Càlcul d'aleteig en perfils.** Aquesta aplicació es pot realitzar amb qualsevol model però en perfils és més adequat per a túnels de petites dimensions. L'aleteig és un fenomen aeroelàstic que succeeix quan un cos es deforma sota una càrrega aerodinàmica, si la vibració produïda coincideix amb la freqüència natural de l'objecte, aquest objecte pot arribar a col·lapsar. És per això, que és un factor clau en la construcció d'ales d'avions o de ponts.

## 2 DISSENY DEL TÚNEL DE VENT

---

### 2.1 DEFINICIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS

Com a primer pas, definirem les característiques principals el túnel de vent, tenint en compte les limitacions que tenim, descrites en l'apartat 1.4 i segons les classificacions vistes al llarg de l'apartat 2.2. Tot el disseny del túnel de vent s'ha realitzat seguint les indicacions del llibre "Low-speed wind tunnel testing" [8].

#### 2.1.1 Alternatives de disseny

Les alternatives de disseny del túnel de vent radiquen en 3 característiques principals: les dimensions màximes i mínimes, el tipus de flux, determinant la velocitat del mateix i el tipus i distribució del túnel, i les condicions.

##### 2.1.1.1 Dimensions

La principal limitació que tenim és la grandària de l'aparell. Com s'ha mencionat en l'apartat 1.4, aquest túnel de vent ha de situar-se dins d'un laboratori, sense interferir amb els altres aparells i permetent als usuaris un correcte moviment i una correcta utilització del mateix túnel i els altres aparells del laboratori.

Per això, limitarem la **llargada** del túnel de vent a 3 metres i la seva **alçada** serà com a màxim 0,5 metres (contant el suport) i per situar-lo a sobre d'una taula de treball. En quan a l'**amplada** situarem el seu màxim als 0,8 metres. En resum: **màxim 3x0,5x0,8 m**.

A més, un altre factor rellevant en l'inici del disseny és la selecció de les dimensions de la cambra de proves. Aquesta no ha de ser massa gran per no sobrepassar les dimensions totals ja establertes i ha de ser suficientment gran per a poder ficar-hi la instrumentació i els models a estudiar.

Com que la idea principal és realitzar estudis amb models impresos en 3D, establirem les dimensions de la **cambra d'assaigs** en relació amb les dimensions de les peces que pot fabricar una impressora 3D. Generalment, les impressores 3D tenen un volum d'impressió de  $0,008 \text{ m}^3$  o  $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ , tot i que no se solen fabricar peces tan grans per que és un procés que podria trigar fins i tot dies.

Triarem una cambra de proves de secció quadrada (principalment per la seva facilitat de fabricació) de límit **màxim 160x160 mm<sup>2</sup> i longitud 360 mm**, d'aquesta forma evitem sobrepassar les dimensions totals màximes i és suficient per encabir-hi models fabricats en impressores 3D.

### 2.1.1.2 Tipus de flux

La velocitat del flux és un dels paràmetres principals a fixar, tot i així, hi ha un clar guanyador degut a la senzillesa de disseny, construcció i reduït cost: el túnel de vent **subsònic**. En velocitats superiors les proves es realitzen en un temps molt limitat, requerint aparells especials i complexos per poder analitzar el que succeeix dins del túnel al sotmetre objectes a velocitats tan altes de flux, incrementant el cost de fabricació notablement.

En un túnel de vent subsònic, la obtenció de dades es pot realitzar mitjançant sensors que depenen de la calibració per aconseguir bones lectures. Aquests sensors no són gaire complexos, per tant no tenen un elevat cost. D'altra banda, els marges d'error amb aquests sensors són més elevats, ja que, com hem dit, depenen de la calibració (i aquesta depèn també del factor humà) i a més exigeixen un nivell més elevat de coneixement per analitzar-los ja que no estan tant polits (comparat amb els resultats que podria donar un túnel de vent amb un sistema informàtic integrat). Dins d'aquests túnels hi ha dos variants: el de cicle obert i el de cicle tancat. Valorarem aquestes dues opcions amb algunes variables com la complexitat, els costos, el número de components, l'espai requerit, etc. Tot això, resumint el que s'ha vist en l'apartat 2.2.1.

Variables a valorar	Cicle obert					Cicle tancat				
	Valoració					Valoració				
Exigència de disseny				4						5
Complexitat de fabricació	2									5
Cost de construcció		3								5
Components del túnel		3								5
Espai requerit	2									5
Eliminació de pertorbacions		3								5
Variació de les condicions del flux			4			2				
Complexitat d'utilització	2								4	
Marge d'error dels resultats			4			2				
Soroll en ús				5		2				
Manteniment	2								4	
Limitació d'aplicacions		3					3			
Total de valoracions	0	8	12	12	5	0	6	3	8	30
<b>Nivell d'exigència de valoracions</b>	<b>37</b>					<b>47</b>				
1: Molt baix	2: Baix	3: Mig	4: Alt	5: Molt alt						

Taula 2. Matriu d'alternatives de túnel de vent. [Autor]

Tal com mostra la Taula 2, s'ha obtingut un nivell d'exigència d'implementació de 37 per al túnel de cicle obert i 47 per al túnel de cicle tancat. El túnel de **cicle obert** guanya clarament per 10

punts. Resulta evident que la dificultat d'implementació del túnel de cicle tancat radica en les seves dimensions i la seva complexitat.

Aquest túnel de vent de cicle obert encara es pot dividir entre bufat o aspirat. Tornant a citar la informació exposada dintre de l'apartat 2.2, el túnel de vent bufat porta el ventilador en la cambra d'estabilització, és a dir, abans de la cambra de proves, i s'han de col·locar estabilitzadors de flux i pantalles per evitar les turbulències. L'avantatge que té el túnel aspirat és que genera menys turbulència, degut a que el vent passa per les aspes a la sortida del túnel, després de la cambra de proves i l'acoblament al difusor (que sol ser circular) és més pràctic que en la cambra d'estabilització que sol ser quadrada o rectangular, ja que evidentment, la secció del ventilador és circular, aprofitant així la màxima quantitat d'aire generada pel mateix.

Les velocitats de flux entre les dos variants serien bastant semblants, una mica superior per al bufat, però en aquest no s'aprofitarà tota la secció d'entrada disponible en la contracció, per tant, els avantatges del bufat són mínims front els de l'**aspirat**.

Com a resultat d'aquestes valoracions, podem concloure que el tipus de túnel de vent més favorable per les condicions d'aquest projecte és el **subsònic de cicle obert aspirat**.

### 2.1.1.3 Condicions inicials

Hem de considerar les condicions inicials del flux a l'entrada del túnel, doncs el fluid a utilitzar és l'aire atmosfèric i atès que l'altitud sobre el nivell del mar del lloc d'instal·lació és relativament petita com per ser presa en compte, les propietats de l'aire atmosfèric seran preses a condicions estàndard a nivell del mar, tenint les següents dades d'entrada:

<b>Pressió atmosfèrica</b>	<b><math>p_0 = 101,325 \text{ kPa}</math></b>
<b>Temperatura atmosfèrica</b>	<b><math>T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}</math></b>
<b>Densitat</b>	<b><math>\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3</math></b>
<b>Viscositat cinemàtica</b>	<b><math>\nu = 1,516 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}</math></b>
<b>Viscositat dinàmica</b>	<b><math>\mu = 1,825 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2</math></b>

Taula 3. Condicions de l'aire a nivell del mar. [10]

## 2.2 CAMBRA DE PROVES

El primer a determinar-se és la càmera de proves ja que és el nucli i l'objectiu aerodinàmic del projecte. En aquest es busca que el flux d'aire sigui paral·lel i de velocitat constant. A més, la secció de proves ha de ser lo suficientment llarga per a que les pertorbacions de flux resultants a la contracció siguin suficientment reduïdes abans d'arribar al model i de suficient secció per a que els objectes avaluats tinguin suficient flux d'aire.

No obstant, no s'ha d'exagerar la longitud, ja que portaria a separar-se la capa límit quan entra al difusor i altres pèrdues que es tradueixen en pèrdues de potència.

En resum, es realitzaran les següents hipòtesis inicials:

- Es treballa en règim estacionari.
- Considerant condicions inicials (apartat 3.1.1.3).
- Se suposa flux incompressible ( $Ma < 0,3$  llavors  $U < 100$  m/s).
- Establir una velocitat mitjana a la cambra de proves de 20 m/s.
- Secció màxima de  $160 \times 160$  mm<sup>2</sup>.
- Longitud de 360 mm.

### 2.2.1 Determinació de les dimensions de la cambra de proves

#### 2.2.1.1 Àrea útil de la cambra de proves

Si lo que s'intenta és disposar d'una cambra d'assaigs on el model a experimentar estigui sotmès a una velocitat uniforme tot ell, a la realitat no tota la secció transversal de la cambra serà útil. La formació de la capa límit en contacte amb les parets de la cambra farà que l'àrea útil de la cambra de proves sigui inferior a la real.

Considerant que és la capa límit turbulenta la que genera un gruix més elevat de la capa límit per a una mateixa distància, es calcula el seu gruix mitjançant l'expressió:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,38}{Re_x^{\frac{1}{5}}}$$

Considerant que la intensitat de turbulència a l'entrada a la cambra sigui aproximadament nul·la i que la capa límit sobre les parets de la cambra s'iniciï a l'entrada de la mateixa, per a una velocitat  $U = 20$  m/s, per a la posició  $x = 180$  mm on es trobarà el model, s'obté un gruix:

$$\delta = \frac{0,38x}{Re_x^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,38 \cdot 0,180}{\left(\frac{20 \cdot 0,180}{1,516 \cdot 10^{-5}}\right)^{\frac{1}{5}}} = 5,71 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,66 \text{ mm}$$

Per tant, l'àrea útil seria:

$$A_u = (0,16 - 2 \cdot 5,66 \cdot 10^{-3})^2 = 0,0221 \text{ m}^2$$

És a dir:

$$\frac{0,0256 - 0,0221}{0,0256} \cdot 100 = 13,7 \%$$

**L'àrea que es pot utilitzar per mesures, considerant un flux uniforme, es reduiria un 13,7%** respecte a les dimensions físiques de la cambra.

### 2.2.1.2 Factor de bloqueig

Un altre factor a tenir en compte pel dimensionament de la cambra de proves i dels models és el **factor de bloqueig**. A causa de la grandària del model, la càmera de prova deu ser de tal grandària, que les parets no influeixin sobre el model durant els assajos i no introdueixin errors en els mesuraments. El bloqueig del flux ocorre durant les proves amb models relativament grans en la secció de túnels de grandària limitada. Aquest bloqueig es defineix com el radi de la secció frontal del model a l'àrea de la secció de prova.

Per a realitzar assajos correctament amb el túnel de vent, aquest factor hauria de situar-se per sota del 10 %, sent un 5 % el percentatge ideal per a perfils aerodinàmics. Per tant:

$$\frac{\text{Àrea frontal del model}}{\text{Àrea frontal de la cambra de proves}} \in [0,05 - 0,10]$$

Considerant el factor mínim de 5 %:

$$A_{model} = 0,05 \cdot 0,0221 = 1,105 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Suposant un model d'àrea frontal circular:

$$A_{model} = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow D_{model} = \sqrt{\frac{1,105 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{\pi}} = 0,0375 \approx 3,75 \text{ cm}$$

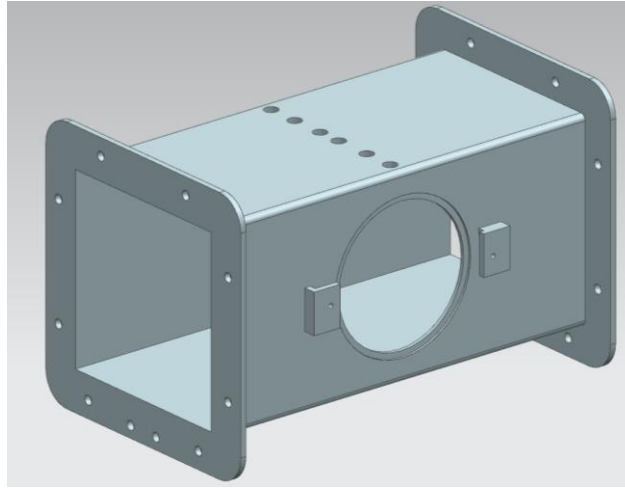
Si considerem el factor màxim de 10 % i realitzem els mateixos càlculs obtenim:

$$A_{model} = 0,1 \cdot 0,0221 = 2,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ i } D_{model} = \sqrt{\frac{2,21 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{\pi}} = 0,053 \approx 5,3 \text{ cm}$$

Els models que es podrien estudiar en el túnel de vent, haurien de tindre un diàmetre inferior a 5,3 cm, bones dimensions per objectes fabricats amb una impressora 3D.

A més a més, la longitud proposada de 360 mm és suficient per encabir-hi models d'aquestes dimensions i compleix la regla de disseny que diu que la relació diàmetre hidràulic-longitud ha de ser 2 o més. Per tant, podem donar per bones les dimensions proposades de la cambra

d'assajos de **secció 160x160 mm<sup>2</sup>** i **longitud de 360 mm**. Cambres més petites donarien models encara més petits i més dificultosos de crear per una impressora 3D.



**Figura 2.1** Model de la cambra de proves amb Siemens NK 10. [Autor]

El material escollit per la cambra de proves serà el **Metacrilat**, ja que es fàcil de fabricar i permetrà veure l'interior de la cambra, amb una baixa rugositat de 0,01 mm.

### 2.2.2 Determinació del tipus de flux

Mitjançant el número de Reynolds, es pot determinar quin tipus de flux s'obindrà al fer fluir l'aire a través de la secció de proves amb els paràmetres seleccionats anteriorment. Com que el disseny no és de secció circular, s'haurà de determinar un diàmetre hidràulic per poder aplicar-ho a la equació de Reynolds.

$$D_h = \frac{4A}{P_m}$$

On  $D_h$  és el diàmetre hidràulic [m],  $A$  és l'àrea de la secció de proves [m<sup>2</sup>] i  $P_m$  és el perímetre mullat [m]. Com que hem estimat les dimensions interiors de la cambra de proves, 160 mm x 160 mm i pel perímetre mullat només s'ha de multiplicar per 4 un dels costats, obtenint:

$$A = 0,0256 \text{ m}^2 \quad i \quad P_m = 0,64 \text{ m}$$

Substituint els màxims i mínims en l'equació del diàmetre hidràulic obtenim:

$$D_h = 0,16 \text{ m}$$

Aquests diàmetres els utilitzarem en la equació del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu}$$

Agafant el diàmetre hidràulic i les altres dades:  $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 1,825 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  i  $U = 20 \text{ m/s}$  i substituint a la equació anterior, obtenim:

$$Re = 211112,3$$

Tal com hem vist en els apartats 2.1.5 i 2.1.6, el flux laminar té un nombre de Reynolds inferior a 2300 i si el número de Reynolds supera 4000, llavors el flux serà turbulent. Tant el diàmetre suposat mínim com el màxim superen àmpliament el valor de 4000, llavors serà clarament **flux turbulent**.

### 2.2.3 Càlcul del cabal necessari

El cabal és el volum de fluid per unitat de temps que avança en el túnel de vent, aquest és el primer paràmetre necessari per triar el ventilador. A més, amb el cabal, es poden determinar les velocitats en cada secció i altres dades com pressions i pèrdues. Per calcular el cabal, només haurem de fer el producte de la velocitat i la secció:

$$Q = UA$$

Amb les dades que tenim de  $U = 20 \text{ m/s}$  i  $A = 0,0256 \text{ m}^2$ , obtenim:

$$Q_{max} = 0,512 \text{ m}^3/\text{s}$$

També, per facilitar els càlculs més endavant, haurem de calcular del cabal màssic, així podrem utilitzar la equació de la Continuitat entre les seccions, i juntament amb la de Bernoulli es calcularan les velocitats i pressions. Amb les dades utilitzades anteriorment, només haurem de multiplicar la densitat pels cabals ( $\dot{m} = \rho Q$ ):

$$\dot{m}_{max} = 0,616 \text{ kg/s}$$

### 2.2.4 Pèrdues a la secció de proves

Per al càlcul de les perdudes el model a seguir és el de Darcy-Weisbach, el qual es pot utilitzar per calcular la pèrdua d'energia en seccions llargues i rectes de conductes, tant per a flux laminar com turbulent.

$$h_{cp} = f \frac{L}{D_h} \frac{U^2}{2g}$$

On  $h_{cp}$  són les pèrdues expressades en forma d'alçada [m.c.aire] de la cambra de proves,  $f$  és el factor de fricció [adimensional],  $L$  és la longitud del tub [m],  $D_h$  és el diàmetre hidràulic [m],  $U$  és la velocitat del fluid [m/s] i  $g$  és l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].



Com el nostre flux és clarament turbulent ( $Re = 211112,3$ ), per determinar el factor de fricció s'ha utilitzat l'equació desenvolupada per Swamee-Jain:

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Valida dins dels intervals:  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$  i  $5000 \leq Re \leq 10^8$

On  $\varepsilon$  és la rugositat absoluta del tub [mm] i D el diàmetre del conducte [mm]. En el nostre cas, utilitzaríem la rugositat total del plàstic que és molt petita: 0,0015 mm (<http://www.ingenieriarural.com/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf>).

Amb això el coeficient de fricció és de  $f = 0,0154$ .

Ara, amb tots els valors, els substituïm a la equació de Darcy-Weisbach:

$$h_{cp} = 0,0154 \frac{L}{0,162} \frac{20^2}{2 \cdot 9,81} = 1,962 \cdot L$$

És a dir, obtenim que les pèrdues són 1,962 m.c.aire per cada metre de longitud de la cambra de proves. Per tant, amb una cambra de longitud 360 mm tenim una resistència de:

$$h_{cp} = 0,706 \text{ m}$$

## 2.3 CON DE CONTRACCIÓ

El con de contracció té bàsicament dues funcions: incrementar la velocitat de l'aire, la qual cosa permet que la instal·lació anterior al con, del condicionador de flux i malles sigui en una zona de baixa velocitat, reduint així les pèrdues en aquestes seccions, ja que aquestes depenen directament de la velocitat al quadrat. A més, el disseny de la contracció se centra en l'assoliment de la uniformitat i estabilitat del flux al moment de sortir, evitant la separació de flux (gruix de capa límit al mínim), també és desitjable una longitud de contracció no gaire llarga.

### 2.3.1 Dimensionament del con de contracció

El disseny de la contracció està limitat per dues restriccions oposades. La primera restricció estableix que la longitud de la contracció ha de ser suficient per no generar disturbis en la uniformitat del flux a mesura de la secció transversal canvia. En contraposició està el requeriment que estableix que la contracció ha de ser el més curta possible per minimitzar el creixement de la capa límit abans d'arribar a la càmera de proves. Per tal motiu, el disseny de la contracció requereix d'un balanç entre aquestes dues restriccions.

És recomanat que el rang de la longitud de contracció fluctuï entre 0.9 i 1.8 vegades el diàmetre d'entrada al col·lector [8], les longituds més curtes causarien irregularitats en el flux a la sortida.

$$L_{rc} = \frac{L_{cc}}{d_{h,ca}}$$

On  $L_{rc}$  és la relació de la longitud de contracció [adimensional],  $L_{cc}$  és la longitud del con de contracció [m] i  $d_{h,adm}$  és el diàmetre hidràulic de la secció de la cambra s'ajustos [m].

Un altre factor a tenir en compte és la relació de l'àrea d'entrada envers l'àrea de sortida (cambra de proves). Aquesta relació, o raó de contracció, es troba entre 6 a 9 per a túnels petits [8].

$$A_{rc} = \frac{A_{ca}}{A_{cp}} \in [6 - 10]$$

On  $A_{rc}$  és la relació de contracció [adimensional],  $A_{ca}$  és l'àrea d'admissió a la cambra d'ajustos [m<sup>2</sup>] i  $A_{cp}$  és l'àrea de la secció de proves [m<sup>2</sup>].

Com sempre, tendirem a buscar dimensions del túnel de vent el més reduïdes possibles, tenint en compte les limitacions d'espai que tenim. Dit això, triant una secció d'admissió quadrada per facilitat de fabricació i tenint una secció de sortida de 0,0256 m<sup>3</sup> (cambra de proves), suposaríem:

$$A_{ca} = 0,1936 \text{ m}^2$$

Obtenint:

$$A_{rc} = 7,56 \in [6 - 10]$$

$$d_{h,ca} = 440 \text{ mm}$$

Per a obtenir la velocitat d'entrada del flux, haurem de recaure en la Teoria de la Continuitat:

$$\dot{m}_{ca} = \dot{m}_{cp} \rightarrow U_{ca}A_{ca} = U_{cp}A_{cp} \rightarrow U_{ca} = 20 \cdot \frac{0,0256}{0,1936} = 2,645 \text{ m/s}$$

On  $\dot{m}_{ca}$  és el cabal màssic a l'admissió (cambra ajustos) [kg/s],  $\dot{m}_{cp}$  és el cabal màssic a la cambra de proves [kg/s],  $U_{ca}$  és la velocitat d'admissió [m/s],  $U_{cp}$  és la velocitat a la cambra de proves [m/s],  $A_{ca}$  és l'àrea de la cambra d'ajustos [m<sup>2</sup>] i  $A_{cp}$  és l'àrea de la secció de proves [m<sup>2</sup>].

Per trobar la longitud, intentarem buscar un valor dins dels marges establerts proper al mínim per tal d'afectar el menys possible a la limitació més significativa que és la llargària del túnel:

$$L_{cc} = 450 \text{ mm} \rightarrow L_{rc} = \frac{450}{440} = 1,11 \in [0,9 - 1,8]$$

Ara que tenim les dimensions principals, toca dissenyar el perfil del con de contracció. Per definir la geometria de la contracció s'empra una equació de cinquè ordre, assegurant la condició que la primera i segona derivada són zero a l'entrada i sortida de la secció [8].

$$h = [-10(\epsilon)^3 + 15(\epsilon)^4 - 6(\epsilon)^5](H_i - H_0) + H_i$$

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

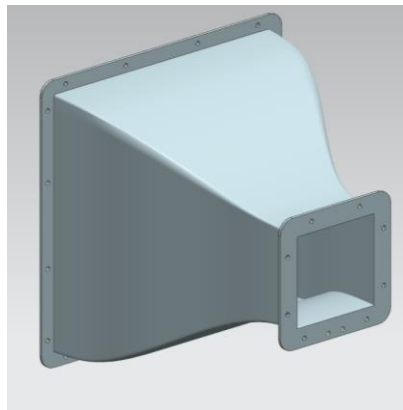
Raúl Inglés Molina

On  $h$  és l'alçada del con de contracció des de l'eix de simetria [m],  $H_i$  és l'alçada de l'admissió des de l'eix de simetria [m],  $H_0$  és l'alçada des de l'eix de simetria de la secció sortida a la cambra de proves [m] i  $\epsilon = \frac{x}{L_{cc}}$ ,  $x$  és la variable de posició en l'eix  $x$  que recorre la llargària del con de contracció [m] i  $L_{cc}$  és la longitud total del con de contracció [m].

Per poder realitzar el model amb el programa Siemens NX 10, hem agafat 10 valors de  $x$ :

$x$ (mm)	$h$ (mm)
0	220
45	218,80
80	211,89
135	197,17
180	175,56
225	150
270	124,44
315	102,83
360	88,11
405	81,20
450	80

**Taula 4.** Valors de les alçades del perfil del con de contracció. [Autor]



**Figura 2.2** Con de contracció modelat amb Siemens NX 10. [Autor]

Per aquest tipus de peça amb una forma "complicada", un bon material seria la **Fibra de vidre**, amb una rugositat semblant a la del Metacrilat.

### 2.3.2 Pèrdues al con de contracció

En aquest cas, també utilitzarem la equació de Darcy-Weisbach per trobar les pèrdues de càrrega al con de contracció. En un principi, buscarem el coeficient de pèrdues amb la següent equació:

$$K_{cc} = 0,32 f_{av} \frac{L_{cc}}{D_{ca}}$$

On  $K_{cc}$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $f_{av}$  és el factor de fricció mitjà al llarg del con de contracció [adimensional],  $L_{cc}$  és la longitud del con de contracció [m] i  $D_{ca}$  és el diàmetre hidràulic de la cambra d'ajustos [m], que al ser quadrada és el mateix que el seu costat. El 0,32 és aproximat, però degut a que les pèrdues en aquesta part solen ser molt baixes, l'error per aproximar és mínim [8].

Per trobar el factor de fricció mitjà, haurem de fer la mitjana entre el factor d'entrada i el de sortida. Com que ja hem calculat les pèrdues de la cambra d'assajos, ja tenim el factor de fricció de sortida del con de contracció ( $f = 0,0154$  per ser precís).

Per trobar el de l'entrada, haurem de seguir el mateix procés que s'ha realitzat a la cambra de proves, mitjançant l'equació desenvolupada per Swamee-Jain utilitzada anteriorment, obtenint un valor de factor de fricció d'entrada de  $f = 0,019$ . Si realitzem la mitjana dels valors obtinguts, és a dir, sumant-los i dividint-los per dos, obtenim un valor de factor de fricció mitjà de  $f_{av} = 0,01675$ .

Amb això ja tenim tots els valors per trobar el coeficient de pèrdues del con de contracció, substituint els valors obtenim:

$$K_{cc} = 0,32 \cdot 0,01675 \frac{450}{440} = 0,0055$$

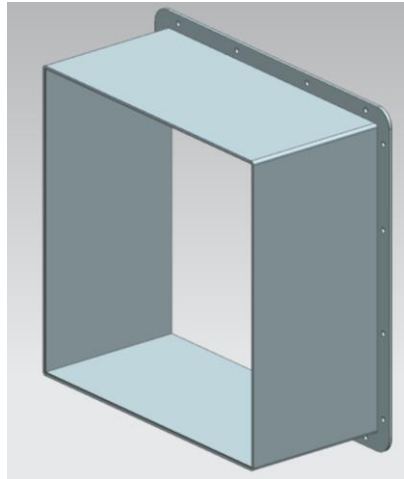
Finalment, per trobar les pèrdues en el con de contracció, haurem de substituir els valors corresponents a la següent equació:

$$h_{cc} = K_{cc} \frac{U_{ca}^2}{2 \cdot g} = 0,0055 \frac{2,645^2}{2 \cdot 9,81} = 0,002 \text{ m}$$

On  $h_{cc}$  són les pèrdues al con de contracció [m.c.aire],  $K_{cc}$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_{ca}$  és la velocitat del flux a la cambra d'ajustos [m/s] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].

## 2.4 CAMBRA D'AJUSTOS

Aquesta cambra, és un espai requerit per estabilitzar el flux, i és on s'alberguen les malles estabilitzadores i el direccionador de flux. La seva longitud recomanada és de 0.5 vegades el seu diàmetre hidràulic [8], per tant, tindrà una **longitud de 220 mm**.



**Figura 2.3** Cambra d'ajustos modelada amb Siemens NX 10. [Autor]

La cambra d'ajustos redueix principalment les variacions de velocitat en la direcció del flux, i presenta molt baixa influència en la variació de la velocitat de les línies aerodinàmiques a causa de que la caiguda de pressió a través d'aquesta càmera és baixa.

Per a trobar les pèrdues, haurem d'utilitzar el factor de fricció d'entrada al con de contracció que hem calculat anteriorment ( $f = 0,019$ ).

$$K_{ca} = 0,019 \frac{220}{440} = 0,0095$$

Les pèrdues en la cambra d'ajustos són molt semblants a les del con de contracció:

$$h_{ca} = K_{ca} \frac{U_{ca}^2}{2 \cdot g} = 0,0095 \frac{2,645^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0034 \text{ m}$$

On  $h_{cc}$  són les pèrdues al con de contracció [m],  $K_{cc}$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_{ca}$  és la velocitat del flux a la cambra d'ajustos [m] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [ $\text{m/s}^2$ ].

El material utilitzat serà **Fibra de vidre**.

### 2.4.1 Malla estabilitzadora

Una malla en principi redueix la velocitat del flux. Les malles fan els perfils de velocitat més uniformes mitjançant la caiguda de pressió estàtica, la qual és proporcional a la velocitat al quadrat, i per tant redueix el gruix de la capa límit. Una malla també refracta el flux incident cap a la direcció normal local i redueix la intensitat de turbulència en tot el camp de flux. Les malles s'han de muntar fermament, ja que si no es fa, poden doblegar-se notablement, perturbant la capa límit.

#### 2.4.1.1 Dimensionament de la malla estabilitzadora

El factor clau, per començar a dissenyar el mallat és la porositat, la qual és quasi 0 quan la malla és pràcticament sòlida i s'acosta a 1 quan la malla és molt fina, aquesta està en funció del diàmetre o calibre del filferro i de la densitat de la malla. En túnels de vent, la porositat ha de situar-se entre 0,5 i 0,8 [8].

$$\beta_m = (1 - d_w \rho_m)^2 \quad \rho_m = \frac{1}{w_m}$$

On  $\beta_{malla}$  és la porositat de la malla [adimensional],  $d_w$  és el diàmetre del filferro [m],  $\rho_m$  és la densitat del mallat [ $m^{-1}$ ] i  $w_m$  és el costat d'una cel·la de la malla [m].

D'altra banda, existeix un altre paràmetre contrari a la porositat: la solidesa ( $\sigma_m$ ).

$$\sigma_m = 1 - \beta_m$$

Triant uns valors de **diàmetre del filferro d'Acer de 0,6 mm** i **ample de cel·la de 3 mm** obtenim una porositat i solidesa de:

$$\beta_m = 0,64 \quad \sigma_m = 0,36$$

#### 2.4.1.2 Pèrdues a la malla estabilitzadora

Com en els casos anteriors, per trobar les pèrdues en el mallat, haurem d'utilitzar la equació de Darcy-Weisbach. I com a primer pas, haurem de trobar el coeficient de pèrdues amb la següent fórmula:

$$K_m = K_{malla} K_{Re} \sigma_m + \frac{\sigma_m}{\beta_m^2}$$

On  $K_m$  és el coeficient de pèrdues a la malla,  $K_{malla}$  és el factor de mallat,  $K_{Re}$  és el factor de Reynolds,  $\sigma_m$  és la solidesa i  $\beta_m$  és la porositat [8].

En primer lloc, el factor de malla seria 1, tenint en compte que s'utilitzaria filferro metàl·lic nou. Tot seguit, per trobar el factor de Reynolds, haurem de trobar el nombre de Reynolds en una cel·la ( $Re_w$ ):

$$Re_w = \frac{U_{ca} d_w}{\nu} = \frac{2,645 \cdot 0,0006}{1,516 \cdot 10^{-5}} = 104,7$$

En el cas de tindre Reynolds superior a 400, el factor de Reynolds seria 1, però en el nostre cas és inferior, per tant, l'haurem de trobar amb la següent equació [8]:

$$K_{Re} = 0,785 \left( \frac{Re_w}{241} + 1 \right)^{-4} + 1,01$$

Substituint el Reynolds trobat anteriorment, obtenim un factor de Reynolds de 1,187. Amb això tenim totes les dades que necessitem per trobar el coeficient de pèrdues [8]:

$$K_m = 1 \cdot 1,187 \cdot 0,36 + \frac{0,36}{0,64^2} = 1,306$$

Substituint a la equació de Darcy-Weisbach trobem les pèrdues a la malla estabilitzadora [8]:

$$h_m = K_m \frac{U_{ca}^2}{2 \cdot g} = 1,306 \frac{2,645^2}{2 \cdot 9,81} = 0,466 \text{ m}$$

On  $h_m$  són les pèrdues al con de contracció [m.c.aire],  $K_m$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_{ca}$  és la velocitat del flux a la cambra d'ajustos [m/s] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].

## 2.4.2 Direccionador de flux

El direccionador o acondicionador de flux, molt conegut com "Honeycomb" degut a un tipus de disseny, és un panell que té com a objectiu proporcionar un flux espaiat, relativament uniforme i estable d'aire en la càmera de proves del túnel de vent, com ja s'havia esmentat anteriorment.

### 2.4.2.1 Dimensionament del direccionador de flux

No existeix un mètode de disseny exacte, no obstant això, existeixen algunes limitacions de disseny que poden emprar-se. Com utilitzar cel·les amb una relació llarg-diàmetre de 6 a 8 i una porositat rondant el 0.8. A més, les cel·les haurien de ser entre 5 i 15 vegades més grans que les de la malla anteriorment col·locada [8].

Tenint en compte aquestes regles de disseny, es tria un direccionador de flux de **cel·les quadrades** amb una **amplada de cel·la** de **15 mm**, un **gruix de paret d'1 mm** i una **profunditat de 90 mm**. Obtenint una relació llarg-diàmetre de 6, una porositat de 0,87 i sent les cel·les 15 vegades més grans que les de la malla.

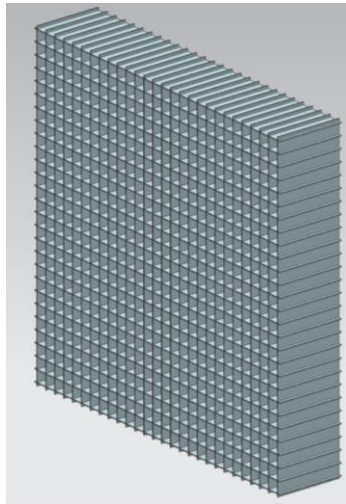


Figura 2.4 Direccionador de flux modelat amb Siemens NX 10. [Autor]

El material utilitzat serà **Fibra de vidre**.

#### 2.4.2.2 Pèrdues al direccionador de flux

Existeixen valors aproximats per calcular la constant de pèrdues del direccionador de flux que necessitem per poder trobar les pèrdues. Aquests valors varien segons la geometria del direccionador, sempre i quan la relació llarg-diàmetre sigui 6 [8]:

- Per a geometria hexagonal (Honeycomb),  $K_{df} = 0,2$ .
- Per a geometria quadrada,  $K_{df} = 0,22$ .
- Per a geometria circular,  $K_{df} = 0,3$ .

En el nostre cas, al triar un direccionador de flux de seccions quadrades, tenim una constant de pèrdues de 0,22. Per trobar les pèrdues, només haurem de substituir els valors que tenim a la equació de Darcy-Weisbach:

$$h_{df} = K_{df} \frac{U_{ca}^2}{2 \cdot g} = 0,22 \frac{2,645^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0784 \text{ m}$$

On  $h_{df}$  són les pèrdues al con de contracció [m.c.aire],  $K_{df}$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_{ca}$  és la velocitat del flux a la cambra d'ajustos [m/s] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].



## 2.5 ANELL D'ENTRADA

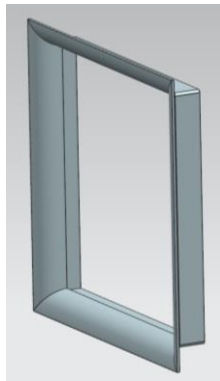
La recomanació per al gruix de l'anell d'entrada, la curvatura que ha de tenir l'admissió, indica que ha de tenir entre 0,2 i 0,375 del diàmetre de la càmera d'estabilització [8]:

$$\frac{b}{d_{h,adm}} \in [0,2 - 0,375]$$

On  $b$  és el gruix de l'anell d'entrada i  $d_{h,adm}$  és el diàmetre hidràulic de la secció d'admissió o estabilització.

Si agafem el límit inferior per tal de fer les dimensions del túnel el més reduïdes possible obtenim un gruix de:

$$b = 0,2 \cdot 440 = 88 \text{ mm}$$

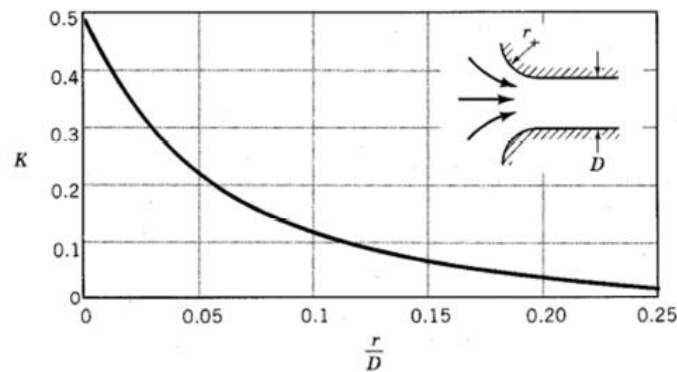


**Figura 2.5** Anell d'entrada modelat amb Siemens NX 10. [Autor]

El material utilitzat serà **Fibra de vidre**.

### 2.5.1 Pèrdues a l'anell d'entrada

Les pèrdues a l'entrada del túnel de vent també és un factor a tenir en compte. L'anell que s'ha col·locat a l'entrada és similar a una tovera amb radis, per tant, per trobar el coeficient de pèrdues, farem servir el següent gràfic:



**Figura 2.6** Gràfic per al càlcul del coeficient d'una entrada de flux amb radi. [11]

Tenint un radi de 44 mm i un diàmetre hidràulic de 440 mm, obtenim una relació radi-diàmetre de 0,1. Agafant aquest valor en el gràfic, trobem una K de 0,12 aproximadament.

També haurem de trobar la velocitat a l'entrada de l'anell:

$$U_{anell} = \frac{Q}{A_{anell}} = \frac{0,512}{(0,44 + 0,088)^2} = 1,837 \text{ m/s}$$

On  $U_{anell}$  és la velocitat del flux a l'entrada del túnel i  $A_{anell}$  és la secció d'entrada del túnel.

Amb aquestes dades ja podem utilitzar la mateixa equació per trobar les pèrdues de càrrega que al subapartat anterior:

$$h_{anell} = K_{anell} \frac{U_{anell}^2}{2 \cdot g} = 0,12 \frac{1,837^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0206 \text{ m}$$

On  $h_{anell}$  són les pèrdues al con de contracció [m.c.aire],  $K_{anell}$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_{anell}$  és la velocitat del flux a l'entrada del túnel [m/s] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].

## 2.6 DIFUSOR

El difusor és una part important del túnel de vent, doncs aquí el flux comença a perdre velocitat reposant la pressió. La reducció de la velocitat és necessària ja que el flux és expulsat al medi ambient, grans velocitats poden provocar càrregues considerables en els suports del túnel, a causa de l'efecte d'acció i reacció, i provocar alts nivells de soroll i vibració. Generalment és desitjable reduir la velocitat en la menor distància possible, sense caure en la separació del flux.

Els difusors són molt sensibles als errors de disseny, pot causar vibració al túnel, oscil·lació del ventilador i variació a la velocitat de la secció de proves. La seva geometria en túnels de vent és de forma de con tallat per la punta, on l'àrea de cada secció següent és més gran que l'anterior.

### 2.6.1 Dimensionament del difusor

Generalment, per al disseny dels difusors, s'utilitza el concepte d'angle d'obertura del difusor ( $2\theta_d$ ). Que és l'angle que fa un costat del perfil del difusor en relació amb l'altre costat del perfil. Aquest angle ha de situar-se entre  $4^\circ$  i  $7^\circ$ , però seria més convenient no superar els  $5^\circ$  [8]. Es calcula amb la següent equació:

$$\theta_d = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{L_d/D_{cp}}\right)$$

On  $\theta_d$  és l'angle que fa un costat del perfil del difusor en relació amb l'eix horitzontal [°],  $L_d$  és la longitud del difusor [mm],  $A_R$  és la relació d'àrees entre la entrada i la sortida [adimensional] i  $D_{cp}$  és el diàmetre hidràulic de la cambra de proves [mm].

$$A_R = \frac{A_{cp}}{A_v}$$

On  $A_{cp}$  és l'àrea de la cambra de proves [m<sup>2</sup>] i  $A_v$  és l'àrea del ventilador [m<sup>2</sup>].

A més, el difusor ha de tenir una longitud, com a mínim, de 3 vegades la longitud de la cambra de proves. I la relació d'àrees entre la entrada i la sortida normalment està situada aproximadament entre 2 i 3, sent els valors més petits els més desitjables.

Si tenim en compte que les dimensions de la cambra de proves són 160 x 160 x 360 mm<sup>3</sup>, si triéssim una **secció de sortida del difusor** de **257 mm de diàmetre** (un valor estàndard de diàmetre de ventiladors), obtindríem una relació d'àrees entre la entrada i la sortida del difusor de 2,02, un valor baix i proper a 2. Una **longitud** de **1,5 m** és més que suficient per complir el requisit de ser 3 vegades més llarg que la cambra de proves i situar al túnel de vent dintre de les limitacions de longitud [8].

Amb aquestes dades, podem trobar l'angle d'obertura del difusor:

$$\theta_d = \arctan\left(\frac{1 \sqrt{1,92 - 1}}{2 \cdot 1500/160}\right) = 3,09^\circ$$

És a dir, que  $2\theta_d$  seria **6,18°**, un valor dintre del rang de 4-7°.

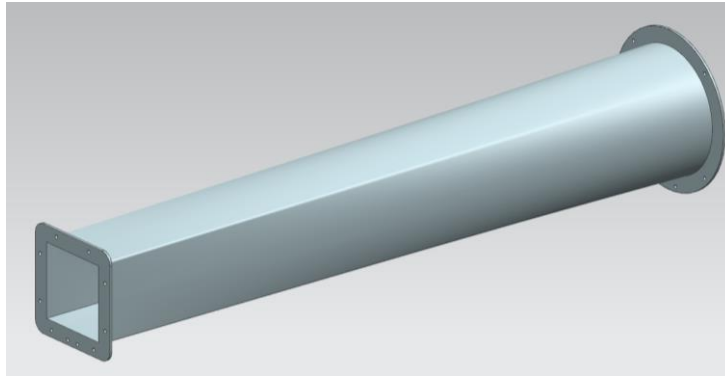


Figura 2.7 Difusor modelat amb Siemens NX 10. [Autor]

El material utilitzat serà **Fibra de vidre**.

### 2.6.2 Pèrdues al difusor

Per determinar el coeficient de pèrdues del difusor, cal fer certes suposicions, i una d'elles és que el coeficient de pèrdues ( $K_d$ ) pot ser descompost per la suma del coeficient de pèrdues del factor de fricció ( $K_f$ ), i el coeficient de pèrdues d'expansió ( $K_{ex}$ ) [8].

$$K_d = K_f + K_{ex}$$

El coeficient de pèrdues del factor de fricció es pot calcular amb la següent fórmula [8]:

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \frac{f_{av}}{8 \cdot \sin \theta_d}$$

On  $A_R$  és la relació d'àrees entre la entrada i la sortida del difusor [adimensional],  $f_{av}$  és el factor de fricció mitjà entre la entrada i la sortida [adimensional] i  $\theta_d$  és l'angle d'obertura del difusor [°].

Per trobar el  $f_{av}$  haurem de fer la mitja entre el factor de fricció de la cambra de proves i el de la secció del ventilador, el primer ja el tenim: 0,0154. Per trobar el de la sortida, haurem de seguir el mateix procés que s'ha realitzat a la cambra de proves i al con de contracció, mitjançant l'equació de Swamee-Jain.

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Per tant, obtenim un valor de factor de fricció de sortida de  $f = 0,016$ . Si realitzem la mitja dels valors obtinguts, és a dir, sumant-los i dividint-los per dos, obtenim un valor de factor de fricció mitjà de  $f_{av} = 0,0157$ . Amb aquest valor obtindríem un coeficient de pèrdues de factor de fricció  $K_f$  de 0,027.

D'altra banda, el coeficient de pèrdues d'expansió depèn de la geometria del difusor, el resultat canvia si la secció d'entrada és rectangular o circular. Per a calcular-lo, s'utilitza la següent fórmula [8]:

$$K_{ex} = K_e(\theta_d) \left( \frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2$$

Com es va optar per una secció rectangular, el coeficient de pèrdues a causa de la geometria està donat per l'equació següent [8]:

$$K_e = \begin{cases} 0,09623 - 0,004152 \cdot \theta_d & \text{si } 0 < \theta_d < 1,5^\circ \\ 0,1222 - 0,0459 \cdot \theta_d + 0,02203 \cdot \theta_d^2 + 0,03269 \cdot \theta_d^3 \\ - 0,0006145 \cdot \theta_d^4 - 0,000028 \cdot \theta_d^5 + 0,00002337 \cdot \theta_d^6 & \text{si } 1,5 \leq \theta_d \leq 5^\circ \\ - 0,01322 + 0,05866 \cdot \theta_d & \text{si } \theta_d > 5^\circ \end{cases}$$

Com que l'angle és de  $3,09^\circ$ , utilitzarem la equació del mig i obtindrem un  $K_e$  de 0,046. I amb això obtindrem un coeficient de pèrdues d'expansió  $K_{ex}$  de 0,0119. Si sumem els dos coeficients, de fricció i d'expansió, tindrem un coeficient de pèrdues de difusor  $K_d$  de 0,07.

També necessitarem calcular la velocitat mitjana del fluid dintre del difusor. Per això, farem la mitja entre la velocitat d'entrada i la de sortida. La d'entrada ja la tenim, és la de la cambra de proves (20 m/s) i la de sortida:

$$U_v = \frac{Q}{A_v} = \frac{0,512}{\pi \left( \frac{0,250}{2} \right)^2} = 10,43 \text{ m/s}$$

On  $U_v$  és la velocitat al ventilador [m/s],  $A_v$  és la secció del ventilador [m<sup>2</sup>] i  $Q$  és el cabal volumètric que circula a través del túnel [m<sup>3</sup>/s].

Per tant, la velocitat mitjana al difusor  $U_d$  serà de 15,2 m/s.

Finalment, per trobar les pèrdues en el difusor, haurem de substituir els valors corresponents a la següent equació:

$$h_d = K_d \frac{U_d^2}{2 \cdot g} = 0,07 \frac{15,2^2}{2 \cdot 9,81} = 0,824 \text{ m}$$

On  $h_d$  són les pèrdues al difusor [m.c.aire],  $K_d$  és el coeficient de pèrdues [adimensional],  $U_d$  és la velocitat mitjana del flux al difusor [m/s] i  $g$  l'acceleració de la gravetat [m/s<sup>2</sup>].

## 2.7 CÀLCUL DE PÈRDUES TOTALS

Per tal de poder trobar un sistema de propulsió adient per al fluid que volem que circuli per l'interior del túnel de vent, haurem de calcular les pèrdues de càrrega que generen els diversos elements del túnel que afecten al flux.

A la taula següent es resumeixen aquestes pèrdues de càrrega i es mostra la seva afectació al global de pèrdues en forma de percentatge:

Element del túnel	Pèrdua de càrrega		Percentatge
	[1 unitat]	[Pa]	
<i>Cambra de proves</i>	0,71	8,38	33,73
<i>Con de contracció</i>	0,002	0,02	0,10
<i>Cambra d'ajustos</i>	0,003	0,04	0,14
<i>Malla estabilitzadora</i>	0,47	5,55	22,33
<i>Direccionador de flux</i>	0,08	0,92	3,8
<i>Anell d'entrada</i>	0,02	0,24	0,95
<i>Difusor</i>	0,82	9,7	38,96
<b>Túnel de vent</b>	<b>2,1</b>	<b>24,9</b>	<b>100</b>

**Taula 5.** Pèrdues de càrrega al túnel de vent sense model. [Autor]

Es pot veure clarament que la cambra de proves, la malla estabilitzadora i el difusor són els elements més crítics a l'hora de calcular les pèrdues del sistema.

Tant a la cambra de proves com al difusor, aquestes pèrdues poden ser degudes a que són les zones per on el fluid circula més ràpid, sobretot a la cambra d'assaig que és on el fluid aconsegueix la màxima energia cinètica dintre del túnel, i a més és la de menor diàmetre hidràulic.

En el cas de la malla estabilitzadora pot ser degut a la porositat de 0,64 que és relativament baixa. Tot i això, el resultat de pèrdues és suficientment baix per trobar un ventilador adient.

### 2.7.1 Corba característica de la instal·lació

Per calcular la corba característica de la instal·lació en funció del cabal, haurem de fer servir el teorema de Bernoulli descrit en l'apartat 2.8.1.3. A més, tenint en compte que no hi ha diferència d'alçada entre la entrada i la sortida del túnel i que les obertures són a pressió atmosfèrica, podem eliminar algunes variables:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 + H_v = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + \sum h_f$$

On  $p$  és la pressió del fluid en un punt,  $\gamma$  és el pes específic del fluid (massa del fluid multiplicada per gravetat),  $U$  és la velocitat del fluid,  $\alpha$  factor corrector de l'energia cinètica (1 per turbulent),  $g$  és l'acceleració de la gravetat i  $z$  és l'alçada d'un punt mesurada des d'un nivell de referència,  $h_f$  són les pèrdues per fricció i  $H_v$  és l'alçada manomètrica del ventilador.

Ordenant la equació, separant les pèrdues per elements del túnel i dividint les velocitats en cada element per la seva àrea:

$$h_v = \frac{Q^2}{2g(A_2^2 - A_1^2)} + \frac{K_{cp}Q^2}{2gA_{cp}^2} + \frac{K_{cc}Q^2}{2gA_{ca}^2} + \frac{K_mQ^2}{2gA_{ca}^2} + \frac{K_{df}Q^2}{2gA_{ca}^2} + \frac{K_{ca}Q^2}{2gA_{ca}^2} + \frac{K_aQ^2}{2gA_a^2} + \frac{K_dQ^2}{2gA_d^2}$$

Tenint els coeficients i les àrees:

$$K_{cp} = 0,034 \qquad A_{cp} = 0,0256 \text{ m}^2$$

$$K_{ca} = 0,0095 \qquad A_{ca} = 0,1936 \text{ m}^2$$

$$K_a = 0,12 \qquad A_a = 0,2788 \text{ m}^2 = A_1$$

$$K_d = 0,041 \qquad A_d = 0,0519 \text{ m}^2 = A_2$$

$$K_{cc} = 0,0055$$

$$K_m = 1,306$$

$$K_{df} = 0,07$$

Substituint:

$$h_v = \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81} \left\{ \frac{1}{(0,0519^2 - 0,2788^2)} + \frac{0,034}{0,0256^2} + \frac{0,0055}{0,1936^2} + \frac{1,306}{0,1936^2} + \frac{0,07}{0,1936^2} + \frac{0,0095}{0,1936^2} + \frac{0,12}{0,2788^2} + \frac{0,041}{0,0519^2} \right\}$$

Amb aquests valors obtenim la corba característica del túnel de vent:

$$h_v = 4,71 \cdot Q^2$$

## 2.8 SISTEMA DE PROPULSIÓ

El sistema de propulsió és simplement un ventilador mogut per un motor elèctric. Un ventilador és una bomba que genera diferències de pressió i causa un flux d'aire. Els àleps treballen sobre l'aire, impartint energia estàtica i cinètica, depenent del tipus de ventilador. Per a determinar les capacitats del ventilador, existeix un gràfic característic de cada aparell: la corba característica.

La corba característica d'un ventilador s'obté dibuixant en uns eixos de coordenades els diferents valors de cabal-pressió, obtinguts mitjançant assaig en un laboratori. Aquesta corba juntament amb la desenvolupada d'acord a la potència absorbida, i al rendiment del ventilador, componen les característiques d'un ventilador. Aquestes sempre estan relacionades al cabal desenvolupat.

El punt ideal de funcionament del ventilador, és corresponent al màxim rendiment (com més prop d'aquest punt es treballi, més econòmic serà el seu funcionament). A l'esquerra d'aquest punt el funcionament és inestable, sent recomanable treballar a la dreta del punt màxim de funcionament.

La corba característica del ventilador depèn únicament del ventilador, i solament pot variar si el ventilador funciona a una velocitat de rotació diferent. Per saber exactament en què condicions funciona el ventilador, s'ha de conèixer la corba resistent del sistema en el qual s'instal·la, és a dir, la corba que relaciona la pèrdua de càrrega de la instal·lació amb el cabal que passa per ella.

La intersecció entre la corba del ventilador i la característica resistent de la instal·lació, es diu punt de treball.

### 2.8.1 Ventilador

El ventilador triat per aquest túnel de vent és el **HEPT/EW 25-2/H** del fabricant Sodeca. És un ventilador industrial axial helicoidal d'alta eficiència. S'ha escollit un ventilador axial per què tot i que no és el tipus de ventilador que dona més pressió, dona el cabal suficient per arribar a les velocitats de fluid objectiu a la cambra de proves. A més és fàcil d'instal·lar i de mantenir, de fet, és bastant utilitzat en aquests tipus de túnels de vent.



ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

La seva corba característica de funcionament a les màximes revolucions (2850 rpm) ens la proporciona el fabricant:

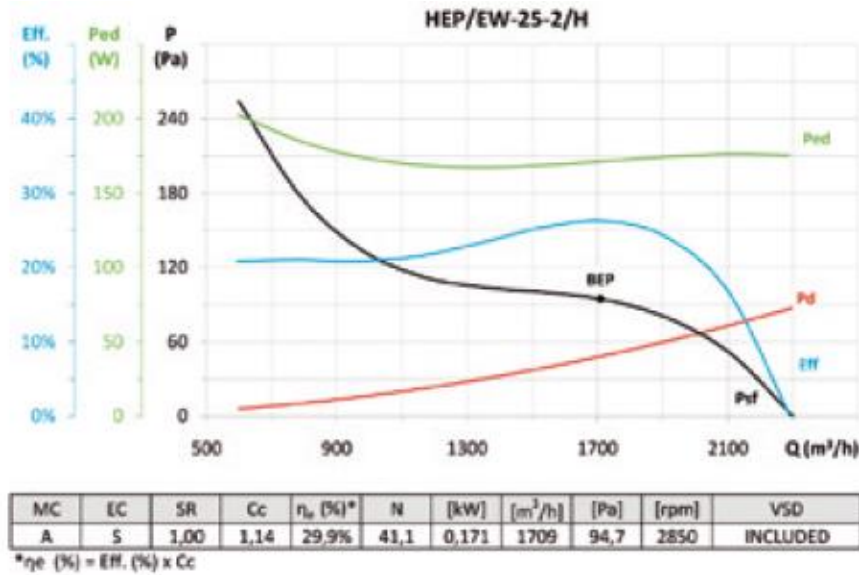


Figura 2.8 Corba característica del ventilador HEP/EW 25-2/H de Sodeca. [Sodeca, Annex C]

D'aquesta gràfica, podem treure una taula de valors aproximada:

Pèrdua de càrrega		Cabal
[mca]	[Pa]	[m³/h]
21,22	255	600
17,47	210	700
14,56	175	780
12,07	145	900
9,98	120	1100
8,74	105	1300
8,32	100	1500
7,88	94,7	1709
6,66	80	1900
4,58	55	2100
2,5	30	2180
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2300</b>

Taula 6. Valors aproximats de la corba característica del ventilador. [Autor]

Si construïm un gràfic a partir d'aquesta taula (6), podem observar que s'assembla bastant a la que ens dona el fabricant:

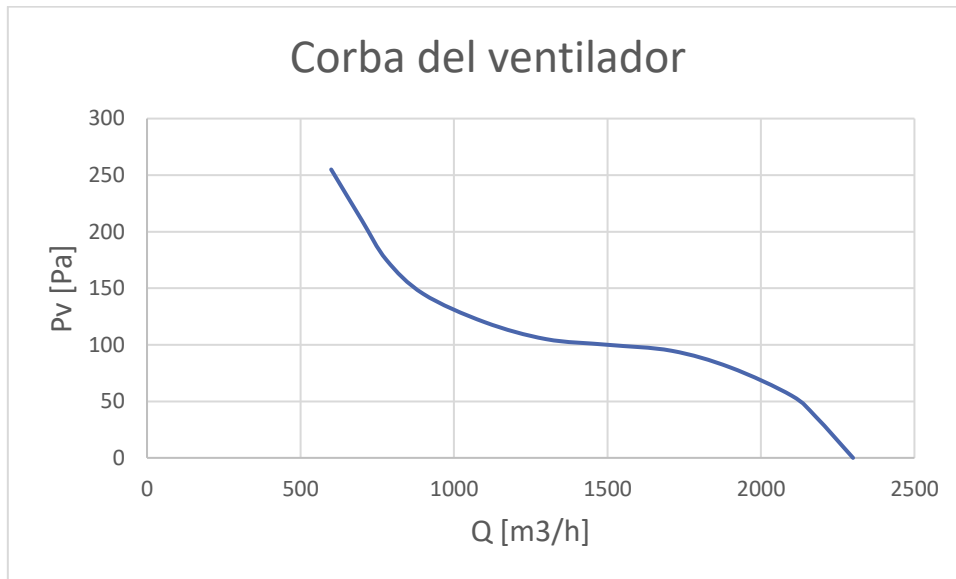


Figura 2.9 Corba aproximada del ventilador HEP/EW 25-2/H de Sodeca. [Autor]

Aquestes dades es faran servir més endavant, a la simulació, per definir el ventilador dintre del software de simulació.

Aquest ventilador en concret és de tipus mural, és a dir per col·locar-lo en un mur, també existeix la versió tubular que en principi seria la més adient per al túnel de vent, però els tubulars són massa grans. Llavors, es traurà la carcassa que aniria subjectada al mur i se'n faria una altra específica per al túnel.



Figura 2.10 Suport pel ventilador modelat amb Siemens NX 10. [Autor]

La **Fibra de vidre** és un bon material per aquest element, ja que tampoc necessita suportar massa càrrega.

## 2.8.2 Motor

El ventilador descrit anteriorment, disposa d'un **motor trifàsic** de 2 pols de 255 W, capaç d'arribar a les 2850 rpm, amb una voltatge d'entrada de 400 V tant a 50 com a 60 Hz i una intensitat de 0,61 A. O bé, un **motor monofàsic** de la mateixa potència de 230 V a 50 o 60 Hz i 2,09 A d'entrada.

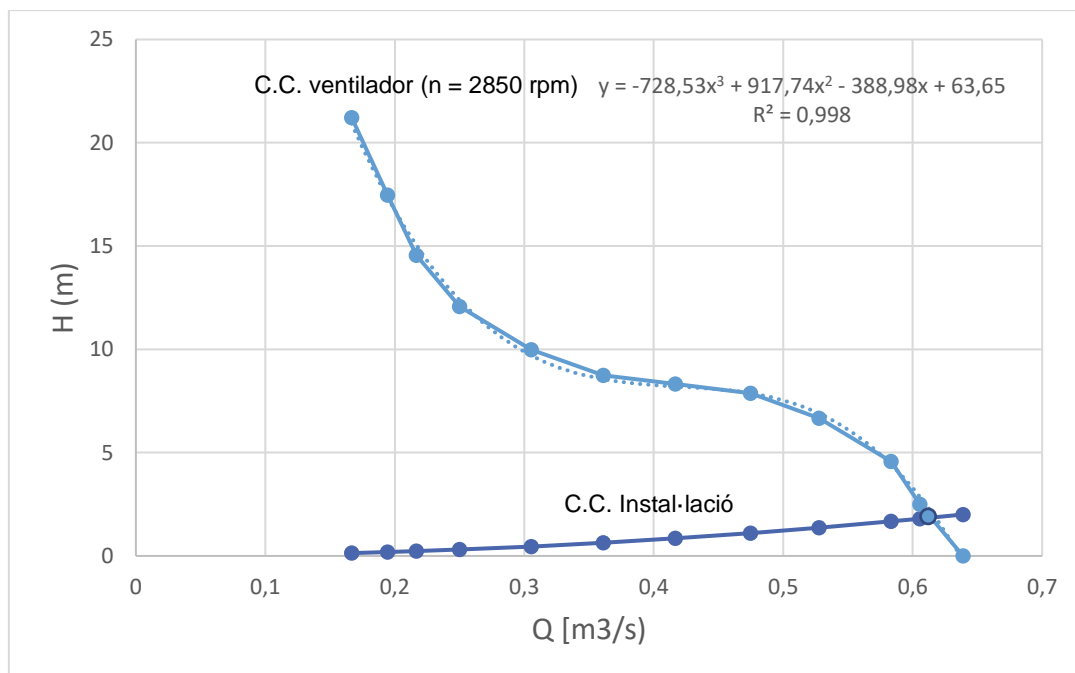
En totes dues especificacions, s'inclou un variador de velocitat que permetrà regular les revolucions al nostre gust. Això aportarà senzillesa de disseny, de fabricació, d'utilització i de manteniment al túnel de vent.

En el nostre cas, com els connectarà directament als endolls estàndard de 230 V, escollirem la versió monofàsic que necessita justament aquest voltatge per funcionar.

Per a més informació del ventilador i el motor, veure el full d'especificacions de l'**Annex C**.

## 2.9 PUNT DE FUNCIONAMENT DEL SISTEMA

Una vegada tenim la corba característica de la instal·lació i la del ventilador, s'uniran per trobar el punt de funcionament del sistema.



**Figura 2.11** Gràfica de les corbes característiques de la instal·lació i del ventilador. [Autor]

Ajust de la corba del ventilador a un polinomi de tercer grau:

$$h_v = 63,65 - 388,98 \cdot Q + 917,74 \cdot Q^2 - 728,53 \cdot Q^3$$

El punt de funcionament del ventilador a  $n = 2850$  rpm és:

$$Q = 0,617 \text{ m}^3/\text{s} = 2221,2 \text{ m}^3/\text{h}; \quad H = 1,90 \text{ m}; \quad \eta \approx 10\%$$

El rendiment màxim del ventilador a aquesta velocitat de gir és de 26%. Però el punt de funcionament que ens donaria tindria un rendiment força més baix essent del 10%. A més el cabal obtingut seria més elevat que el necessari per a tenir una velocitat a la cambra d'assaig de 20 m/s.

Si es vol aconseguir una velocitat de 20 m/s a la cambra d'assaig, una possibilitat és fer variar la velocitat de gir del ventilador. Per aconseguir un punt de funcionament de  $Q' = 0,512 \text{ m}^3/\text{s}$  amb una diferència de pressió de 15,62 Pa (1,3 m.c.aire), es procedeix mitjançant les lleis de semblança dels ventiladors a obtenir la velocitat de gir necessària:

$$\alpha = \frac{n'}{n}$$

On  $\alpha$  és la relació de velocitats de gir [adimensional],  $n$  i  $n'$  són les velocitats de rotació que es volen comparar [rpm].

Les lleis de semblança són (expressades en relacions de cabals i alçades):

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} = \alpha; \quad \frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 = \alpha^2$$

On  $Q$  i  $Q'$  són els cabals que es volen comparar [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] i  $H$  i  $H'$  són les alçades de les dues situacions que es volen comparar [m.c.aire].

Substituint a l'equació de la bomba a  $n = 2850$  rpm, la corba operant el ventilador a una velocitat  $n'$  ve expressada per l'equació següent:

$$\frac{h'_v}{\alpha^2} = 63,65 - 388,98 \cdot \frac{Q'}{\alpha} + 917,74 \cdot \left(\frac{Q'}{\alpha}\right)^2 - 728,53 \cdot \left(\frac{Q'}{\alpha}\right)^3$$
$$h'_v = 63,65 \cdot \alpha^2 - 388,98 \cdot \alpha \cdot Q' + 917,74 \cdot Q'^2 - 728,53 \cdot \frac{Q'^3}{\alpha}$$

Substituint valors:

$$1,3 = 63,65 \cdot \alpha^2 - 388,98 \cdot \alpha \cdot 0,512 + 917,74 \cdot 0,512^2 - 728,53 \cdot \frac{0,512^3}{\alpha}$$

Simplificant:

$$0 = 63,65 \cdot \alpha^2 - 199,158 \cdot \alpha + 239,28 - \frac{97,782}{\alpha}$$

Resolent l'equació:

$$\alpha = \frac{n'}{n} = 0,83$$

La velocitat de gir del ventilador per aconseguir el punt de funcionament [ $Q' = 0,512 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $h_v' = 1,3 \text{ m.c.aire}$ ] és de  $n' = 2850 \cdot 0,83 = 2365,5 \text{ rpm} \approx 2366 \text{ rpm}$ .

Donant una corba a  $n' = 2366 \text{ rpm}$ :

$$h'_v = 63,65 \cdot \alpha^2 - 388,98 \cdot \alpha \cdot Q' + 917,74 \cdot Q'^2 - 728,53 \cdot \frac{Q'^3}{\alpha}$$

Treballant a aquesta velocitat de gir (2366 rpm) el rendiment obtingut es pot determinar calculant el punt homòleg de funcionament d'aquest nou punt de funcionament a la corba de 2850 rpm:

$$Q = Q' / \alpha = 0,512 / 0,83 = 0,617 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (2221,2 m}^3/\text{h)}$$

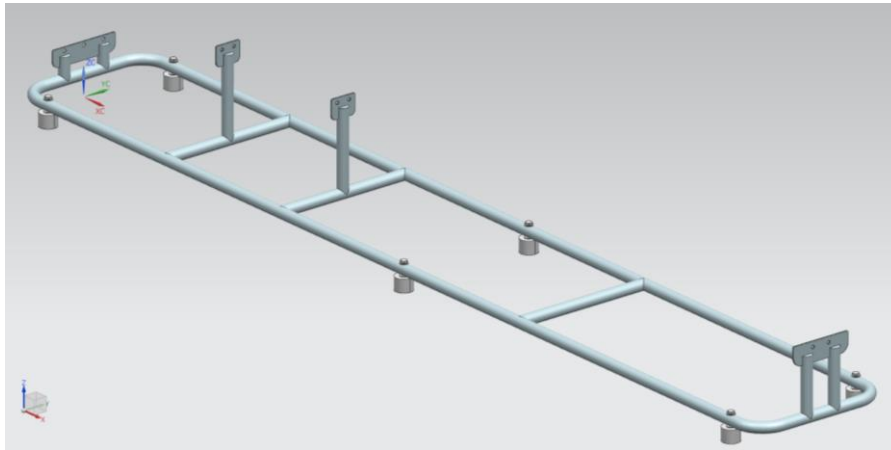
$$h_v = h_v' / \alpha^2 = 1,3 / 0,83^2 = 1,887 \text{ m.c.aire (22,71 Pa)}$$

Llegint el rendiment a la corba de ventilador ( $n = 2850 \text{ rpm}$ ) per a aquest punt és de  $\eta \approx 8\%$ , pel que el rendiment no milloraria, però s'ajustaria el punt de funcionament al desitjat.

## 2.10 BANC I UNIONS

Tenint definides les geometries corresponents a cada element del túnel de vent, s'ha de dissenyar una base adequada que suporti tots els elements i que permeti efectuar assajos amb els models de manera adequada. El banc a més de ser el suport per al túnel de vent també és la base sobre la qual es troben els elements de control i calibració.

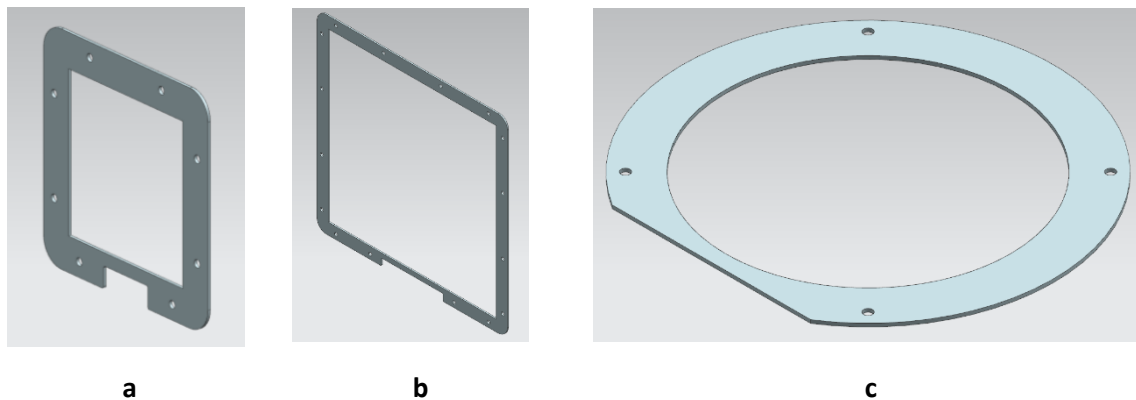
A causa que l'estructura no suportarà més càrrega que la del pes dels elements del túnel, no es considerarà el fer una anàlisi de càrrega estàtica per dimensionar l'estructura, amb un tub rodó d'Alumini de 25 mm de diàmetre serà suficient.



**Figura 2.12** Banc que suportarà el túnel de vent, modelat en Siemens NX 10. [Autor]

Per collar els diferents elements del túnel s'utilitzaran cargols de mètrica 8, de diàmetre més que suficient per suportar el pes dels elements. A més, es col·locaran casquets de goma o "silentblocks" simètricament a la part inferior del banc per reduir l'efecte de les vibracions que pot provocar el ventilador.

Entre els elements, quedant per sobre de les plaques que uneixen els elements amb el banc, es col·locaran juntes de cautxú per evitar pèrdues de cabal.



**Figura 2.13** Els tres tipus de juntes de cautxú Tipus 1 (a), Tipus 2 (b) i Tipus 3 (c). [Autor]

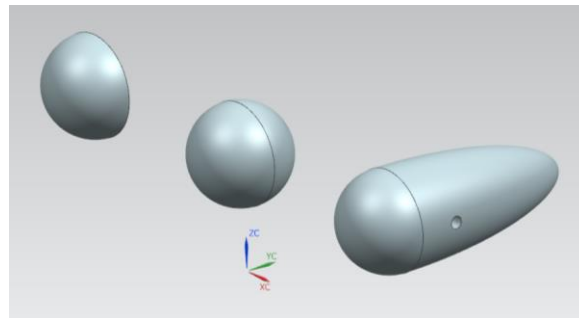
## 2.11 MODELS

Com s'ha mencionat anteriorment, els models es realitzaran en impressió 3D, permetent una gran varietat de geometries. Tot i així, hauran de complir certs requisits: no superar 5,3 cm de diàmetre hidràulic per no sobrepassar el factor de bloqueig d'un 10% i han de tindre un forat de 0,5 o 0,6 cm de diàmetre, a la part posterior preferiblement o en un perfil, per encabir-hi la barra

de subjecció. Per a les pràctiques de laboratori es poden utilitzar diferents tipus de models per així poder-los comparar.

### 2.11.1 Semiesfera, esfera i esfera allargada

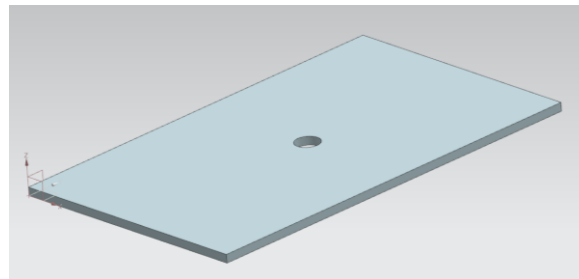
Amb aquests tipus de models de geometria simple, es poden comparar els coeficients de resistència teòrics i els trobats amb el túnel de vent. A més, es podran comparar entre ells.



**Figura 2.14** Models semiesfera, esfera i esfera allargada de 50 mm de diàmetre. [Autor]

### 2.11.2 Placa fina plana

Un altre tipus de model simple que es pot estudiar i comparar fàcilment amb càlculs teòrics és una placa plana i fina. En aquest cas, la força mesurada pel túnel de vent seria la força per resistència de superfície.

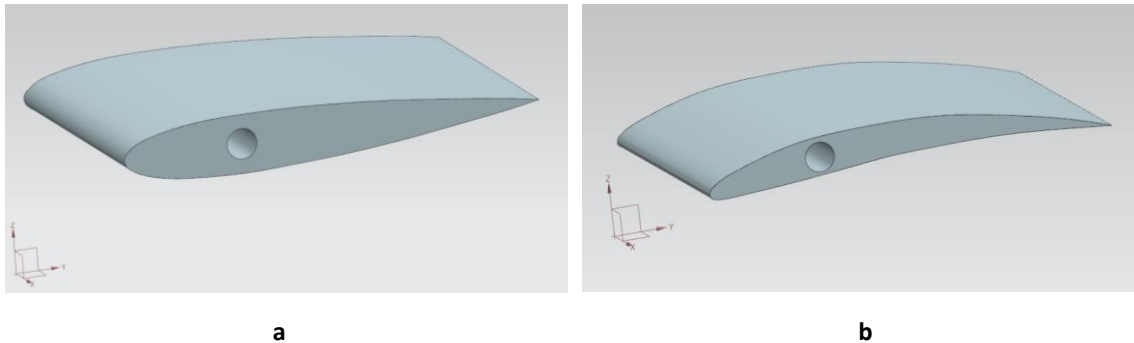


**Figura 2.15** Model placa plana 60x100x2 mm. [Autor]

A més, aquest model es pot fer servir de suport per altres models més complicats.

### 2.11.3 Naca

Una Naca és el perfil utilitzat en les ales dels avions, per al seu disseny, se solen utilitzar sofisticats túnels de vent (generalment de cycle tancat) de les empreses constructores. A més, en aquests models es pot estudiar una altra força a part de la d'arrossegament, la força de sustentació.



**Figures 2.16** Model de Naca 0012 (a) i 6509 (b) de 50 mm de profunditat. [Autor]

Existeixen molts tipus de Naca i són models molt senzills d'imprimir amb una impressora 3D, per tant són un tipus de models molt indicats per a la docència.

#### 2.11.3.1 Força de sustentació màxima: Naca 0012

La força màxima que pot produir el flux d'aire sobre el model que més es veu afectat pel flux s'ha de tenir en compte a l'hora de triar els sensors que s'utilitzaran en el túnel.

Per això, s'ha de fer un càlcul teòric de la força de sustentació que transmetrà als sensors la Naca, utilitzant la fórmula de l'apartat 2.1.11 i sabent que el coeficient de sustentació teòric de la Naca 0012 amb 10% d'inclinació és de 1,00 aproximadament [12]:

$$F_L = C_L A \frac{1}{2} \rho U^2 = 1 \cdot 0,05 \cdot 0,084 \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 20^2 = 1 \text{ N}$$

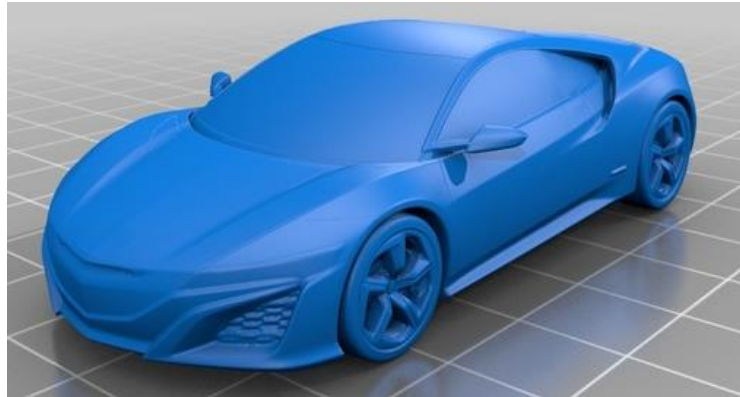
On  $F_L$  és la força de sustentació [N],  $A$  és la superfície que produeix sustentació [m<sup>2</sup>],  $C_L$  és el coeficient de sustentació [adimensional],  $\rho$  és la densitat [kg/m<sup>3</sup>],  $U$  és la velocitat [m/s].

Per tant, el màxim rang més baix que hauria de tindre el sensor és de 1 N.



#### 2.11.4 Automòbil

Una altra indústria que utilitza molt els túnels de vent és la indústria automobilística, utilitzant també túnels de vent molt sofisticats per als estudis aerodinàmics dels vehicles. Hi ha molts tipus de models que es poden estudiar, des d'utilitaris, fins a monoplaques de competició on els estudis aerodinàmics són molt acurats.



**Figura 2.17** Model Honda NSX, automòbil de carrer d'alt rendiment. [www.thingiverse.com]

En els automòbils el coeficient de resistència és molt important, ja que un coeficient baix significa menor consum de combustible, no obstant, la força de sustentació inversa, càrrega aerodinàmica o "downforce" també és molt important ja que ajuda al vehicle en els girs, permetent més estabilitat durant la maniobra i més velocitat en les curses.

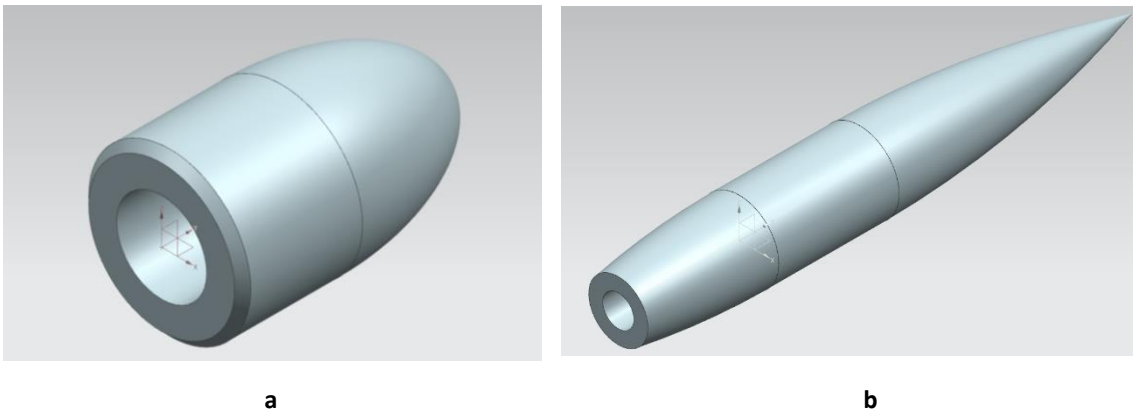


**Figura 2.18** Model Fórmula E, monoplaça de molt alt rendiment de propulsió 100% elèctrica. En aquest cas s'hauria de modificar la escala un 20% més petita per a no interferir en el factor de bloqueig. [www.thingiverse.com]

Per a poder estudiar adequadament aquests models, s'hauran de col·locar sobre plaques planes i fines, que transmetin les forces a la balança.

### 2.11.5 Projectil

Els projectils són elements que també estan molt afectats per l'aerodinàmica. El seu estudi serà semblant als models d'esferes però poden aportar més realisme a l'hora de realitzar les pràctiques de laboratori. En aquest cas, els models es crearien més grans que els objectes reals per a poder estudiar-los amb més facilitat dintre del túnel.



**Figures 2.19** Model de bala de 9 mm (a) i bala de calibre .50 (b). [Autor]

## 3 SIMULACIÓ

---

Avui en dia, és molt comú utilitzar software informàtic per simular el comportament d'un sistema després de realitzar un anàlisi previ de forma teòrica. Es generen els models virtuals amb les dimensions reals i es defineixen les condicions a les que es sotmetrà el model per a que l'ordinador realitzi els càlculs i així, obtenir els resultats de la simulació.

L'avantatge principal de la simulació és que no cal construir el sistema que es vol calcular, si no que és un pas previ a això. De fet, els resultats de la simulació poden afectar al disseny del model. A més, la simulació ens pot aportar confiança en els càlculs teòrics prèviament realitzats i pot fer-nos descobrir errors previs.

### 3.1 ETAPES DE LA SIMULACIÓ

Generalment, la simulació inclou tres etapes: pre procés, càlcul i post procés, en aquest ordre de realització.

En el **pre procés**, es donen totes les condicions inicials del model realitzat. El mètode més utilitzat és el d'elements finits, dividint un cos en elements molt petits que s'analitzaran individualment i després aquests resultats s'unificaran per donar un resultat global.

En l'etapa de **càlcul**, es resolen les equacions de cada tipus d'anàlisi, per lo general utilitzant el mètode d'elements finits o de volums finits descrit anteriorment, en aquesta etapa s'utilitzen equacions diferencials massa complexes com per ser realitzades a ma, arribant a resultats bastant precisos. Aquesta etapa la realitza l'ordinador.

Finalment, el **post procés**, són tots els resultats obtinguts que es poden observar en gràfics, taules, figures, etc. Aquests resultats haurien de ser pròxims als teòrics i als reals. En aquesta etapa s'haurà de valorar aquests resultats obtinguts i decidir actuar en conseqüència.

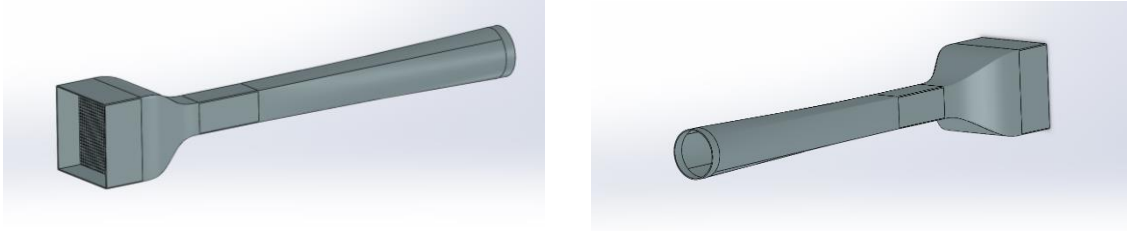
### 3.2 MODELAT DEL TÚNEL DE VENT

Per a realitzar la simulació, primerament, s'haurà de realitzar un model del túnel de vent concorde al software que s'està utilitzant per simular, en aquest cas Solidworks 2016. Aquest modelat serà diferent del realitzat amb Siemens NX 10 (amb el qual es realitzaran els plànols de l'**Annex B: Plànols**).

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Per a poder simular amb aquest programa, haurem de modelar el túnel de vent de forma que el programa reconegui fàcilment el volum d'aire que hi ha dintre del túnel. Per limitacions de software i hardware, s'haurà de simular sense la malla estabilitzadora ni l'anell d'entrada.



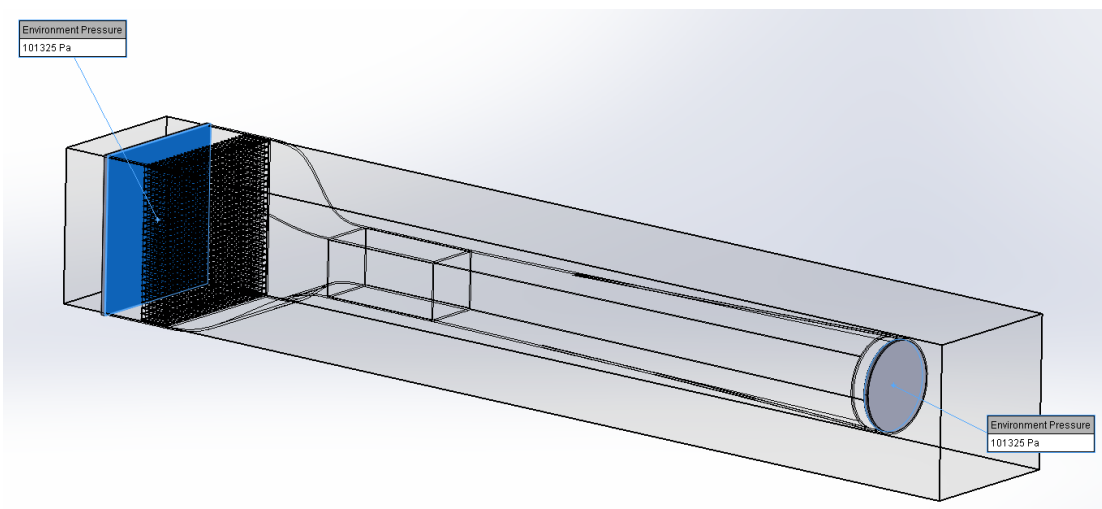
**Figures 3.1** Modelat del túnel de vent per simulació amb Solidworks 2016. [Autor]

## 3.3 PRE PROCÉS

En el pre procés, seleccionarem les condicions necessàries per simular de forma aproximada el funcionament del túnel de vent.

### 3.3.1 Condicions de contorn

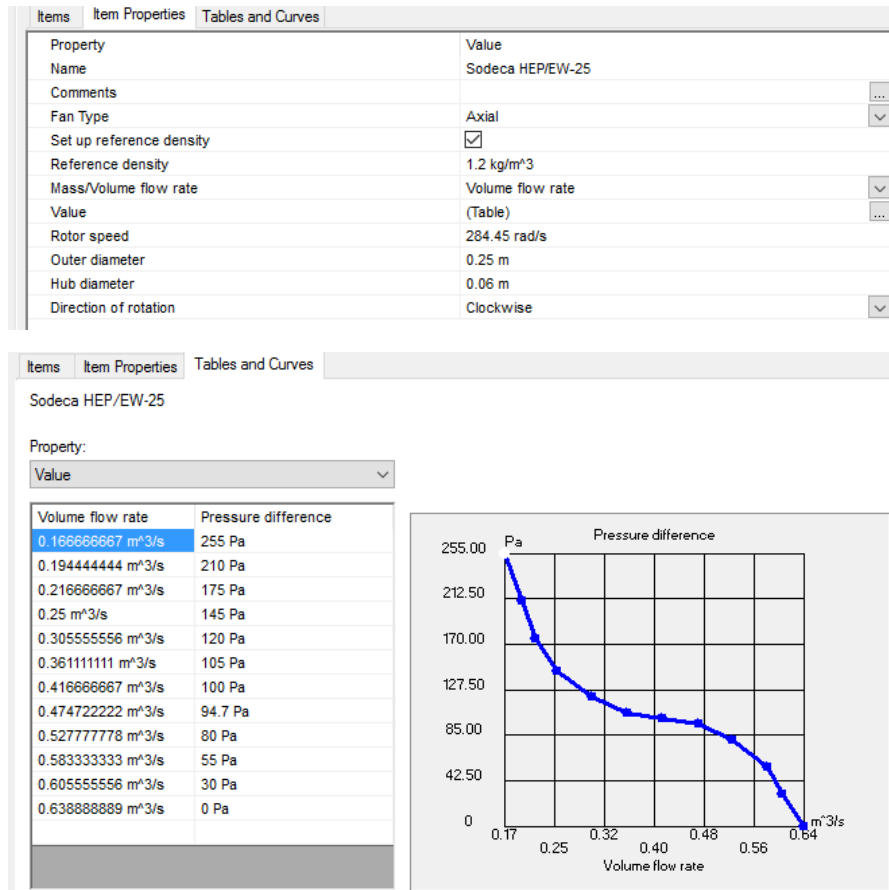
Primerament, a l'hora de crear el projecte de simulació, ens demanarà que seleccionem el sistema d'unitats (Sistema Internacional), el tipus d'anàlisi de flux (intern, el programa buscarà un espai dintre d'un sòlid), el fluid (aire) i el tipus de flux (laminar i turbulent) i introduir la rugositat del material, en aquest cas de 0,01 mm per la fibra de vidre i metacrilat. Tot seguit, indicarem al programa que les obertures del túnel estan a condicions atmosfèriques (pressió atmosfèrica i temperatura atmosfèrica).



**Figura 3.2** Selecció de volum de control i entrades i sortides del flux. [Autor]

### 3.3.2 Ventilador

Seguidament, crearem un volum on simularem el ventilador i introduïm les seves característiques: les seves dimensions, la velocitat a la que gira i la taula que genera la seva corba característica, mostrada en l'apartat 3.8.1.

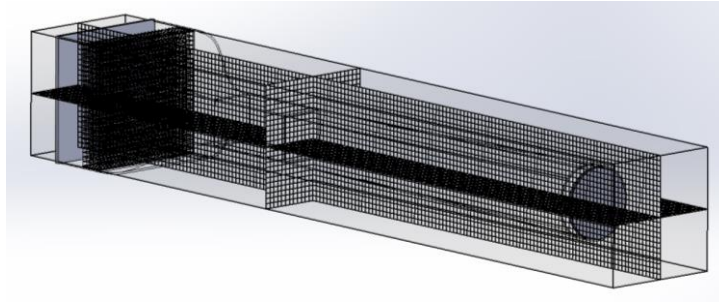


Figures 3.2 Selecció de les especificacions del ventilador per simular. [Autor]

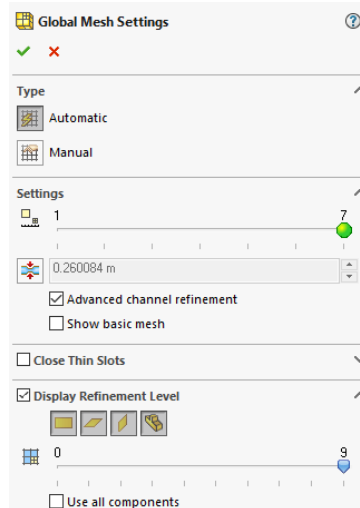
### 3.3.3 Mallat

Tot seguit prepararem la malla que permetrà al programa fer els càlculs de cada punt del túnel de vent. El hardware de l'ordinador que s'utilitza per simular limita les dimensions del mallat, un hardware més potent permet un mallat més petit i precís.

El Solidworks ens permet utilitzar una malla cúbica, establint-la en automàtic en màxima qualitat inicial 7 (les dimensions de la malla inicial depenen del sistema modelat) i amb un refinament de la malla de 9 (dividir la malla inicial en 4 cel·les 9 vegades), sense seleccionar l'opció de mínim espai (si es seleccionés no interferiria en els resultats ja que la malla està a la màxima resolució i el programa reconeix la geometria).



**Figura 3.4** Seccions del mallat (sense refinament de malla, ja que aquest impediria la visualització correcta de la malla de la imatge). [Autor]



**Figura 3.5** Configuració del mallat. [Autor]

Per últim, seleccionarem els resultats concrets “Goals” que volem aconseguir, com la velocitat màxima, la pressió màxima, etc.

### 3.4 CÀLCUL

El software Solidworks, a les zones de fluids resol les equacions de Navier Stokes, que són formulacions de les lleis de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia.

Aquestes equacions es complementen amb equacions d'estat fluid que defineixen la naturalesa del fluid i amb dependències empíriques de la densitat del fluid, la viscositat i la conductivitat tèrmica a temperatura. Els fluids no newtonians inelàstics es prenen en consideració introduint una dependència per la qual la seva viscositat dinàmica depèn de la temperatura i la taxa de ciselladora del flux.

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

A més, s'utilitzen models especials per descriure gasos reals, condensació i vaporització de volum, cavitació i materials porosos.

L'anàlisi de flux del programa pot prendre en consideració tant els fluxos laminars com els turbulents. Els fluxos laminars es produeixen en valors baixos del número de Reynolds, que es defineix com el producte de velocitat i longitud dividides per la viscositat cinemàtica. Quan el nombre de Reynolds supera un cert valor crític, el flux passa suaument a ser turbulent.

Per predir els fluxos turbulents, s'utilitzen les equacions de Navier-Stokes amb mitjana de Favre, en què es tenen en compte els efectes ponderats pel que fa a temps de la turbulència del flux en els paràmetres del flux, mentre que els fenòmens a gran escala que depenen del temps s'han en compte directament. Per mitjà d'aquest procediment, apareixen termes addicionals coneguts com tensions de Reynolds en les equacions, per als quals s'ha de proporcionar informació addicional.

Per últim, el Solidworks empra equacions de transport per a l'energia cinètica turbulenta i la seva taxa de dissipació.

Per obtenir els resultats mitjançant les equacions descrites anteriorment, el programa realitza un gran nombre d'iteracions, en el nostre cas ha utilitzat 100 per cada cel·la de la malla (173.000 cel·les de fluid aproximadament).

Per més informació de les equacions i del model de càlculs del Solidworks 2016, veure l'**Annex D: Informe tècnic Solidworks Flow Simulation**.

### 3.5 POST PROCÉS

Una vegada l'ordinador hagi realitzat les iteracions necessàries per realitzar el càlcul de cada unitat del mallat, obtindrem diversos tipus de gràfiques per visualitzar els resultats. En aquest cas, analitzarem les línies de flux, les gràfiques transversals de velocitat, pressió i vorticitat que són les més significatives per al projecte.

### 3.5.1 Línies de flux

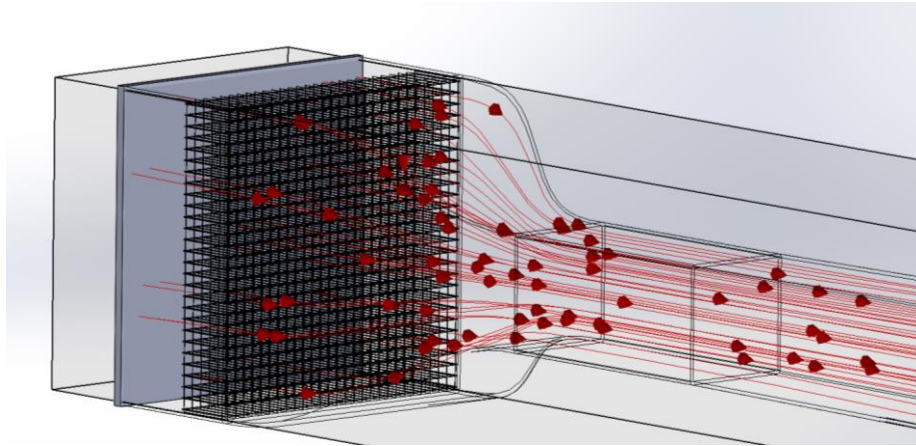


Figura 3.6 Simulació de les línies de flux amb Solidworks 2016. [Autor]

Per aconseguir un flux de qualitat, ens interessa que a la cambra de proves hi hagi un **flux uniforme**, es a dir, que les **línies de flux siguin paral·leles entre elles i amb les parets**. Com es pot observar a la imatge, les línies surten del direccionador de flux i giren seguint les parets del con de contracció. Quan entren a la cambra de proves ho fan paral·leles, això vol dir que el direccionador de flux fa la seva funció correctament, aconseguint un flux de qualitat.

### 3.5.2 Velocitat del flux

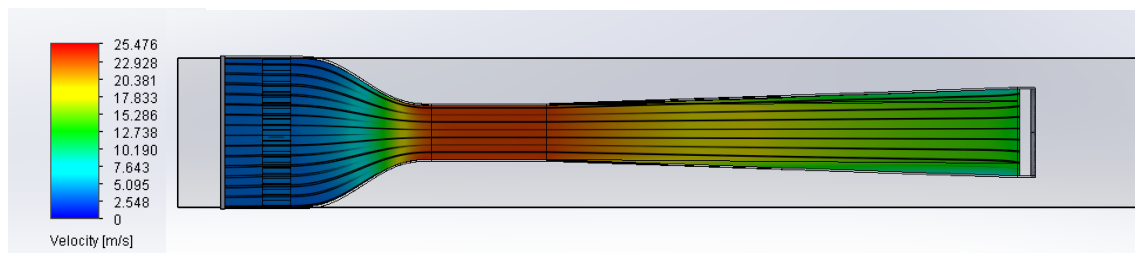


Figura 3.7 Simulació de velocitat de flux amb Solidworks 2016. [Autor]

Com es pot observar en la figura 3.7, el **rang de velocitats** és aproximadament de **2,5 m/s a 25,5 m/s**, sent la velocitat més lenta del túnel a la cambra d'ajustos i la més ràpida a la cambra de proves, **millorant la velocitat objectiu en 5,5 m/s**.

En les zones on canvia la velocitat, com en el con de contracció, es pot veure que no varia uniformement en l'eix z (vertical), això és degut a la corba que fan les parets del con. Això fa que les partícules més properes a les parets arribin abans que les del centre.



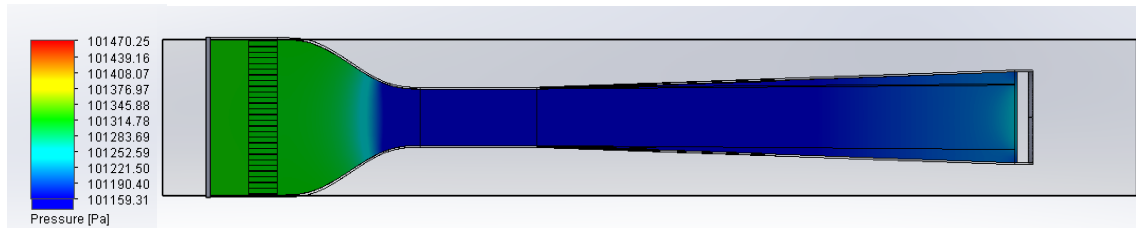
# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

En aquesta imatge també es poden veure les línies de corrent, confirmant el que s'ha dit en l'apartat anterior.

## 3.5.3 Pressió del flux

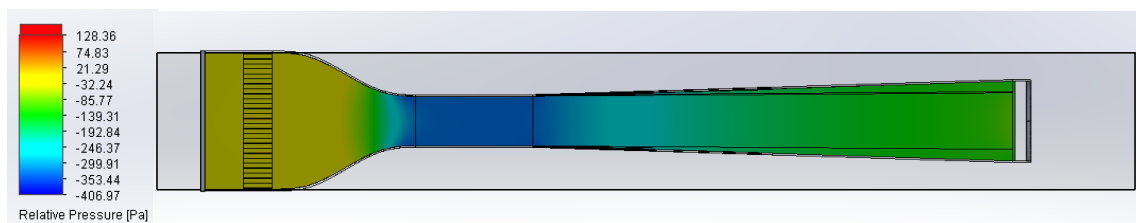
### 3.5.3.1 Pressió absoluta



**Figura 3.8** Simulació de la pressió absoluta del flux amb Solidworks 2016. [Autor]

Resulta evident veure que les zones més estretes, de menor secció, com la cambra de proves o la entrada del difusor, són les zones on la pressió absoluta és més baixa (menys de 101160 Pa), mentre que la zona on la pressió és més alta (101315 Pa) és a la cambra d'ajustos, on la secció és major. A simple vista en veu que la diferència entre aquestes pressions no és gaire alta.

### 3.5.3.2 Pressió relativa



**Figura 3.9** Simulació de la pressió relativa del flux amb Solidworks 2016. [Autor]

La figura 3.9 ens mostra la pressió relativa al llarg del túnel de vent. En la zona d'ajustos, la pressió no varia gaire respecte la atmosfèrica però a mesura que disminueix la secció del túnel la pressió relativa augmenta (en mòdul) a -300 Pa aproximadament, confirmant el que s'ha pogut observar en l'apartat anterior.

### 3.5.4 Vorticitat

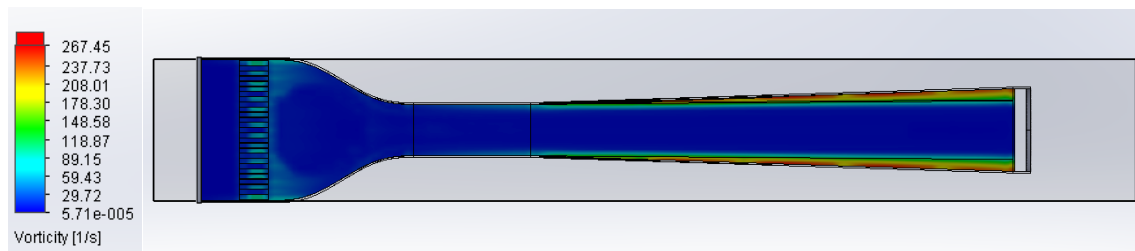


Figura 3.10 Simulació de la vorticitat del flux amb Solidworks 2016. [Autor]

La vorticitat és una magnitud física que s'utilitza per quantificar la rotació d'una partícula d'un fluid. Com ja s'ha dit en l'apartat 4.4.1, per un flux de qualitat, ens interessa que el fluid sigui paral·lel amb les parets, per això es necessari que **el valor de vorticitat sigui el més reduït possible a la cambra de proves**.

En la figura 3.10 es veu que la major part del túnel és de color blau fosc, indicant que **la vorticitat és de  $5,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$** , un valor molt petit, confirmant-nos que les línies de flux són realment rectes i uniformes, aconseguint una bona qualitat de flux en el centre de la cambra de proves on se situaran els models. Es pot veure un augment de la vorticitat en les parets del difusor, a mesura que el flux s'apropa al ventilador i una mica en el direccionador de flux.

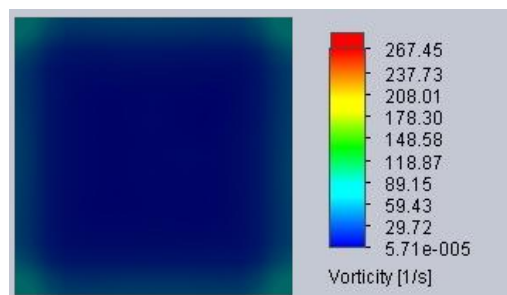


Figura 3.11 Tall transversal a la cambra de proves on se situarien els models amb Solidoworks. [Autor]

A les parets de la cambra, tant en la figura 3.10 com en la 3.11, es pot observar un petit augment de la vorticitat, això és degut al desprendiment de la capa límit, com s'ha calculat de forma teòrica en l'apartat 2.2.1.1.

### 3.5.5 Resultats

En la taula següent tenim dades concretes per poder precisar els resultats obtinguts amb les imatges anteriors:

Resultats	Unitat	Valor
Pressió total mínima	[Pa]	100922,99
Pressió total màxima	[Pa]	101536,88
Pressió estàtica mínima	[Pa]	100922,99
Pressió estàtica màxima	[Pa]	101453,35
Pressió dinàmica màxima	[Pa]	388,43
Màxima velocitat absoluta	[m/s]	25,44
Mínima velocitat (X)	[m/s]	-5,94
Màxima velocitat (X)	[m/s]	5,94
Màxima velocitat (Y)	[m/s]	25,38
Mínima velocitat (Z)	[m/s]	-5,94
Màxima velocitat (Z)	[m/s]	5,94
Mínima densitat del fluid	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,200
Màxima densitat del fluid	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,205
Força de fricció	[N]	1,20
<b>Taula 7.</b> Resultats (goals) de la simulació amb Solidworks 2016. [Autor]		

En quant a les pressions cal recalcar que en aquesta taula (7) estem parlant de pressió estàtica (pressió d'un fluid independentment de la seva velocitat) i pressió dinàmica (augment de pressió d'un fluid quan circula per un conducte), en canvi, en les figures dels apartats anteriors es parla de pressió absoluta i relativa (aquestes es relacionen amb la pressió atmosfèrica).

La pressió dinàmica mínima és 0 per que en la entrada del túnel la velocitat és 0, com es pot veure a la velocitat mínima absoluta i a l'eix y (aquest eix es el que es veu horitzontal a les imatges).

La **velocitat màxima del túnel és de 25,44 m/s**, no obstant la velocitat en l'eix y disminueix en 0,064 m/s, això vol dir que en la cambra de proves (que es on s'aconsegueix la màxima velocitat) no s'aconsegueix unes línies de flux perfectament rectes. Aquesta diferència de velocitats corresponen a la velocitat dels eixos x i z.

Aconseguir que les línies de flux siguin perfectament paral·leles només és possible en un món perfecte o teòric, per tant, l'objectiu es **reduir el màxim possible aquesta diferència** i en aquest cas, **la diferència de velocitats correspon a un 0,25% de la velocitat màxima absoluta**, per tant, podem validar el resultat de la simulació en quan a les línies de flux.

ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ  
D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Les velocitats màximes i mínimes en els eixos x i z són les velocitats obtingudes en el con de contracció, on el flux segueix la corba més accentuada de tot el túnel.

En les intensitats ens interessa saber la diferència que hi ha entre la màxima i la mínima, per analitzar la compressibilitat del flux. **Aquesta diferència és molt petita ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ), per tant, podem afirmar que el flux és pràcticament incompressible.**

Per últim, la força de fricció amb les parets podria afectar el rendiment del ventilador però en el nostre cas, aquesta força és molt petita, superant per dècimes de Newton la força de sustentació que provoca el model que provoca més afectació al flux.

## 4 DISSENY DEL SISTEMA DE MESURAMENT

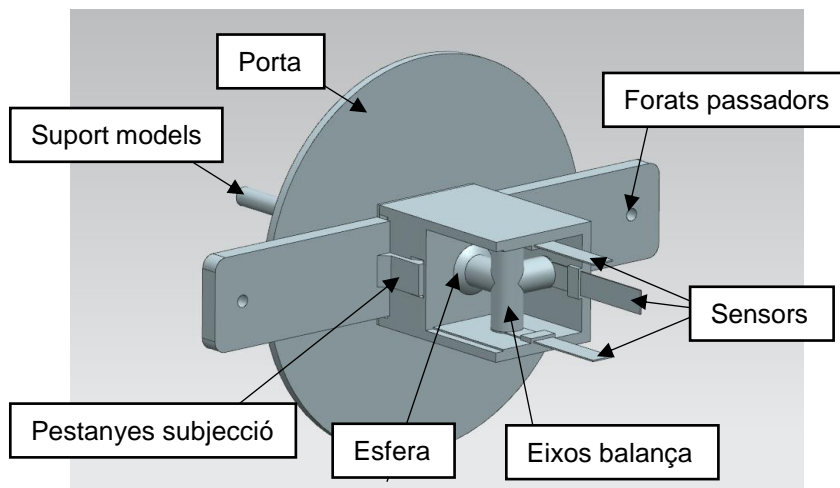
### 4.1 BALANÇA

Com hem vist a l'apartat 2.2.2, la balança aerodinàmica és un instrument que permet mesurar les forces i moments actuant sobre un model en un túnel de vent en una direcció coneguda. La quantitat de components a mesurar, depenent de l'assaig a considerar, pot variar d'un a sis. Depenent de la seva localització, les balances de túnel de vent poden ser classificades en dos grups: internes i externes.

En el nostre cas, utilitzarem una balança externa, on la força aerodinàmica total i moments són separats en els seus components amb l'ajuda de diversos sistemes mecànics. Aquestes balances solen denominar-se balances mecàniques. El model és instal·lat a la cambra de proves del túnel amb l'ajuda de suports com poden ser bigues o filferros, que el vinculen a la balança.

En aquestes balances les components de forces i moments són usualment determinats en un sistema d'eixos "balança" paral·lel al sistema d'eixos del túnel de vent.

#### 4.1.1 Parts de la balança

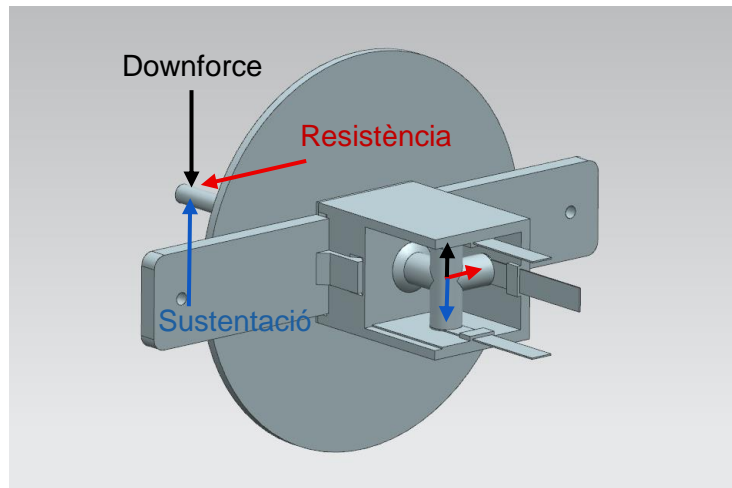


**Figura 4.1** Modelat de les parts internes de la balança (sense la carcassa) en posició inversa per a que es puguin observar els eixos i els sensors correctament. [Autor]

Totes aquestes parts de la balança es poden fabricar amb una impressora 3D (a excepció de la porta que s'hauria de fabricar amb metacrilat com la cambra de proves). Per al suport es podria utilitzar un tub d'alumini però també seria apte fer-ho en impressió de plàstic.

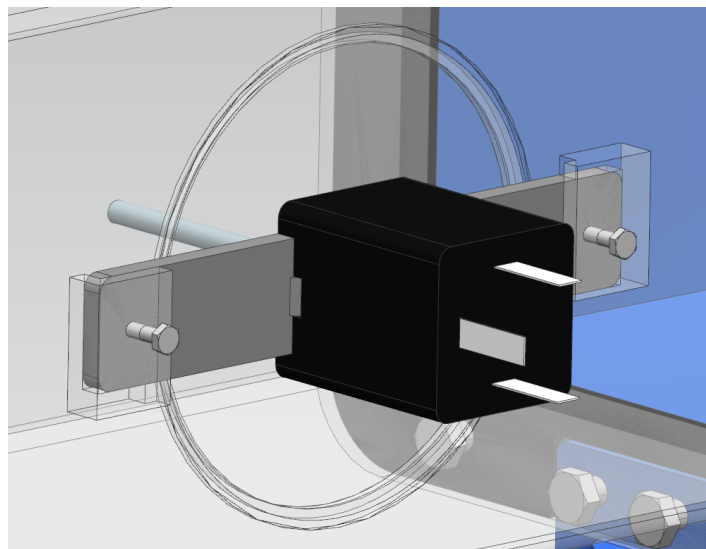
#### 4.1.2 Funcionament

Els models es col·locaran a la punta del suport per models i quan l'aire faci força sobre ells, aquesta força es transmetrà per el model fins als eixos de la balança que transmetran la força als sensors, tot això amb l'ajuda d'una esfera en l'eix que permetrà un lleu gir del mateix.



**Figura 4.2** Transmissió de les forces de resistència, sustentació i càrrega aerodinàmica ("Downforce") que actuen sobre la balança. [Autor]

Les pestanyes serveixen per acoblar fermament el suport de la esfera a la porta i en els forats passadors es col·locaran cargols o passadors per a fixar la porta a la cambra de proves.



**Figura 4.3** Balança instal·lada en la cambra de proves. [Autor]

#### 4.1.3 Suport dels models

El suport dels models aportarà una resistència a l'aire, provocant l'activació dels sensors de la balança. Per saber quina resistència oferiran, es fa un càlcul teòric de la seva força de resistència al flux, utilitzant la fórmula de l'apartat 2.1.10 i tenint en compte que el coeficient de resistència d'un cilindre és de aproximadament 0,3 en flux turbulent:

$$F_D = C_D A \rho \frac{U^2}{2} = 0,3 \cdot 0,005 \cdot 0,08 \cdot 1,2 \cdot \frac{20^2}{2} = 0,0288 \text{ N}$$

On  $C_D$  és el coeficient de resistència o arrossegament [adimensional],  $F_D$  és la resistència d'avanç [N],  $A$  és l'àrea perpendicular al flux [m<sup>2</sup>],  $\rho$  és la densitat del fluid [kg/m<sup>3</sup>] i  $U$  és la velocitat del mateix [m/s].

El resultat és molt baix, amb la calibració es podria anular amb facilitat.

## 4.2 SISTEMA ELECTRÒNIC

Es necessita un element per convertir la força exercida sobre el model, a un senyal mesurable i quantificable. Per a realitzar aquesta conversió, es necessita un sensor de força per resistència (FSR). Aquests dispositius, fabricats sobre una robusta pel·lícula de polímer (PFT), presenten una disminució de la resistència amb l'augment de la força aplicada a la superfície del sensor.

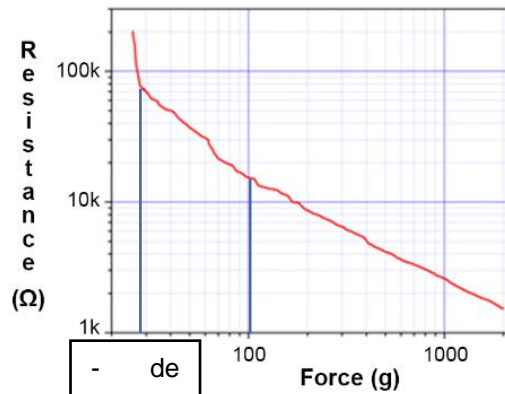
### 4.2.1 Sensor FSR sèrie 400

El sensor FSR sèrie 400 és un sensor molt utilitzat gràcies al seu rang de forces de entre 0,1 N grams i 100 N (depenent del sistema on es col·loqui). Quan no es pressiona, la seva resistència és major a 1 megaohm. Té una zona de pressió de 5 mm de diàmetre.



**Figura 4.4** Sensor de força per resistència FSR 400. [Interlink Electronics FSR 400 Datasheet, Annex C]

La precisió de la força d'aquest tipus de sensors varia des de aproximadament  $\pm 5\%$  a  $\pm 25\%$ , depenent de la consistència del sistema de mesurament i actuació, la tolerància de repetibilitat en la seva fabricació, i el calibratge.



**Figura 4.5** Gràfica Resistència-Força del sensor FSR 400. [Interlink Electronics FSR 400, Annex C]

En la gràfica anterior es pot observar el rang d'actuació dintre del sistema de la balança, de menys de 10 grams a 100 grams (0,1 N a 1 N). La seva força d'activació podria\* ser massa alta per a la balança, necessitaríem un rang de forces més baix.

\*Per trobar el rang exacte de funcionament del sensor s'haurien de realitzar assajos amb pesos coneguts.

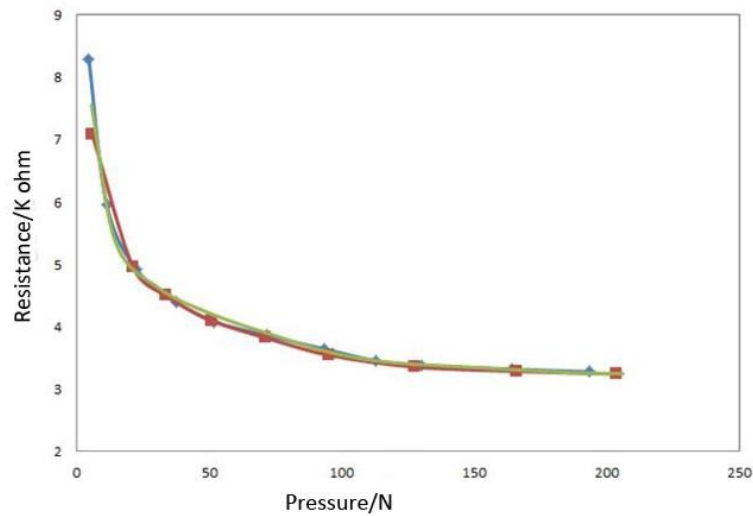
#### 4.2.2 Sensor RFP sèrie 602

El sensor més adequat per situar a la balança és el RFP sèrie 602. Té un rang de forces de entre 5 grams i 100 grams (0,05-1 N). Quan no es pressiona, la seva resistència és quasi 10 k ohm. Té una zona de pressió de 1 cm de diàmetre.



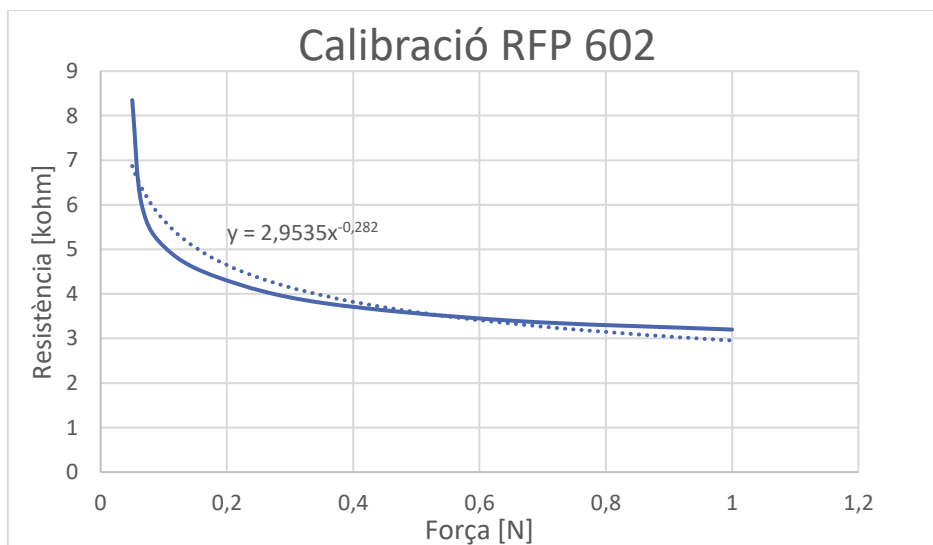
**Figura 4.6** Sensor de força per resistència RFP 602. [Centenary Materials, www.ebay.com]





**Figura 4.7** Gràfica de calibració del sensor RFP. [Centenary Materials, www.ebay.com]

El fabricant ens proporciona una gràfica de calibració, tot i que no correspon al 602. Podem extrapolar aquesta gràfica al rang de forces del sensor 602, es a dir, de 0,05 a 1 N. **Per a una millor calibració, s'hauria de realitzar una gràfica manualment amb diferents mesures de pesos dintre del rang del sensor, trobant la resistència en cada punt.**



**Figura 4.8** Gràfica de la calibració del sensor RFP 602 extrapolada de la gràfica del fabricant. [Autor]

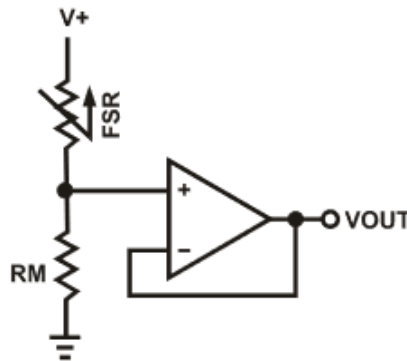
A partir de la gràfica obtenim una equació aproximada:

$$y(\text{resistència}) = 2,9535 \cdot x(\text{força})^{-0,282}$$

Aquesta equació la utilitzarem per a l'hora de programar el controlador que llegeixi la senyal del sensor, ja que necessitem la relació entre la resistència i la força del sensor.

### 4.2.3 Divisor de tensió

Per a una conversió simple de força a voltatge, el dispositiu RFP es combina amb una resistència de mesurament en una configuració de divisor de voltatge.



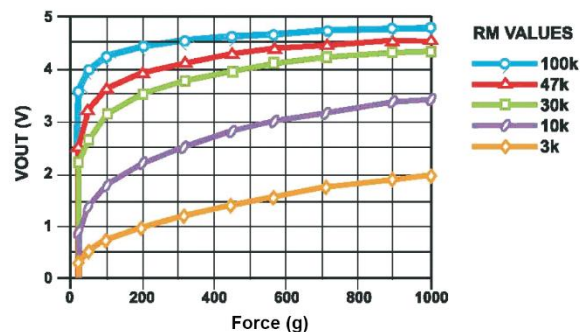
**Figura 4.9** Esquema del divisor de tensió. [Interlink Electronics FSR 400 Datasheet, Annex C]

A la figura 4.9 li correspon la següent equació:

$$V_{out} = \frac{R_m V_+}{R_m + R_{FRS}}$$

On  $V_{out}$  és el voltatge de sortida,  $R_m$  és la resistència de mesurament,  $V_+$  és el voltatge d'entrada i  $R_{FRS}$  és la resistència del sensor.

Amb aquest element, podem millorar la sensibilitat del sensor, millorant la precisió de les mesures. La resistència de mesurament  $R_m$  pot variar depenent de les necessitats, variant la sensibilitat del sistema.



**Figura 4.10** Gràfic de la variació de voltatge amb la força aplicada millorant la sensibilitat segons la resistència utilitzada del sensor FSR 400. [Interlink Electronics FSR 400 Datasheet, Annex C]

Com que el que ens interessa és el màxim rang de voltatges entre la mínima i la màxima força aplicada al sensor per tindre més sensibilitat, observant el gràfic anterior, una resistència de mesurament de 47 k $\Omega$  seria la més adequada, entre la mínima força d'activació i la màxima en el nostre sistema (100 g) hi ha poc més de 1 V de diferència. Torno a recalcar que els números exactes es trobarien experimentant amb el sensor.

Com a amplificadors operacionals, el LM258 o el LM324 suggerits pel fabricant poden ser bona opció, el LM392 també pot servir. En el nostre cas, s'utilitzarà el LM324 per la seva facilitat de compra i les seves dimensions que permeten manipular-lo fàcilment.

#### 4.2.4 Arduino

Per a recollir les dades dels sensors, es necessitarà una placa amb un microcontrolador, un exemple simple d'utilitzar és l'Arduino.

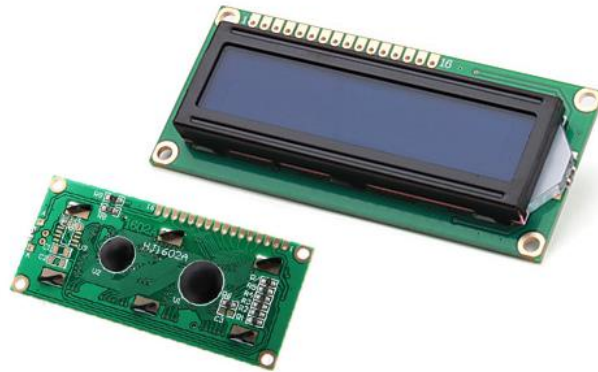
*“Arduino és una plataforma electrònica de codi obert basat en maquinari i programari fàcil d'utilitzar, plaques Arduino són capaços de llegir les entrades (la llum en un sensor, un dit sobre un botó, o un missatge de Twitter) i convertir-la en una sortida (l'activació d'un motor, encendre un LED, publicar alguna cosa en línia). Es pot dir que el seu tauler què fer mitjançant l'enviament d'un conjunt d'instruccions al microcontrolador en el tauler. Per a això s'utilitza el llenguatge de programació d'Arduino (basat en el cablejat), i el programari de Arduino (IDE), basades en el processament.*

*Amb els anys Arduino ha estat el cervell de milers de projectes, a partir d'objectes quotidians als instruments científics complexos. Una comunitat mundial d'inventors (estudiants, aficionats, artistes, programadors i professionals) s'ha reunit al voltant d'aquesta plataforma de codi obert, les seves contribucions han afegit fins a una increïble quantitat de coneixement accessible que pot ser de gran ajuda per a novells com per experts.” [www.arduino.org]*



**Figura 4.11** Placa Arduino Uno. [www.arduino.org]

En el nostre cas, utilitzarem la placa estàndard Arduino Uno. Aquesta placa tindrà la potència i el nombre de pins necessaris per mesurar les forces de la balança i mostrar les dades en una pantalla. Full d'especificacions en l'**Annex C**.



**Figura 4.12** Pantalla LCD HD44770. [www.luisllamas.es]

La pantalla LCD ocupa molts pins de la placa Arduino, però és la més simple de programar. Existeixen pantalles TFT, que ocupen menys pins però la seva programació és més llarga i complicada, a més, la resolució màxima que pot suportar la placa Arduino Uno és de 240x320 píxels.

A més, caldrà disposar d'un potenciòmetre per calibrar els sensors i un polsador "RESET" per reiniciar l'adquisició de mesures.

#### 4.2.5 Connexions a la placa Arduino

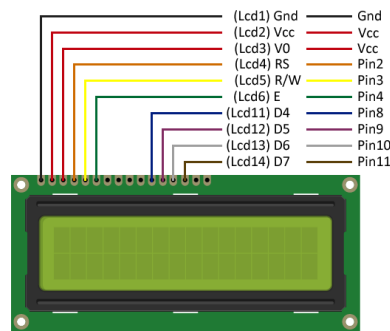
Els elements del sistema electrònic de mesurament de la balança seran:

- 3 sensors RFP 602 (FSR)
- 3 amplificadors operacionals LM324
- 3 resistències de 47 k $\Omega$
- 1 placa Arduino Uno
- 1 pantalla LCD HD44770
- 1 potenciòmetre de 100 k $\Omega$
- 1 polsador
- 3 connectors Faston

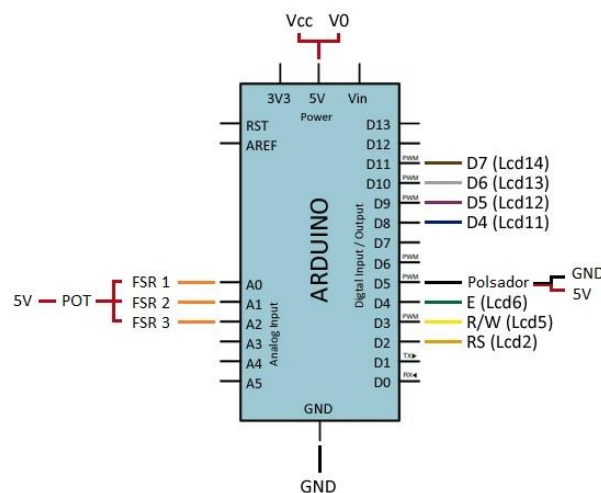
Evidentment, també necessitarem cablejat i suports per aquests elements. La millor manera de realitzar les connexions és soldant els cables als elements amb un soldador d'estany i les connexions que no siguin permanents (com la dels sensors) es poden unir mitjançant connectors Faston o algun altre tipus.

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina



**Figura 4.13** Esquema de connexions de la pantalla LCD HD44770. [www.luisllamas.es]



**Figura 4.14** Esquema de connexions dels elements electrònics a la placa Arduino. [Autor]

Com es pot veure en la imatge anterior, la placa Arduino Uno té suficients pins per col·locar tots els elements. Els FSR són els sensors juntament amb els divisors de tensions, una de les dues potes es connecta a un pin analògic i l'altra va connectada al potenciòmetre de control (POT) i aquest últim al pin de la placa que proporciona 5V. El FSR 1 correspon al sensor de força de resistència, el FSR 2 correspon al de força de sustentació i el FSR 3 correspon al sensor de càrrega aerodinàmica.

El polgador, que té quatre potes, dues d'elles van al pin GND (terra), un dels dos restants al pin de 5V i l'altre al pin digital (D5) que volem que controlï la pulsació.

La resta de pins marcats a la imatge es connecten amb la pantalla LCD segons l'esquema.

Per tal de protegir aquests elements, s'haurà de fabricar una carcassa adaptada a aquests elements. Com que hi ha moltes opcions diferents amb elements com els potenciòmetres o els polgadors, el disseny de la carcassa pot variar segons els elements escollits.

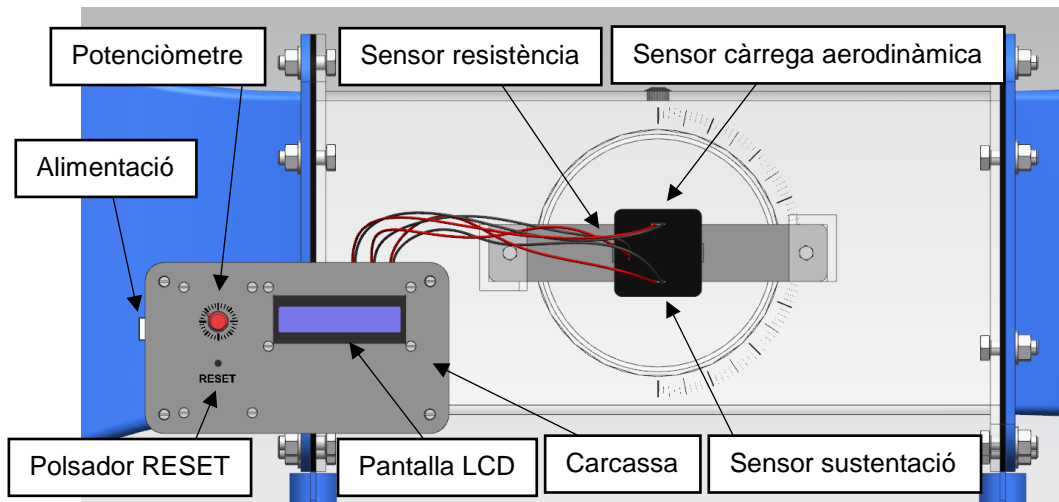


Figura 4.15 Balança i carcassa que protegeix els elements electrònics. [Autor]

Aquesta carcassa (panell de control) quedarà fixada al túnel en la unió entre el con de contracció i la cambra de proves preferiblement (o entre el difusor i la cambra de proves) amb un cargol una mica més llarg que la resta de cargols que uneixen aquestes parts del túnel.

#### 4.2.6 Programació de la placa Arduino

Bàsicament, **programarem l'Arduino per a que ens mostri en la pantalla LCD la força que estan rebent els sensors**. Com que aquests sensors no creen cap senyal per si mateixos (només disminueixen la seva resistència elèctrica), amb el controlador llegirem el voltatge que passa cap al pin de lectura, per tant, s'haurà de convertir aquesta senyal en una dada de força en Newtons que puguem llegir a la pantalla mitjançant les fórmules dels apartats 5.2.1 i 5.2.2.

Per a diferenciar les dades dels tres sensors, a la fila superior de la pantalla es podran veure les lletres **FR (Força de resistència)**, **FS (Força de sustentació)** i **CA (Càrrega aerodinàmica)** en Newtons (N) sobre els valors corresponents de força que obtenim dels sensors.

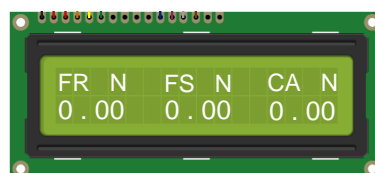


Figura 4.16 Text a la pantalla LCD. [Autor]

A més, col·locarem un polsador per iniciar i/o parar la lectura de dades. El potenciòmetre no intervé en la programació ja que és un mètode de calibració per "hardware" (a mesura que augmenta el valor de resistència del potenciòmetre, la força que apareix en pantalla s'apropa més a 0).

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Proposta de programació de la placa Arduino:

```
#include <LiquidCrystal.h> //incloure la llibreria per la pantalla LCD
LiquidCrystal lcd(2,3,4,8,9,10,11); //pins (RS, RW, E, D4, D5, D6, D7)

int sensorFR; //crear les variables
int sensorFS;
int sensorCA;
int forzaFR;
int forzaFS;
int forzaCA;
volatile int polsador=LOW;
volatile int estatp=0;
long timeCounter = 0;
void setup() {
    pinMode(5, INPUT_PULLUP); //iniciar el pin 5 amb resistència pel polsador
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(5), puls, RISING); //iniciar la interrupció
    lcd.begin(16, 2); //iniciar un LCD 16x02 (columna, fila)
    lcd.setCursor(0, 0); //posar cursor en coordenades (0,0)
    lcd.print("FR N FS N CA N"); //escriure en la pantalla
    lcd.noCursor();
}

void loop() {
    while (estatp==1){
        lcd.cursor();
        sensorFR=-47+50/(analogRead(A0)/1023); //lectura a resistència sensor FR
        sensorFS=-47+50/(analogRead(A1)/1023); //lectura a resistència sensor FS
        sensorCA=-47+50/(analogRead(A2)/1023); //lectura a resistència sensor FS
        forzaFR=pow(sensorFR/2.9535,1/-0.282); //resistència a força sensor FR
        forzaFS=pow(sensorFS/2.9535,1/-0.282); //resistència a força sensor FS
        forzaCA=pow(sensorCA/2.9535,1/-0.282); //resistència a força sensor CA
```

ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ  
D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

```
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(forzaFR); //unitat força sensor FR
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print(",");
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print(forzaFR/100); //decimals força sensor FR
    lcd.setCursor(6,1);
    lcd.print(forzaFS); //unitat força sensor FS
    lcd.setCursor(7,1);
    lcd.print(",");
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print(forzaFS/100); //decimals força sensor FS
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(forzaCA); //unitat força sensor CA
    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(",");
    lcd.setCursor(14,1);
    lcd.print(forzaCA/100); //decimals força sensor CA
    delay(200);
}
while (estatp==0) {
    lcd.setCursor(0,1); //pantalla sense prendre mesures
    lcd.print("0,00");
    lcd.setCursor(6,1);
    lcd.print("0,00");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print("0,00");
}
}
```

```
void puls() { //interrupció pulsador
    if (millis() > timeCounter + 150){ //evitar les falses activacions
```



ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ  
D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

```
timeCounter = millis();  
if (estatp==0){ //canvi estat (presa de dades: si, presa de dades: no)  
    estatp=1;  
}  
else {  
    estatp=0;  
}  
}  
}
```

El full de la programació optimitzada es troba a l'**Annex E: Full programació**

## 5 SISTEMA DE CONTROL I CALIBRATGE

---

### 5.1 CONTROL DEL VENTILADOR

Per a poder variar el règim de gir del ventilador i així poder canviar el seu cabal, s'utilitzarà un variador electrònic de velocitat, en el nostre cas monofàsic . Aquest aparell ve inclòs amb el ventilador. El fabricant Sodeca proporciona aquestes dades generals i el "datasheet" inclòs en els annexos (C):

- Velocitat ajustable mitjançant senyal 0-10 V o control automàtic PI integrat en el variador.
- Variador electrònic altament configurable amb 2 entrades analògiques. 2 entrades digitals. 1 sortida de relé i 1 sortida analògica o digital a seleccionar.
- Possibilitat de connexió a busos de camp MODBUS i CAN Open.
- Variador electrònic de fàcil instal·lació fora de la zona de treball. gràcies al seu carril DIN pot muntar-se en quadres de control minimitzant les connexions.
- Es subministra precablejat amb cable apantallat d'acord amb la directiva EMC 2014/30/UE.
- Disponibles amb entrada monofàsica 220-240 V 50/60 Hz (VSD1 / B) o trifàsica 380-415 V 50/60 Hz (VSD3 / B). Protecció estàndard IP20. protecció IP66 sota comanda.
- Temperatura de treball (VSD): -25 °C +50 °C.

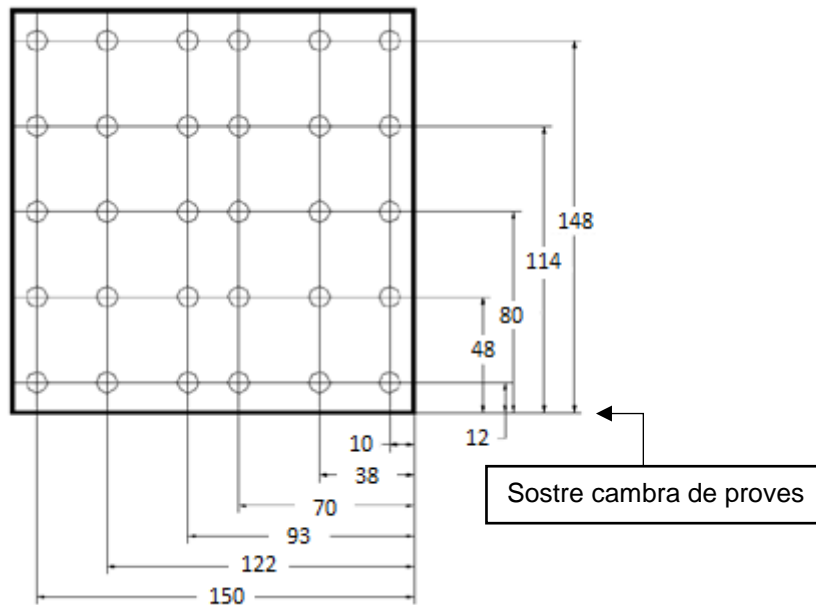
### 5.2 INSTRUMENTACIÓ DE CALIBRACIÓ

Per a poder realitzar mesures correctes amb el túnel de vent, necessitarem conèixer la velocitat del flux a la cambra de proves, respecte la velocitat de rotació del ventilador. Per conèixer la velocitat del flux hi ha dues formes principals, mitjançant un tub pitot o un anemòmetre tèrmic, com s'ha explicat en l'apartat 2.2.2.

En aquest cas, l'anemòmetre sembla millor opció, per la seva facilitat i rapidesa de la presa de mesures. També la dificultat del disseny de la cambra seria menor i és més econòmic que l'altra opció.

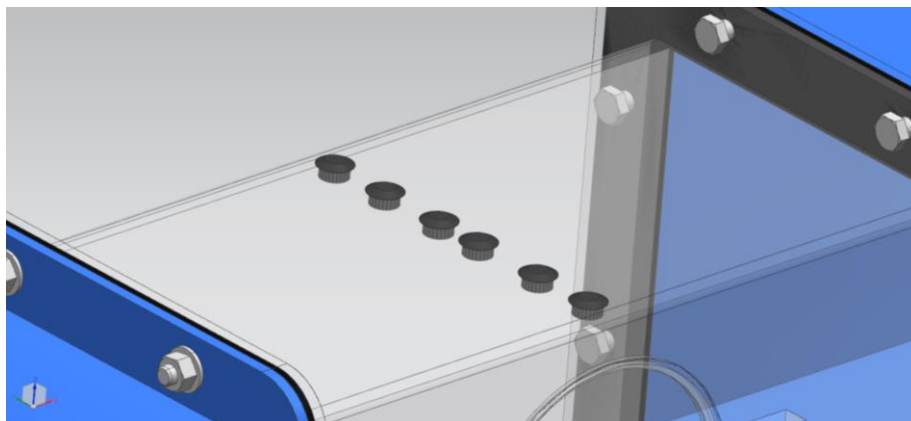
La majoria d'anemòmetres tèrmics tenen una tija allargable on se situa el fil sensor, d'aquesta manera es pot utilitzar la regla logarítmica de Tchebycheff explicada a l'apartat 2.2.3.2.

Els punts que s'haurien de mesurar per una precisa calibració són els següents:



**Figura 5.1** Punts de col·locació de l'anemòmetre tèrmic per a una precisa calibració (mm). [Autor]

En la cambra de proves, s'hauran de realitzar diversos forats a la part superior per poder introduir la tija de l'anemòmetre. A més, hauran de quedar tapats quan no s'estigui calibrant el túnel.



**Figura 5.2** Forats de calibració amb els taps. [Autor]

El diàmetre dels forats dependrà de les dimensions de la tija de l'anemòmetre. En aquest cas, són de 12 mm de diàmetre per al termo-anemòmetre PCE-423 (**Annex C**). Aquest aparell permet mesurar velocitats d'entre 0,1 i 25 m/s, amb una resolució de 0,01 m/s, té una tija que arriba fins els 1000 mm i es poden veure els resultats en la seva pantalla LCD.

## 6 ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES

En aquest apartat es recolliran les dades tècniques clau de cada element del túnel de vent que s'han utilitzat durant la realització dels càlculs de disseny.

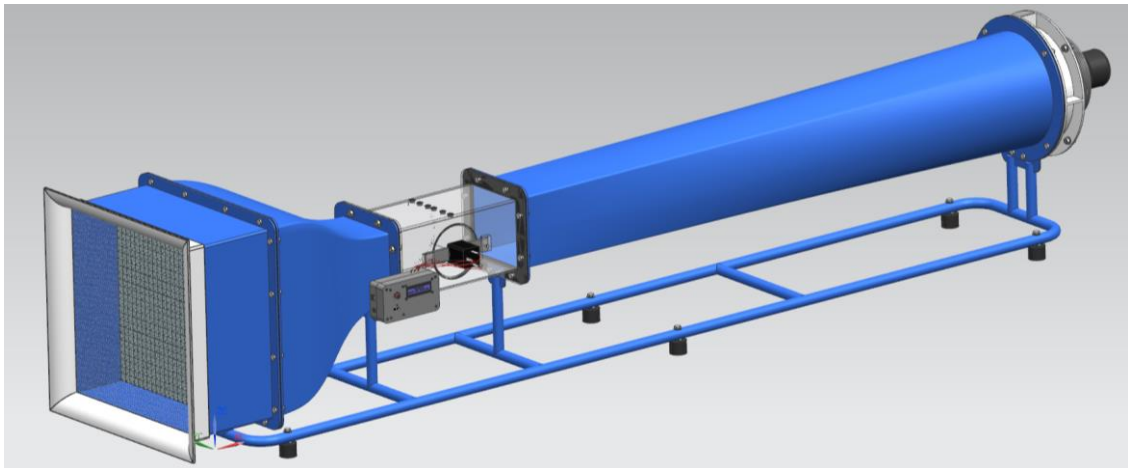


Figura 6.1 Túnel de vent proposat. [Autor]

### ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES

Especificacions generals	Valor	Unitats
Longitud total	2,819	m
Amplada total	0,528	m
Alçada total	0,61	m
Velocitat màxima de l'aire	25,5	m/s
Balança aerodinàmica	Digital	-
Connexió a PC (Software)	No	-
Anemòmetre	Si	-
Manòmetre	No	-
Visualització de flux	No	-
Nº de sensors	Baix (custom.)	-
Diversitat accessoris	Alt (custom.)	-

Taula 8. Especificacions tècniques del disseny del túnel de vent. [Autor]

<b>ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES</b>		
<b>Especificacions generals</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Banc amb taula de treball	No	-
Pes	50	kg
<b>Anell entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Gruix	88	mm
Radi de curvatura	22	mm
Diàmetre hidràulic <input type="checkbox"/>	440	mm
<b>Cambra ajustos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Longitud	220	mm
Diàmetre hidràulic <input type="checkbox"/>	440	mm
Relació L/Dh	0,5	-
<b>Malla estabilitzadora</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
$\beta$ (porositat)	0,64	-
Densitat del mallat	0,6	mm
Ample de cel·la <input type="checkbox"/>	3	mm
Alçada	441	mm
Amplada	441	mm
<b>Direccionador de flux</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Ample de cel·la <input type="checkbox"/>	15	mm
Gruix de les parets	1	mm
$\beta$ (porositat)	0,87	-
Longitud	90	mm
<b>Con de contracció</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Àrea entrada <input type="checkbox"/>	0,1936	m <sup>2</sup>
Àrea sortida <input type="checkbox"/>	0,0256	m <sup>2</sup>
Relació d'àrees entrada/sortida	7,56	-

Taula 8 Continuació. Especificacions tècniques del disseny del túnel de vent. [Autor]

<b>ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES</b>		
<b>Con de contracció</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Longitud	450	mm
<b>Cambra de proves</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Longitud	360	mm
Amplada <input type="checkbox"/>	160	mm
Alçada <input type="checkbox"/>	160	mm
<b>Difusor</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Diàmetre hidràulic entrada <input type="checkbox"/>	160	mm
Diàmetre sortida <input type="radio"/>	257	mm
Àrea entrada <input type="checkbox"/>	0,0256	m <sup>2</sup>
Àrea sortida <input type="radio"/>	0,0518	m <sup>2</sup>
Relació d'àrees sortida/entrada	2,03	-
Angle (eix horitzontal)	3,1	º
Longitud	1,5	m
<b>Ventilador</b>	<b>Valor</b>	<b>Unitats</b>
Velocitat de gir mínima	300	rpm
Velocitat de gir màxima	2850	rpm
Potència màxima	255	W
Cabal mínim	240	m <sup>3</sup> /h
Cabal màxim	2300	m <sup>3</sup> /h
Rendiment màxim	26	%

**Taula 8 Continuació.** Especificacions tècniques del disseny del túnel de vent. [Autor]

\*Els símbols  i  clarifiquen si la secció a la que es fa referència és quadrada o circular.

Les dimensions concretes de les diferents parts dissenyades del túnel de vent es poden trobar a l'**Annex B: Plànols**. Els manuals d'assemblatge, operació i manteniment són a l'**Annex A: Manuals**.

## 7 PRESSUPOST

Una vegada tenim totes les parts del túnel de vent definides, des de les parts mecàniques fins les electròniques. Cal realitzar un estudi del pressupost que es necessitaria per fabricar o comprar totes aquestes parts i analitzar la viabilitat econòmica de la proposta, comparant-ho amb les alternatives que hi ha al mercat.

### 7.1 COST DE FABRICACIÓ

<b>PRESSUPOST</b>				
<b>Parts Mecàniques</b>	<b>nº ut</b>	<b>Material</b>	<b>Cost [€]</b>	<b>Fabricant</b>
Cambra de proves***	1	Metacrilat	399,42	Ferplast
Difusor	1	Fibra de vidre	450	-
Con de contracció	1	Fibra de vidre	420	-
Cambra d'ajustos	1	Fibra de vidre	160	-
Malla	1	Acer	4,16	Bastimallas
Direccionador de flux	1	Fibra de vidre	300	-
Anell entrada	1	Fibra de vidre	200	-
Balança	1	PLA/ABS	4,23	Impressió 3D**
Banc	1	Alumini	500	-
Suport ventilador	1	Fibra de vidre	220	-
Junta tipus 1	2	Cautxú	80	-
Junta tipus 2	1	Cautxú	60	-
Junta tipus 3	1	Cautxú	40	-
Tap	6	PLA/ABS	0,66	Impressió 3D
<b>Subtotal PM:</b>			<b>2838,47</b>	
<b>Elements d'Unió i Altres (Mec.)</b>	<b>nº ut</b>	<b>Material</b>	<b>Cost [€]</b>	<b>Fabricant</b>
Cargol hex. rosca parcial M8x35	7	Acer	3,59	Leroy Merlín
Cargol hex. rosca total M8x25	44	Acer	15,03	Leroy Merlín
Cargol hex. rosca total M8x20	4	Acer	1,37	Leroy Merlín
Cargol hex. rosca total M4x16	2	Acer	0,69	Leroy Merlín
Femella M8*	49	Acer	-	Leroy Merlín
Volandera dura M8	49	Acer	3,5	Leroy Merlín
Volandera tova M8	12	Nylon	4,05	Leroy Merlín
Silentblock	6	Cautxú	29,91	RS Components
<b>Subtotal EUM:</b>			<b>58,14</b>	
<b>Elements Elèctrics i Electrònics</b>	<b>nº ut</b>	<b>Material</b>	<b>Cost [€]</b>	<b>Fabricant</b>
Ventilador + variador de velocitat	1	-	786,9	Sodeca
Placa Arduino Uno R3	1	-	23,95	PC Componentes

**Taula 9.** Pressupost dels materials i fabricació del túnel de vent proposat. [Autor]

ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

<b>PRESSUPOST</b>				
<b>Elements Elèctrics i Electrònics</b>	<b>nº ut</b>	<b>Material</b>	<b>Cost [€]</b>	<b>Fabricant</b>
Sensor RFP 602	3	-	17,97	Ebay
Amplificador operacional LM324	3	-	1,92	RS Components
Resistència 47 kΩ	3	-	0,45	RS Components
Pantalla LCD HD44770	1	-	1,82	Ebay
Potenciòmetre 100 kΩ	1	-	0,57	RS Components
Polsador	1	-	0,15	Ebay
Cablejat	3 m	-	1,17	RS Components
Connectors Faston	6	-	1,15	Ebay
Carregador 5V/2A + cable USB-Jack 2.1	1	-	12,99	Ebay
Anemòmetre PCE-423	1	-	145,9	PCE-Iberica
<b>Subtotal EEiE:</b>			<b>994,94</b>	
<b>Elements d'Unió i Altres (Electr.)</b>	<b>nº ut</b>	<b>Material</b>	<b>Cost [€]</b>	<b>Fabricant</b>
Caixa elements electrònics	1	PLA/ABS	2,99	Impressió 3D
Stickers	3	PVC	9,43	qustommize.com
Placa PCB	1	Coure	0,518	Ebay
Rodeta potenciòmetre	1	PLA/ABS	0,11	Impressió 3D
Cargol cilíndric rosca total M3x50	4	Acer	1,23	Ebay
Cargol cilíndric rosca total M3x16	12	Acer	1,29	Leroy Merlín
Femella M3*	16	Acer	-	Leroy Merlín
<b>Subtotal EUE:</b>			<b>15,568</b>	
<b>Cost d'assemblatge</b>	6h	-	<b>118,5</b>	-
<b>Honoraris del dissenyador</b>	10%	-	<b>390,71</b>	R.Inglés
<b>TOTAL:</b>			<b>4416,33</b>	

**Taula 9 Continuació.** Pressupost dels materials i fabricació del túnel de vent proposat. [Autor]

\*Femelles incloses en el preu dels cargols de la mateixa mètrica.

\*\*Cost del plàstic que caldria per fer la peça.

\*\*\*Inclou la porta de la balança (32,1 €).

**Els valors de la Taula 10 són aproximats, poden variar segons on es comprin les peces i segons la empresa que es contracti per fabricar les peces personalitzades.**

En el cas de les peces de fibra de vidre, el banc d'alumini i les juntes de cautxú:

Com que algunes empreses han sigut reticents a realitzar pressupostos a un estudiant, s'ha extrapolat un cost aproximat a partir del pressupost que ens ha fet una empresa de metacrilat per la cambra de proves. Tenint en compte que la cambra pesa 1,6 kg aproximadament, i que el preu d'una placa de metacrilat de 5 mm d'espessor ronda els 8 €/kg, el cost de materials per la cambra de proves hauria de ser de 12,8 €, sent el cost de fabricació 386 €. Agafaríem com a referència un cost de fabricació semblant, ja que no tenim altre font d'informació, tot i que els



# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

processos de fabricació són diferents. Depenent de la complexitat del material aplicarem un percentatge reductor (per exemple, 1 pel difusor i con de contracció per màxima complexitat i 0,4 per la cambra d'ajustos per menys complexitat).

Per calcular el preu del material de cada peça, tenint en compte el seu pes, se suposarà una combinació de 70% fibra de vidre i 30% resina de polièster, i que la fibra de vidre costa aproximadament 4 €/kg i la resina si es compra en grans quantitats pot costar fins 5 €/kg. En quan a les peces de cautxú, el seu cost hauria de ser semblant (superior per més complexitat i dimensions) al de la porta de la cambra de proves (32,1 €). El banc com que encara és més complex, tindria un cost superior al del difusor, la peça més cara de les de fibra de vidre.

El cost d'assemblatge són les hores de muntatge aproximades, multiplicat pel sou d'un tècnic (19,75 €/h) segons l'Institut d'Estadística de Catalunya [www.idescat.cat]. Els honoraris del dissenyador són un 10% del valor de les peces del túnel.

## 7.2 ALTERNATIVES EN EL MERCAT

### 7.2.1 Armfield C15

El C15-10 és un petit túnel de vent de sobretaula. L'aire és arrossegat a través de la secció de treball per un ventilador de velocitat variable situat a l'extrem de sortida del túnel. Es subministra amb connexió USB perquè pugui ser controlat des d'un PC.

Un sensor de pressió electrònic muntat a la paret de la secció de treball mesura la pressió estàtica, permetent calcular i visualitzar a l'ordinador la velocitat de l'aire. Els models i instruments opcionals requereixen l'ús d'un banc de manòmetres. Estan disponibles dues opcions, un manòmetre d'aigua de 13 tubs o un manòmetre electrònic de setze canals. Amb el manòmetre electrònic, les lectures i el registre de dades estan integrats amb el programari operatiu del túnel de vent. En el cas del manòmetre d'aigua, les lectures encara poden ser integrades i registrades, però cal introduir-les manualment a l'ordinador.

Es subministra una tapa transparent en material acrílic per a aquelles aplicacions que no utilitzen cap model, i aquesta tapa pot ser adaptada per l'usuari per a muntar models alternatius.



**Figura 7.1** Túnel aerodinàmic Armfield C15-10. [www.discoverarmfield.com]

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Especificacions:

- Dimensions totals: 2,25 x 0,7 x 0,45 (longitud x amplada x alçada) m
- Secció de prova quadrada, dimensions nominals 150 x 150 mm, longitud 455 mm
- Velocitat de l'aire a la secció de prova variable entre 0-34 m/s
- Cabal d'aire controlat per ordinador
- Software de recollida de dades
- Bancs de manòmetres d'aigua o electrònics
- Visualització de flux
- PVP: 27.704,16 € (22.896 € + IVA)

Especificacions completes a l' **Annex F: Túnel de vent del mercat.**

## 7.2.2 Armfield C2

El Armfield C2 és un túnel de vent de petites dimensions apte per laboratoris. Es subministra com a instal·lació autònoma completa muntada en rodes giratòries per facilitar el seu desplaçament. L'equip principal consta del túnel amb un sistema compensador de dos components i un indicador de la velocitat en l'aire.

La secció de prova paral·lela octagonal està fabricada en material acrílic transparent i pot ser retret sobre rails per permetre un accés sense obstruccions als models.

Les graduacions, en unitats de força, permeten la lectura directa de la sustentació i la resistència. El conjunt complet està connectat a un senzill amortidor d'oli. Els models es munten en el compensador dins de la secció de treball, i un transportador d'angles amb cursor permet canviar els angles d'incidència ràpidament i amb precisió amb el túnel en funcionament.

La precisió del túnel i la seva instrumentació també fan que sigui adequat per a treballs d'estudiants universitaris i projectes d'investigació senzills.



**Figura 7.2** Túnel aerodinàmic Armfield C2. [www.discoverarmfield.com]

## ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Especificacions:

- Dimensions totals: 2,98 x 0,8 x 1,83 (longitud x amplada x alçada)
- Secció de prova octogonal, dimensions nominals 304 x 304 mm, longitud 457 mm
- Velocitat de l'aire a la secció de prova variable entre 0-26 m/s
- Bancs de manòmetres d'aigua
- Visualització de flux
- Banc amb rodes
- PVP: 40.322,04 € (33.324 € + IVA)

Especificacions completes a l'**Annex F: Túnel de vent del mercat.**

### 7.2.3 Omega WTM-1000

El Omega WTM-1000 és un mini túnel de vent portable de menys de 10 kg. Té 4 velocitats de rotació (i velocitat de flux) fixes, però amb un potenciòmetre extern es pot variar amb més precisió. La cambra està habilitada per introduir-hi anemòmetres de fil calent o de ventilador.



**Figura 7.3** Mini túnel aerodinàmic Omega WTM-1000. [www.omega.es]

Especificacions:

- Dimensions totals: 0,685 x 0,203 x 0,292 (longitud x amplada x alçada)
- Secció de prova circular, diàmetre de 100 mm
- Velocitat de l'aire a la secció de prova: 2,5 m/s, 5 m/s, 10 m/s i 15 m/s
- PVP: 3.320 €

Especificacions completes a l'**Annex F: Túnel de vent del mercat.**

7.2.4 Comparativa

Característica	Armfield		Omega	Autor
	C15-10	C2	WTM-1000	Proposta TFG
<i>Longitud total</i>	2,25 m	2,98 m	0,685 m	2,819 m
<i>Amplada total</i>	0,7 m	0,8 m	0,203 m	0,528 m
<i>Alçada total</i>	0,45 m	1,83 m	0,292 m	0,61 m
<i>Longitud cambra proves</i>	455 mm	457 mm	-	360 mm
<i>Amplada cambra proves</i>	150 mm	304 mm	Ø100 mm	160 mm
<i>Alçada cambra proves</i>	150 mm	304 mm	Ø100 mm	160 mm
<i>Velocitat màxima de l'aire</i>	34 m/s	26 m/s	15 m/s	25,5 m/s
<i>Balança aerodinàmica</i>	Digital	Analògica	No	Digital
<i>Connexió a PC (Software)</i>	Si	No	No	No
<i>Anemòmetre</i>	Si	Si	Si	Si
<i>Manòmetre</i>	Si	Si	No	No
<i>Visualització de flux</i>	Si	Si	No	No
<i>Nº de sensors</i>	Mig	Mig	1 (anemòmetre)	Baix
<i>Diversitat accessoris</i>	Alt	Alt	Cap	Baix
<i>Banc amb taula de treball</i>	No	Si	No	No
<i>Pes</i>	220 kg	430 kg	8,2 kg	50 kg
<i>Preu</i>	27.704,16 €	40.322,04 €	3.320 €	4416,33 €

**Taula 10.** Comparativa del projecte amb algunes alternatives del mercat. [Autor]

Comparant les especificacions tècniques principals, a simple vista es pot observar que el túnel de vent proposat no té cap característica rellevant, però tampoc té cap característica dolenta.

Es quasi el més gran en dimensions totals, però amb una cambra de proves més petita que la del C2 (el més gran). La velocitat màxima és inferior a la dels seus competidors directes, els Armfield.

El principal avantatge respecte els Armfield és el baix pes i el preu, que **és poc menys de 10 vegades inferior al del Armfield C2**, el més car.

Per estar a l'altura dels túnels d'Armfield, s'hauria de millorar la balança, afegint sensors i altres accessoris que permetin ampliar el seu ús.

## 8 EXPERIMENTACIÓ AMB EL TÚNEL DE VENT

---

Els túnels de vent petits són utilitzats per a experimentació, són útils per predir comportaments en dispositius de formes similars a dimensions i velocitats més grans. També són molt útils per estudiar patrons de flux, i com aquests patrons poden ser afectats sota certes modificacions geomètriques.

El principal factor que determina la experimentació que es pot realitzar amb un túnel aerodinàmic en concret és la part electrònica de mesurament, depenent dels dispositius o sensors que disposi el túnel, es podran fer certs experiments, com el càlcul de forces (en el nostre cas), mesures de variacions de pressió, visualització del flux, etc.

### 8.1 METODOLOGIA BÀSICA DE LA EXPERIMENTACIÓ

**Definir clarament el problema i el seu propòsit.** Els resultats esperats han de tenir associats certa precisió, la qual és la mínima per aconseguir els objectius proposats. Aquesta precisió ha de ser part de la definició del problema.

**Tenir en compte experiències d'altres experiments realitzats i de les teories.** Aprendre dels experiments és un procés iteratiu. Usualment una sèrie d'experiments construïts un sobre un altre és el recurs més efectiu.

**Identificar clarament les variables** que sorgeixen de l'experiment, incloent els rangs dels paràmetres que poden brindar informació per resoldre el problema.

**Comparar els recursos necessaris i els disponibles.** Preparar una guia clara per conduir l'experiment.

A l'inici de l'experiment, **monitoritzar tots els processos i adquisició de dades.** Incloure avaluació de les precisions assolides en els mesuraments.

Realitzar un **anàlisi de dades per proveir avaluacions quantitatives de la precisió dels mesuraments obtinguts.** Aquesta informació ha de ser part del paquet de resultats aerodinàmics, per després definir el grau d'incertesa.

## 8.2 FACTORS A TENIR EN COMPTE PER REALITZAR PROVES AERODINÀMIQUES

**Verificar totes les corbes de calibratge d'equips**, sobretot dels sensors, abans durant i després de la prova. Sempre s'ha de calibrar d'acord al rang complet i usar sempre un nombre determinat de càrregues, no una sola càrrega assumint que el calibratge és lineal.

**Prendre suficients punts de mesurament**, així la pèrdua o la mala obtenció d'un punt no afecti la tendència o comportament de la corba de mesures o calibratge en qüestió.

**Repetir el punt zero** i inicial al final de l'execució. Assegurar-se que hi hagi un adequat balanceig entre mesures.

Assegurar-se que els **models** estiguin **correctament fabricats** si és possible emprar un model patró.

En experimentació amb models similars, realitzar **variacions en el model suficientment àmplies** perquè permeti realitzar interpolacions en comptes d'extrapolacions.

**Ser clar en totes les instruccions i presentació de dades**. Una correcta presentació de les dades pot permetre un millor enteniment dels resultats obtinguts

## 8.3 PRÀCTICA DE LABORATORI: MESURAMENT DELS COEFICIENTS DE RESISTÈNCIA, SUSTENTACIÓ

Abans de la realització de la pràctica, els professors hauran de calibrar l'equip mitjançant un anemòmetre de fil calent, trobant la velocitat de rotació del ventilador per cada velocitat de flux que voldran trobar els alumnes que realitzin la pràctica.

També hauran d'estar correctament calibrats els sensors, mostrant les mesures de força correctes.

Els diferents apartats de la pràctica proposada, que es troba a l'**Annex G**, són:

### 8.3.1 Introducció

Explicació bàsica sobre els túnels de vent i la experimentació amb models.

### 8.3.2 Instal·lació

Definició dels diferents elements de l'equip i especificacions tècniques.

### 8.3.3 Objectiu

Mesurar les variables que depèn el coeficient de resistència a l'avanç i la força de sustentació i comparar els resultats amb els diferents models.

### 8.3.4 Consideracions teòriques

- Resistència a l'avanç i força de sustentació teòrica de models.
- Teoria de la similitud, semblança dinàmica i estàtica.
- Anàlisi dimensional.

### 8.3.5 Metodologia experimental

Descripció dels passos a seguir per realitzar correctament la experimentació amb el túnel de vent. També s'inclouran les taules on es registraran les dades obtingudes amb la experimentació.

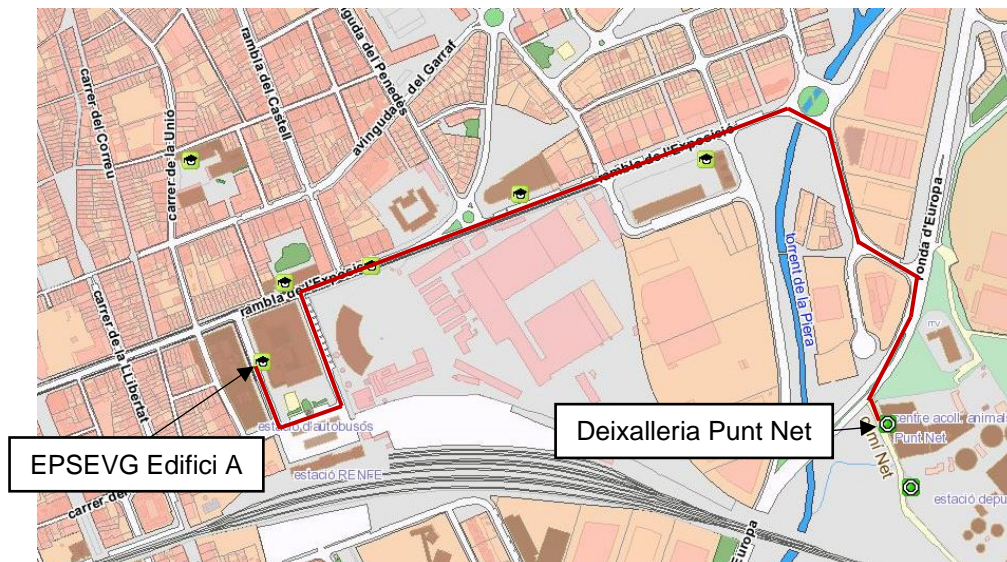
### 8.3.6 Resultats

Preguntes on els alumnes avaluaran els resultats obtinguts en l'experiment i hauran d'entregar en forma d'informe al professor per a corregir les seves respostes.

## 9 GESTIÓ DEL "END OF LIFE"

Una vegada finalitzi la seva vida útil (end of life), aquest túnel de vent esdevindrà un residu. Com que el formen diferents materials, per a una correcta gestió, s'hauran de separar les parts de cada material. Intentant que es reciclin les parts reciclables i gestionar de la millor forma possible les no reciclables.

Per aquest anàlisi es tindrà en compte que el túnel de vent s'utilitzarà a Vilanova i la Geltrú i el residu generat també es gestionarà en la mateixa zona. **Segons l'Agència de Residus de Catalunya, com que és un residu d'una institució que no es considera industrial (l'EPSEVG), es situa en la categoria de residus municipals.** La principal gestora de residus municipals de Vilanova i la Geltrú és la Deixalleria Punt Net, situada al a Ronda d'Europa 12, on gestionen molts tipus diferents de residus.



**Figura 9.1** Recorregut de l'Edifici A de la universitat fins la deixalleria. [Autor]

### Dies de servei i horaris:

- Del 2 de gener al 31 de desembre: de dilluns a dissabte de 10 a 19 hores.
- Festius sense servei: 1 de gener, dia de la Comparsa i 25 de desembre.

Els diferents elements del túnel, una vegada separats, s'hauran de llençar en la zona corresponent de la deixalleria. A més, s'ha de tenir en compte la quantitat de residu que es vol portar a la deixalleria, ja que en determinats tipus hi ha límits que poden ser per volum o per pes.

- Ferralla: sense límit
- Petits electrodomèstics (Grup A4 RAEE): sense límit
- Plàstics: sense límit



ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

- Vidre pla i laminat: sense límit
- Pneumàtics (cautxú): 4 unitats (pneumàtic sense llanta)\*

\*En el nostre cas, els elements de cautxú comptarien com menys d'un pneumàtic, per tant podríem dir que no tenim límit.

En la taula següent s'agrupen les parts del túnel de vent segons la zona on s'ha d'abocar:

<b>Gestió del End of Life</b>		
<b>Ferralla</b>	nº ud	Material
Malla	1	Acer
Banc	1	Alumini
Cargol hex. rosca parcial M8x35	7	Acer
Cargol hex. rosca total M8x25	44	Acer
Cargol hex. rosca total M8x20	4	Acer
Cargol hex. rosca total M4x16	2	Acer
Femella M8*	49	Acer
Volandera dura M8	49	Acer
Cablejat	3 m	Coure
Connectors Faston	6	Coure
Cargol cilíndric rosca total M3x50	4	Acer
Cargol cilíndric rosca total M3x16	12	Acer
Femella M3*	16	Acer
<b>Petits electrodomèstics (Grup A4 RAEE)</b>	nº ud	Material
Ventilador + variador de velocitat	1	Electrònic
Placa Arduino Uno R3	1	Electrònic
Sensor RFP 602	3	Electrònic
Amplificador operacional LM324	3	Electrònic
Resistència 10 kΩ	3	Electrònic
Pantalla LCD HD44770	1	Electrònic
Potenciòmetre 100 kΩ	1	Electrònic
Polsador	1	Electrònic
Carregador 5V/2A + cable USB-Jack 2.1	1	Electrònic
Anemòmetre PCE-423	1	Electrònic
Placa PCB	1	Coure
<b>Plàstics</b>	nº ud	Material
Cambra de proves	1	Metacrilat
Balança	1	PLA/ABS
Volandera tova M8	12	Nylon
Caixa elements electrònics	1	PLA/ABS
Stickers	3	PVC
<b>Taula 11.</b> Agrupació de les parts del túnel per zona de deixalla. [Autor]		

ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ  
D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

<b>Gestió del End of Life</b>		
<b>Plàstics</b>	nº ud	Material
Rodeta potenciòmetre	1	PLA/ABS
<b>Vidre (fibres)</b>	nº ud	Material
Difusor	1	Fibra de vidre
Con de contracció	1	Fibra de vidre
Cambrà d'ajustos	1	Fibra de vidre
Direccionador de flux	1	Fibra de vidre
Anell entrada	1	Fibra de vidre
Suport ventilador	1	Fibra de vidre
<b>Pneumàtics (cautxú)</b>	nº ud	Material
Junta tipus 1	2	Cautxú
Junta tipus 2	1	Cautxú
Junta tipus 3	1	Cautxú
Silentblock	6	Cautxú
<b>Taula 11 Continuació.</b> Agrupació de les parts del túnel per zona de deixalla. [Autor]		

Per a més informació, veure l'Annex H: Normes Deixalleria Punt Net.

## 10 LEGISLACIÓ

---

### 10.1 REQUISITS DE LES MÀQUINES

Les màquines han de complir, com a mínim, amb la legislació específica:

- Reial Decret: 1435/1992 - Màquines, components de seguretat. Marcat "CE".
- Reial Decret 56/1995 que modifica part del text del R.D. 1435/1992.
- RD 1644/2008 - Normes per a la comercialització i posada en servei de les màquines.
- Directiva 98/37/CE.
- Directiva 2006/42/CE.

La legislació anterior obliga el fabricant a certificar i "marcar", la màquina amb les inicials CE.

A més s'ha de redactar un certificat que es diu declaració de conformitat, en el qual es indica que el certificat respon a la legislació anteriorment esmentada.

Hem de tenir cura en verificar que el marcat es refereix a les condicions de seguretat en la màquina, ja que hi ha altres directives i reials decrets que obliguen a marcar amb CE per diferent motiu.

Nota: si la màquina es fabrica fora de la CE, el distribuïdor té l'obligació de certificar-ho. si la vam comprar directament, sense distribuïdor, haurem de procedir a la seva certificació.

En funció de l'any de fabricació de la màquina ens podem trobar amb les següents situacions:

- Màquina anterior a l'obligació de certificar, normalment any 1995, depèn del tipus de màquina.
- Màquina certificada segons Reial decret 1435/92 i modificacions.
- Màquina certificada segons Reial decret 1644/2008.

Hi ha una sèrie d'equips que malgrat que semblen casar amb la definició de màquina que es dona en el decret 1644-1608, es troben exclosos de l'aplicació del decret. aquests equips són equips de treball i estaran sotmesos a la legislació general d'equips de treball (o sigui el 1215-1997).

Entre la llista d'equips exclosos hi ha "les màquines especialment dissenyades i fabricades amb vista a la investigació per ús temporal en laboratoris", on se situaria el túnel de vent proposat en aquest treball, per tant, en àmbit legislatiu ens hauríem de fixar en el Reial Decret 1215/1997.

## 10.2 REIAL DECRET 1215/1997. DISPOSICIONS MÍNIMES DE SEGURETAT I DE SALUT

Tots els equips de treball han de complir amb el que exigeix el "Reial decret 1215/1997. Disposicions mínimes de seguretat i de salut". Aquesta és una responsabilitat de l'usuari, i independentment d'altres certificacions, l'usuari ha d'assegurar que compleix amb els requisits d'aquest Reial decret.

Aquesta verificació la pot realitzar el propi usuari, o bé contractar-la amb una empresa especialitzada, normalment una OCA.

### **Article 1. Objecte.**

1. Aquest Reial decret estableix, en el marc de la Llei 31/1995, de 8 de novembre, de prevenció de riscos laborals, les disposicions mínimes de seguretat i salut per a la utilització dels equips de treball emprats pels treballadors en la feina.

2. Les disposicions del Reial Decret 39/1997, de 17 de gener, pel qual s'aprova el Reglament dels serveis de prevenció, s'apliquen plenament al conjunt de l'àmbit que preveu l'apartat anterior, sense perjudici de les disposicions específiques que conté el present Reial decret.

### **Article 2. Definicions.**

A efectes d'aquest Reial decret s'entén per:

a) Equip de treball: qualsevol màquina, aparell, instrument o instal·lació utilitzat en el treball.

b) Utilització d'un equip de treball: qualsevol activitat referida a un equip de treball, tal com la posada en marxa o la detenció, l'ocupació, el transport, la reparació, la transformació, el manteniment i la conservació, inclosa, en particular, la neteja.

c) Zona perillosa: qualsevol zona situada a l'interior o al voltant d'un equip de treball en la qual la presència d'un treballador exposat comporti un risc per a la seva seguretat o per a la seva salut.

d) Treballador exposat: qualsevol treballador que es trobi total o parcialment en una zona perillosa.

e) Operador de l'equip: el treballador encarregat de la utilització d'un equip de treball.

### **Article 3. Obligacions generals de l'empresari.**

1. L'empresari ha d'adoptar les mesures necessàries perquè els equips de treball que es posin a

disposició dels treballadors siguin adequats al treball que hagin de fer i adaptats al mateix, de forma que garanteixin la seguretat i la salut dels treballadors en utilitzar aquests equips de treball. [...]

3. Per a l'aplicació de les disposicions mínimes de seguretat i salut previstes en el present Reial decret, l'empresari tindrà en compte els principis ergonòmics, especialment pel que fa al disseny del lloc de treball i la posició dels treballadors durant la utilització de l'equip de treball.

4. La utilització dels equips de treball ha de complir les condicions generals establertes a l'annex II d'aquest Reial decret.

Quan, a fi d'evitar o controlar un risc específic per a la seguretat o la salut dels treballadors, la utilització d'un equip de treball en unes condicions o formes determinades, que requereixin un particular coneixement per part d'aquells, l'empresari ha d'adoptar les mesures necessàries perquè la utilització d'aquest equip quedi reservada als treballadors designats per a això.

5. L'empresari ha d'adoptar les mesures necessàries perquè, mitjançant un manteniment adequat, els equips de treball es conservin durant tot el temps d'utilització en unes condicions que satisfacin les disposicions del segon paràgraf de l'apartat 1. El manteniment es realitzarà tenint en compte les instruccions del fabricant o, si no, les característiques d'aquests equips, les seves condicions d'utilització i qualsevol altra circumstància normal o excepcional que pugui influir en el seu deteriorament o desajust.

Les operacions de manteniment, reparació o transformació dels equips de treball la realització suposi un risc específic per als treballadors només podran ser encomanades al personal especialment capacitat per a això.

#### **Article 4. Comprovació dels equips de treball.**

1. L'empresari ha d'adoptar les mesures necessàries perquè els equips de treball la seguretat depengui de les seves condicions d'instal·lació se sotmetin a una comprovació inicial, després de la seva instal·lació i abans de la posada en marxa per primera vegada, i a una nova comprovació després de cada muntatge en un nou lloc o emplaçament, a fi d'assegurar la correcta instal·lació i el bon funcionament dels equips. [..]

3. Les comprovacions les ha de fer personal competent.

4. Els resultats de les comprovacions s'han de documentar i estar a disposició de l'autoritat laboral. Aquests resultats s'han de conservar durant tota la vida útil dels equips.

Quan els equips de treball s'utilitzin fora de l'empresa, hauran d'anar acompanyats d'una prova material de la realització de l'última comprovació. [...]

#### **Article 5. Obligacions en matèria de formació i informació.**

1. De conformitat amb els articles 18 i 19 de la Llei de Prevenció de Riscos Laborals, l'empresari ha de garantir que els treballadors i els representants dels treballadors rebin una formació i informació adequades sobre els riscos derivats de la utilització dels equips de treball, així com sobre les mesures de prevenció i protecció que hagin d'adoptar en aplicació d'aquest Reial decret.

2. La informació, subministrada preferentment per escrit, haurà de contenir, com a mínim, les indicacions relatives a:

a) Les condicions i forma correcta d'utilització dels equips de treball, tenint en compte les instruccions del fabricant, així com les situacions o formes d'utilització anormals i perilloses que puguin preveure.

b) Les conclusions que, si escau, es puguin obtenir de l'experiència adquirida en la utilització dels equips de treball.

c) Qualsevol altra informació d'utilitat preventiva.

La informació ha de ser comprensible per als treballadors als quals va dirigida i incloure o presentar-se en forma de fullets informatius quan sigui necessari pel seu volum o complexitat o per la utilització poc freqüent de l'equip. La documentació informativa facilitada pel fabricant estarà a disposició dels treballadors.

3. Igualment, s'informarà als treballadors sobre la necessitat de prestar atenció als riscos derivats dels equips de treball presents en el seu entorn de treball immediat, o de les modificacions introduïdes en els mateixos, encara que no els utilitzin directament. [...]

#### **ANNEX I Disposicions mínimes aplicables als equips de treball**

[...] Els sistemes de comandament han de ser segurs i escollir tenint en compte les possibles fallades, perturbacions i els requeriments previsibles, en les condicions d'ús previstes.

2. La posada en marxa d'un equip de treball només es podrà efectuar mitjançant una acció voluntària sobre un òrgan d'accionament previst a aquest efecte.

El mateix passarà per a la posada en marxa després d'una parada, sigui quina sigui la causa d'aquesta última, i per introduir una modificació important en les condicions de funcionament (per exemple, velocitat, pressió, etc.), excepte que aquesta posada en marxa o modificació no presenten cap risc per als treballadors exposats o són resultants de la seqüència normal d'un cicle automàtic.

3. Cada equip de treball haurà d'estar proveït d'un òrgan d'accionament que permeti la seva parada total en condicions de seguretat.

Cada lloc de treball ha de tenir un òrgan d'accionament que permeti aturar en funció dels riscos existents, o bé tot l'equip de treball o bé una part del mateix només, de manera que aquest equip quedi en situació de seguretat. L'ordre d'aturada de l'equip de treball tindrà prioritat sobre les ordres de posada en marxa. Un cop obtinguda la parada de l'equip de treball o dels seus elements perillosos, s'interromprà el subministrament d'energia dels òrgans d'accionament de què es tracti. [...]

8. Quan els elements mòbils d'un equip de treball puguin comportar riscos d'accident per contacte mecànic, hauran d'anar equipats amb resguards o dispositius que impedeixin l'accés a les zones perilloses o que detinguin les maniobres perilloses abans de l'accés a aquestes zones.

Els resguards i els dispositius de protecció:

a) Seran de fabricació sòlida i resistent.

b) No han de causar riscos suplementaris.

c) No s'han de poder anul·lar o posar-los fora de servei.

d) Han d'estar situats a suficient distància de la zona perillosa.

e) No han de limitar més de l'imprescindible o necessari l'observació del cicle de treball. [...]

16. Tot equip de treball haurà de ser adequat per protegir als treballadors exposats contra el risc de contacte directe o indirecte amb l'electricitat. En qualsevol cas, les parts elèctriques dels equips de treball s'han d'ajustar al que disposa la normativa específica corresponent.

17. Tot equip de treball que comporti riscos per soroll, vibracions o radiacions haurà de disposar de les proteccions o dispositius adequats per limitar, en la mesura del possible, la generació i propagació d'aquests agents físics. [...]

## **ANNEX II Disposicions relatives a la utilització dels equips de treball**

1. Els equips de treball s'han d'instal·lar, disposaran i utilitzaran de manera que es redueixin els riscos per als usuaris de l'equip i per als altres treballadors.

En el seu muntatge es tindrà en compte la necessitat de suficient espai lliure entre els elements mòbils dels equips de treball i els elements fixos o mòbils del seu entorn i que puguin

subministrar o retirar-se de manera segura les energies i substàncies utilitzades o produïdes pel equip.

2. Els treballadors han de poder accedir i romandre en condicions de seguretat en tots els llocs necessaris per a utilitzar, ajustar o mantenir els equips de treball.

3. Els equips de treball no s'han d'utilitzar de forma o en operacions o en condicions contraindicades pel fabricant. Tampoc podran utilitzar-se sense els elements de protecció previstos per a la realització de l'operació de què es tracti.

Els equips de treball només es poden utilitzar de forma o en operacions o en condicions no considerades pel fabricant si prèviament s'ha realitzat una avaluació dels riscos que això comportaria i s'han pres les mesures pertinents per a la seva eliminació o control.

4. Abans d'utilitzar un equip de treball es comprovarà que les seves proteccions i condicions d'ús són les adequades i que la seva connexió o posada en marxa no representa un perill per a tercers.

Els equips de treball deixaran d'utilitzar-se si es produeixen deterioraments, avaries o altres circumstàncies que comprometin la seguretat del seu funcionament. [...]

7. Els equips de treball han de ser instal·lats i utilitzats de manera que no puguin caure, bolcar o desplaçar-se de forma incontrolada, posant en perill la seguretat dels treballadors.

8. Els equips de treball no s'han de sotmetre a sobrecàrregues, sobrepressions, velocitats o tensions excessives que puguin posar en perill la seguretat del treballador que els utilitza o la de tercers.

13. El muntatge i desmuntatge dels equips de treball s'ha de fer de manera segura, especialment mitjançant el compliment de les instruccions del fabricant quan n'hi hagi.

14. Les operacions de manteniment, ajust, desbloqueig, revisió o reparació dels equips de treball que puguin suposar un perill per a la seguretat dels treballadors es realitzaran després d'haver parat o desconnectat l'equip [...].



### 10.3 CE DEL SISTEMA DE PROPULSIÓ

Cal destacar, que el sistema de propulsió emprat en el túnel de vent (ventilador, motor i variador de velocitat), segons el fabricant Sodeca, compleix la directiva CE.



**Figura 10.1** Logotip que demostra que el ventilador de Sodeca HEP/EW 25-2/H compleix amb la directiva CE. [Sodeca, Annex C]

## 11 AVALUACIÓ DE RISCOS

L'anàlisi de riscos és una part important d'un projecte, ja que permet trobar els punts febles del projecte en relació amb la seguretat dels actors que entrin en contacte amb el que s'ha projectat, reduint el màxim possible les probabilitats de que succeeixi qualsevol tipus d'incident més o menys greu.

Per a quantificar el nivell de risc, s'utilitzaran ds paràmetres, la possibilitat que succeeixi un incident i la magnitud de l'incident. Com a grau de magnitud es poden utilitzar números del 1 al 5: 1 molt baixa, 2 baixa, 3 mitjana, 4 alta i 5 molt alta. Com a grau de probabilitat també es poden utilitzar números del 1 al 5: 1 extremadament improbable, 2 molt improbable, 3 improbable, 4 probable i 5 bastant probable.

Per calcular el nivell, es multiplicitaran els graus dels factors (Nivell = Probabilitat x Magnitud), sent un nivell 1-10 un risc baix, 10-15 un risc moderat i 15-25 risc elevat.

Avaluació de riscos				
Assemblatge				
Codi	Risc	Probabilitat	Magnitud	Nivell
A01	Ferides superficials	2	1	2
A02	Afectacions musculars	1	2	2
A03	Electrocució	1	5	5
A04	Cremades	3	3	9
Ús				
Codi	Risc	Probabilitat	Magnitud	Nivell
U01	Ferides superficials	1	1	1
U02	Afectacions musculars	2	2	4
U03	Electrocució	1	4	4
U04	Afectacions oïda	2	4	8

**Taula 12.** Avaluació de riscos en el muntatge i ús del túnel de vent. [Autor]

- **A01** Durant el muntatge cap la possibilitat de fer-se alguna ferida superficial lleu ja que s'està treballant amb peces tant petites com voluminoses amb possibles cantons afilats.
- **A02** Alguns dels elements poden ser pesats, com per exemple el ventilador amb el motor o el banc, per tant, si no es realitzen moviments correctes, cap la possibilitat d'afectar la musculatura.
- **A03** Com que hi ha elements elèctric en el túnel de vent, i com que el motor del ventilador treballa amb un elevat voltatge i intensitat, existeix el risc d'electrocució, tot i que les possibilitats d'això durant el muntatge són pràcticament nul·les (hauria de realitzar-se un mal muntatge sense seguir les instruccions). Tot i així, una electrocució pot comportar conseqüències molt greus.

- **A04** Aquest cas depèn de la instrumentació electrònica que s'utilitzi, ja que en el cas proposat s'ha de soldar cablejat amb un soldador d'estany. Aquests aparells poden funcionar entre 200-500 °C depenent de l'estany que s'estigui utilitzant i de la qualitat de l'aparell. A més, la part que s'escalfa està al descobert. Les probabilitats de cremar-se són bastant altes per algú que no tingui massa experiència, tot i que les possibilitats de cremades greus són baixes.
- **U01** Durant l'ús també hi ha la possibilitat, encara que més baixa, de fer-se alguna ferida superficial ja que hi ha cargols al descobert i poden realitzar algun petit tall en un descuit. També seria possible fer-se mal amb el ventilador però aquesta possibilitat queda anul·lada amb la reixa de seguretat que té el mateix ventilador.
- **U02** Generalment durant el seu ús el túnel de vent romandrà quiet sobre una taula de treball, però si s'ha de moure de lloc per qualsevol raó, és un equip pesat i realitzant moviments incorrectes hi ha la possibilitat de fer-se mal en algun múscul.
- **U03** De la mateixa manera que en el muntatge, com que hi ha elements elèctric en el túnel de vent, i com que el motor del ventilador treballa amb un elevat voltatge i intensitat, existeix el risc d'electrocució, ja que aquests elements estan treballant; no obstant tots aquests elements estan protegits i tothom sap utilitzar aparells electrònics, per tant les possibilitats de que hi hagi una electrocució segueixen sent mínimes. Això si, una electrocució pot comportar conseqüències molt greus.
- **U04** Aquest és un risc especial dels túnels de vent oberts i més en concret els d'aspiració, ja que el ventilador axial treballa al final del túnel i produeix molt de soroll a alt règim de gir. El propi fabricant ens proporciona els nivells mínims i màxims de pressió sonora: 15-64 dB. Uns valors que situen aquest ventilador proper però sota el nivell màxim d'acceptabilitat que dona la Organització Mundial de la Salut (70 dB), un valor similar al d'una zona industrial comercial o amb molt de tràfic. Segons la OMS, escoltar aquest soroll durant un màxim de 24h pot provocar danys a l'oïda, no obstant, les situacions on s'utilitzarà el túnel de vent requeriran de poc temps, com a molt 2 hores, per tant, entra en un rang seguir per l'oïda dels usuaris (sense fer un ús excessiu).

Tenint en compte els resultats obtinguts, el túnel de vent se situa en un rang de risc baix, tot i que en cremades en el muntatge i en la contaminació acústica de l'ús s'apropa al risc moderat, estant 1 i 2 nivells per sota, respectivament.

En el primer cas, el muntatge (en concret la part de soldar) seria preferible que ho fes algú amb experiència, realitzant un millor i més segur treball. I en el segon cas (i en la resta també), s'hauran de seguir els procediments i recomanacions dels manuals de muntatge i ús.

S'ha de tenir en compte que aquest anàlisi pot ser molt subjectiu, sobretot essent un treball sense experimentació real.

## 12 CONCLUSIONS

---

S'ha dissenyat un túnel de vent per docència, apte per l'ús en el laboratori de la universitat, seguint les limitacions establertes al principi del projecte, que permet la realització de **proves aerodinàmiques en models a escala reduïda i realitzats amb impressores 3D** de fins 5,3 cm de diàmetre.

Per a realitzar aquest disseny, s'han complert els objectius fixats al principi del projecte, s'ha estudiat la teoria implicada en els túnels de vent i els diferents tipus de túnels que hi ha, amb els seus avantatges i inconvenients, escollint el que millor s'adaptava a les necessitats plantejades.

En quant al disseny, s'ha buscat trobar un flux de qualitat que permeti una correcta experimentació, seguint els paràmetres límit que estableixen els experts en la matèria (Barlow, J), i amb aquesta limitació de obtenir un **flux de qualitat** amb una certa velocitat especificada, s'ha buscat reduir les dimensions, el pes i, amb això, el cost.

Amb el disseny realitzat s'ha aconseguit:

- Millorar la velocitat de flux que s'havia fixat en un principi de 20 m/s a poc **més de 25 m/s**.
- **No sobrepassar els 3 metres de llargada**.
- Un **pes** de aproximadament **50 kg**, inferior al dels túnels equivalents comercials.
- Un **cost d'entre 6-9 vegades inferior** als túnels de vent comercials de característiques semblants.

Després de realitzar el disseny s'ha fet una simulació per a preveure aproximadament el comportament real del túnel i comparar amb els càlculs teòrics. A més, s'ha realitzat un pressupost i s'ha comparat amb les alternatives que hi ha al mercat. Finalment, per completar el projecte, s'ha elaborat un exemple de pràctica de laboratori, s'ha determinat la gestió del túnel com a residu, s'ha realitzat un anàlisi de riscos i els corresponents manuals de muntatge, ús i manteniment.

Tot i que, en l'apartat on es defineixen les limitacions del projecte, s'ha especificat que no es realitzaria un estudi exhaustiu de la part electrònica, és un punt a millorar del túnel proposat, deixant oberta una proposta de treball de fi de grau per un alumne d'electrònica que vulgui millorar els elements electrònics i ampliar el rang d'aplicacions del túnel proposat, utilitzant-lo com a base.

## 13 BIBLIOGRAFIA

---

[1] GONZÁLEZ-SANTANDER, J.L. Fundamentos de mecànica de fluidos. Alacant, Editorial Club Universitario, 2014, p.5-30.

Disponible en: <http://www.editorial-club-universitario.es/pdf/7632.pdf>

[2] CARBONELL, M. TEMA 2: Anàlisi dimensional i semblança. EPSEVG, 2016, p1-55.

[3] WILEY & SONS, J. Fundamentals of fluid mechanics. Mèxic DF, Editorial Limusa, 2005, p27-35 (Traduït)

[4] CHICAS, F. Diseño y construcción de un túnel de viento. El Salvador, Universidad Centroamericana "José Simeon Cañas", 2015, p6-90.

Disponible en: [http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis\\_descargables/tunel.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/tunel.pdf)

[5] GILES, R. Mecànica de los fluidos e hidràulica. Madrid, McGraw-Hill, 1994 , P321-322

[6] AGÜERA, J. Resistencia de flujos externos. 2012, p1-54.

Disponible en: [www.uco.es/termodinamica/](http://www.uco.es/termodinamica/)

[7] QUISPE, C,A., URCUHUARANGA W,J., CHIROQUE J,E. Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de Investigación de Física* 17, 2014, p1-10.

Disponible en: <http://www.rif-fisica.org/images/2/24/141701601.pdf>

[8] BARLOW, J. Low-speed tunnel testing. New York, Editorial John Wiley & Sons,1999 p1-300.

[9] MONGE-GAPPER, J,G. Concepto para un túnel de viento con vórtice variable. Vol. 8, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, 2015, p33-40.

Disponible en: [revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/download/21433/23795](http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/download/21433/23795)

[10] CORONEL, J,F., MARTÍN L. Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de transmisión de calor. Universidad de Sevilla, 2016, p9.

Disponible en: [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf)

[11] BERMEJO J,E., SIGUENCIA, D,F., SERPA, P,I. Diseño y construcción de un túnel de viento para anàlisi aerodinámico de vehículos a escala, Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, 2012, p56.

Disponible en: <http://www.rif-fisica.org/images/2/24/141701601.pdf>

[12] BOGOTÁ, M,G., ROLÓN, M,C. Validación del coeficiente de sustentación y arrastre para el perfil NACA 0012 en ANSYS® Fluent. Bogotá, Universidad de San Buenaventura, 2016, p1-4. Disponible en:

[http://www.academia.edu/24929717/Validaci%C3%B3n\\_del\\_coeficiente\\_de\\_sustentaci%C3%B3n\\_y\\_arrastre\\_para\\_el\\_perfil\\_NACA\\_0012\\_en\\_ANSYS\\_Fluent](http://www.academia.edu/24929717/Validaci%C3%B3n_del_coeficiente_de_sustentaci%C3%B3n_y_arrastre_para_el_perfil_NACA_0012_en_ANSYS_Fluent)

**Adreces web:**

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/viscosidad/viscosidad.htm> Pàgina web dedicada a la física. Consultada en: 03/2017.

[http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas\\_graficos.pdf](http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas_graficos.pdf) Universitat Tecnològica Nacional de Buenos Aires, Departament d'Enginyeria Civil. Consultada en: 03/2017.

<http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/> Revista online de Fòrmula 1. Consultada en: 03/2017.

<https://www.thingiverse.com/thing:239064> Plataforma social per compartir dissenys per elaborar en impressores 3D. Consultada en: 04/2017.

<https://www.thingiverse.com/thing:560767> Plataforma social per compartir dissenys per elaborar en impressores 3D. Consultada en: 04/2017.

<http://www.arduino.org/> Pàgina web de l'empresa creadora de la placa Arduino Uno. Consultada en: 04/2017.

<https://www.luisllamas.es/arduino-lcd-hitachi-hd44780/> Pàgina web amb explicacions de com programar la placa Arduino. Consultada en: 05/2017.

<http://discoverarmfield.com/es/products/view/c15/tunel-de-viento-controlado-por-ordenador> Pàgina web del fabricant d'equips de laboratori Armfield. Consultada en: 05/2017.

<http://discoverarmfield.com/es/products/view/c2/tunel-de-viento-subsonico> Pàgina web del fabricant d'equips de laboratori Armfield. Consultada en: 05/2017.

<http://es.omega.com/pptst/WTM-1000.html> Pàgina web del fabricant d'equips de laboratori Omega. Consultada en: 05/2017.

<http://www.ebay.com/itm/5-100g-RFP-602-Thin-Film-Pressure-Sensor-Force-Sensor-D10mm-x-L124mm-For-Arduino-/122575604372?hash=item1c8a134a94:g:Ki0AAOSwi8VZV1o-> Plataforma dedicada a la venda de productes. Consultada en: 05/2017.

<http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=398&lang=es> Institut d'Estadística de Catalunya. Consultada en: 07/2017.