



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# *Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques*

---

**MEMÒRIA PRESENTADA PER:**

*Alejandro De La Calle Salas*

**TUTORS:**

*Miguel Ángel Sellés Cantó*

*Samuel Sánchez Caballero*

**GRAU D'ENGINYERIA MECÀNICA**

Convocatòria de defensa: Setembre del 2021

## RESUM

### **Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques**

L'aerodinàmica és un camp d'estudi fonamental dins de la enginyeria mecànica: vehicles, aereaus, càrregues en edificis... En tots aquests casos és important tindre un bon coneixement de la dinàmica del aire, ja que un tractament correcte del fluid pot suposar una gran diferència a l'hora de realitzar els dissenys.

En aquest treball es vol realitzar el disseny complet d'un túnel de vent de tamany reduït per poder observar fenòmens aerodinàmics bàsics (turbulència, efecte sòl...), comprovar el funcionament de diversos instruments de mesura (tub de Pitot, mesuradors de pressió...), e inclús realitzar algun estudi aerodinàmic.

El túnel de vent serà de tipus obert, i amb càmera d'assajos tancada. Per a la verificació del disseny s'utilitzarà CFD, ferramenta molt bé assentada al món de la aerodinàmica.

**Paraules clau:** Túnel de vent, CFD, Instrumentació, Aerodinàmica, Efecte sòl

## **SUMMARY**

### **Design of a low speed wind tunnel for aerodynamic measurements**

Aerodynamics is a fundamental field of study for mechanical engineering: cars, aircraft, loads on buildings... In all these cases it's essential to have a good understanding of the behaviour of the wind, since a good control of the air may have a great impact when conducting the final design.

In this project, we aim to make the whole design of a small wind tunnel so we can be able to witness basic aerodynamic phenomena (turbulence, ground effect...), to check how different measurement instruments work (Pitot tube, pressure meters...), or even to carry out some aerodynamic tests.

This wind tunnel will be open-type, with a closed test section. CFD will be used to verify the reliability of the design, on account of its importance in aerodynamics.

**Keywords:** Wind Tunnel, CFD, Instrumentation, Aerodynamics, Ground Effect

## RESUMEN

### **Diseño de un túnel de viento de baja velocidad para mediciones aerodinámicas**

La aerodinámica es un campo de estudio fundamental dentro de la ingeniería mecánica: vehículos, aeronaves, cargas en edificios... En todos ellos es importante tener un buen conocimiento de la dinámica del aire, ya que un tratamiento correcto del fluido puede suponer una gran diferencia a la hora de realizar los diseños.

En este trabajo se persigue realizar el diseño completo de un túnel de viento de pequeño tamaño para poder observar fenómenos aerodinámicos básicos (turbulencia, efecto suelo...), comprobar el funcionamiento de instrumentos de medida (tubo de Pitot, medidores de presión...), e incluso realizar algún estudio aerodinámico.

El túnel de viento será de tipo abierto, y con cámara de ensayos cerrada. Para la verificación del diseño se empleará CFD, herramienta muy asentada en el mundo de la aerodinámica.

**Palabras clave:** Túnel de viento, CFD, Instrumentación, Aerodinámica, Efecto suelo

## Índex

1.	Introducció .....	11
1.1.	Antecedents .....	11
1.1.1.	Presentació .....	11
1.1.2.	Inicis i evolució del túnel de vent .....	14
1.1.3.	Exemples de túnels reals .....	18
1.2.	Motivació .....	23
2.	Objectius .....	24
2.1.	Objectiu general .....	24
2.2.	Objectius particulars .....	24
3.	Desenvolupament del treball .....	26
3.1.	Definició de característiques .....	26
3.2.	Teoria i càlculs inicials .....	27
3.2.1.	Termodinàmica .....	27
3.2.2.	Aerodinàmica .....	29
3.2.3.	Potència .....	35
3.3.	Disseny interior .....	38
3.3.1.	Fase 1. Disseny bàsic per parts .....	39
3.3.2.	Fase 2. Primera versió completa .....	62
3.3.3.	Fase 3. Versió interior definitiva .....	71
3.4.	Càlculs - predimensionat .....	82
3.4.1.	Suports .....	82
3.4.2.	Càlcul per mètodes finits – predimensionament .....	83
3.5.	Selecció de materials .....	87
3.5.1.	Cambra d'establiment, con, difusor, trompeta i suports .....	88
3.5.2.	Zona d'assajos .....	90
3.5.3.	Bresca .....	92
3.6.	Selecció de components .....	93
3.6.1.	Pantalles .....	93
3.6.2.	Bastidor .....	94
3.6.3.	Elements d'unió .....	99
3.6.4.	Ventilador .....	100
3.6.5.	Complements del ventilador .....	102
3.7.	Disseny de peces .....	105
3.7.1.	Cambra d'establiment .....	106

3.7.2.	Con de contracció.....	107
3.7.3.	Zona de proves llarga .....	108
3.7.4.	Zona de proves curta.....	111
3.7.5.	Transició de zona de proves a difusor .....	112
3.7.6.	Difusor .....	112
3.7.7.	Trompeta.....	113
3.7.8.	Suports .....	114
3.8.	Càlcul de resistència del túnel de vent.....	115
3.9.	Fabricació .....	120
3.10.	Pressupost.....	123
3.10.1.	Preu de peces .....	123
3.10.2.	Cost de fabricació .....	124
3.10.3.	Consum elèctric.....	125
3.10.4.	Resum.....	125
4.	Conclusions .....	126
	Bibliografia .....	127
	ANNEXOS .....	129
	Plànols .....	130

## Taula d'il·lustracions

IL·LUSTRACIÓ 1. RÈPLICA DEL TÚNEL DE VENT DELS GERMANS WRIGHT .....	11
IL·LUSTRACIÓ 2. TURBINA A ALEMANYA EN 1935 (ESQ.) I TURBINA ACTUAL DEL LANGLEY RESEARCH (DRETA) .....	12
IL·LUSTRACIÓ 3. TÚNEL DE VENT DE L'EQUIP RED BULL DE FÓRMULA 1 EN MILTON KEYNES, REGNE UNIT .....	12
IL·LUSTRACIÓ 4. ESQUEMA D'UN TÚNEL DE VENT NPL .....	13
IL·LUSTRACIÓ 5. ESQUEMA DE FUNCIONAMENT DEL BRAÇ DE BENJAMIN ROBINS.....	14
IL·LUSTRACIÓ 6. EL WRIGHT FLYER, PRIMER AVIÓ EXITÓS. KITTY HAWK, CAROLINA DEL NORD, EUA (1903).....	15
IL·LUSTRACIÓ 7. ELS GERMANS WRIGHT. WILBUR (ESQ.) I ORVILLE (DRETA) .....	15
IL·LUSTRACIÓ 8. DISTRIBUCIÓ EN PLANTA DE LA NAU D'ALEXANDRE GUSTAVE EIFFEL .....	16
IL·LUSTRACIÓ 9. ALEXANDRE GUSTAVE EIFFEL (ESQ.), LUDWIG PRANDTL (AL CENTRE), I OSBORNE REYNOLDS (DRETA) .....	16
IL·LUSTRACIÓ 10. AVIÓ BRITÀNIC DE LA RAF EN 1914 (ESQ.) I EN LA II GUERRA MUNDIAL (DRETA).....	17
IL·LUSTRACIÓ 11. TÚNEL NPL "DUPLEX" (1919).....	18
IL·LUSTRACIÓ 12. TÚNEL NPL D'AIRE COMPRIMIT (1930) .....	19
IL·LUSTRACIÓ 13. TÚNEL NPL DE BAIXA VELOCITAT (1947).....	20
IL·LUSTRACIÓ 14. TÚNEL DE L'INSTITUT INDI DE CIÈNCIES (1960).....	21
IL·LUSTRACIÓ 15. TÚNEL "BUFADOR" DEL LABORATORI D'ENGINYERIA DE LA UNIVERSITAT DE CAMBRIDGE .....	22
IL·LUSTRACIÓ 16. CONFIGURACIONS DE LA ZONA DE PROVES. D'ESQUERRA A DRETA, I DE DALT A BAIX: A, B, C D I E .....	40
IL·LUSTRACIÓ 17. GRUIX DE LA CAPA LÍMIT EN LES ZONES DE PROVES. MATEIX ORDRE QUE EN LA IL·LUSTRACIÓ 16. ....	41
IL·LUSTRACIÓ 18. DISSENY DE LA ZONA DE PROVES DE LA FASE 1 EN SOLIDWORKS: CROQUIS (DALT) I EXTRUSIÓ (BAIX) .....	42
IL·LUSTRACIÓ 19. DISSENYS DEL CON DE CONTRACCIÓ. D'ESQUERRA A DRETA: A, B, I C .....	43
IL·LUSTRACIÓ 20. DISSENYS DEL CON DE CONTRACCIÓ. D'ESQUERRA A DRETA: B1, B2, I B3 .....	43
IL·LUSTRACIÓ 21. DISSENYS DEL CON DE CONTRACCIÓ. D'ESQUERRA A DRETA: B3A, B3B, I B3C.....	44
IL·LUSTRACIÓ 22. MAPA DE VELOCITATS EN L'EIXIDA DELS CONS A, B, I C .....	45
IL·LUSTRACIÓ 23. VELOCITATS A L'EIXIDA DEL CON DE CONTRACCIÓ AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL.....	46
IL·LUSTRACIÓ 24. MAPA DE VELOCITATS A L'EIXIDA DELS CONS B1, B2, I B3 .....	47
IL·LUSTRACIÓ 25. VELOCITATS A L'EIXIDA DEL CON DE CONTRACCIÓ AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL.....	48
IL·LUSTRACIÓ 26. MAPA DE VELOCITATS A L'EIXIDA DELS CONS B3A, B3B, I B3C .....	49
IL·LUSTRACIÓ 27. VELOCITATS A L'EIXIDA DEL CON DE CONTRACCIÓ AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL.....	50
IL·LUSTRACIÓ 28. INTENSITAT DE TURBULÈNCIES A L'EIXIDA DEL CON DE CONTRACCIÓ AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL.....	50
IL·LUSTRACIÓ 29. DISSENY DE LA FASE 1 DE LA CAMBRA D'ESTABLIMENT .....	52
IL·LUSTRACIÓ 30. DISSENYS DEL DIFUSOR DE LA FASE 1. D'ESQUERRA A DRETA, I DE DALT A BAIX: A, B, C, D, E, I F.....	56
IL·LUSTRACIÓ 31. FLUX D'AIRE EN ELS DIFUSORS A, B, I C.....	57
IL·LUSTRACIÓ 32. FLUX D'AIRE EN ELS DIFUSORS D, E I F .....	58
IL·LUSTRACIÓ 33. GRÀFICA D'INTENSITAT DE TURBULÈNCIES A L'EIXIDA DEL DIFUSOR AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL DELS DIFUSORS A, B, I C.....	59
IL·LUSTRACIÓ 34. GRÀFICA D'INTENSITAT DE TURBULÈNCIES A L'EIXIDA DEL DIFUSOR AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL DELS DIFUSORS D, E, I F .....	60
IL·LUSTRACIÓ 35. DISSENY DEFINITIU DEL DIFUSOR PER A LA FASE 1 .....	61
IL·LUSTRACIÓ 36. TRANSICIÓ DE SECCIÓ CIRCULAR A RECTANGULAR PER A IMPLEMENTACIÓ EN EL CON DE CONTRACCIÓ.....	62
IL·LUSTRACIÓ 37. CON DE CONTRACCIÓ DE LA FASE 2 .....	63
IL·LUSTRACIÓ 38. DIFUSOR DE LA FASE 2 .....	63
IL·LUSTRACIÓ 39. MODEL INTERIOR COMPLET DEL TÚNEL PER A LA FASE 2 .....	64
IL·LUSTRACIÓ 40. MODELS DEL TÚNEL DE LA FASE 2, TALLATS EN UN QUART. DE DALT A BAIX: TÚNEL SENSE OBSTACLE, AMB OBSTACLE NORMAL, I AMB OBSTACLE GRAN .....	66
IL·LUSTRACIÓ 41. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE.....	67
IL·LUSTRACIÓ 42. FLUX D'AIRE EN EL TÚNEL SENSE OBSTACLE .....	67
IL·LUSTRACIÓ 43. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL AMB OBSTACLE NORMAL .....	68
IL·LUSTRACIÓ 44. FLUX D'AIRE DEL TÚNEL AMB OBSTACLE NORMAL .....	68
IL·LUSTRACIÓ 45. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL AMB OBSTACLE GRAN .....	69
IL·LUSTRACIÓ 46. FLUX D'AIRE DEL TÚNEL AMB OBSTACLE GRAN .....	69

IL·LUSTRACIÓ 47. REDISSENY DEL TÚNEL DE VENT PER A LA FASE 3 .....	71
IL·LUSTRACIÓ 48. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE.....	72
IL·LUSTRACIÓ 49. FLUX D'AIRE DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE.....	72
IL·LUSTRACIÓ 50. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL AMB OBSTACLE NORMAL.....	73
IL·LUSTRACIÓ 51. FLUX D'AIRE DEL TÚNEL AMB OBSTACLE NORMAL.....	73
IL·LUSTRACIÓ 52. MAPA DE VELOCITATS EN EL PLA YZ DEL TÚNEL AMB OBSTACLE GRAN .....	74
IL·LUSTRACIÓ 53. FLUX D'AIRE DEL TÚNEL AMB OBSTACLE GRAN .....	74
IL·LUSTRACIÓ 54. VARIACIÓ DE VELOCITATS (COLUMNA ESQUERRA) I INTENSITAT DE TURBULÈNCIES (COLUMNA DRETA) EN L'EIXIDA DEL DIFUSOR PER ALS TRES CASOS ESTUDIATS .....	75
IL·LUSTRACIÓ 55. PRIMER DISSENY REALISTA SOBRE LA BASE DEL DISSENY DE LA FASE 3.....	77
IL·LUSTRACIÓ 56. GRÀFICA DE VELOCITATS A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE, AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL .....	78
IL·LUSTRACIÓ 57. MAPA DE VELOCITATS A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE.....	78
IL·LUSTRACIÓ 58. GRÀFICA DE VARIACIÓ DE VELOCITATS A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL .....	79
IL·LUSTRACIÓ 59. MAPA DE VARIACIÓ VELOCITATS A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE.....	79
IL·LUSTRACIÓ 60. GRÀFICA D'INTENSITAT DE TURBULÈNCIES A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE, AL LLARG DE L'EIX TRANSVERSAL HORIZONTAL.....	80
IL·LUSTRACIÓ 61. MAPA D'INTENSITAT DE TURBULÈNCIES A LA MEITAT DE LA ZONA DE PROVES DEL TÚNEL SENSE OBSTACLE .	80
IL·LUSTRACIÓ 62. ESQUEMA INDICATIU DELS SUPORTS DEL TÚNEL DE VENT .....	82
IL·LUSTRACIÓ 63. MODEL DEL TÚNEL DE VENT PER A PREDIMENSIONAMENT. VERSIÓ NO DEFINITIVA.....	83
IL·LUSTRACIÓ 64. DEFORMACIONS EN EL PREDIMENSIONAMENT.....	84
IL·LUSTRACIÓ 65. DEFORMACIONS EN EL PREDIMENSIONAMENT, VISTA INFERIOR.....	84
IL·LUSTRACIÓ 66. TENSÍO EQUIVALENT DE VON MISES EN EL PREDIMENSIONAMENT.....	85
IL·LUSTRACIÓ 67. TENSÍO EQUIVALENT DE VON MISES EN EL PREDIMENSIONAMENT, VISTA INFERIOR.....	85
IL·LUSTRACIÓ 68. INSERCIÓ DE DADES EN EL CES EDUPACK .....	88
IL·LUSTRACIÓ 69. GRÀFICA DE MATERIALS: COST PER UNITAT DE RIGIDESA CONTRA LÍMIT DE FLUENCIA .....	89
IL·LUSTRACIÓ 70. INSERCIÓ DE DADES EN EL CES EDUPACK .....	90
IL·LUSTRACIÓ 71. GRÀFICA DE MATERIALS: COST PER UNITAT DE RESISTÈNCIA CONTRA LÍMIT DE FLUÈNCIA.....	91
IL·LUSTRACIÓ 72. GRÀFICA DE MATERIALS: COST PER VOLUM CONTRA LÍMIT DE FLUÈNCIA .....	92
IL·LUSTRACIÓ 73. DETALL DE LA MALLA SELECCIONADA PER A LES PANTALLES DE TURBULÈNCIA .....	93
IL·LUSTRACIÓ 74. ESQUEMA DEL DISSENY PREVI DEL BASTIDOR .....	94
IL·LUSTRACIÓ 75. MODELITZACIÓ COM A BIGA BISUPORTADA DE LA BARRA DEL BASTIDOR PER AL SUPORT B.....	95
IL·LUSTRACIÓ 76. DADES DEL PERFIL 40x40L DE BOSCH REXROTH.....	96
IL·LUSTRACIÓ 77. PERFIL 40x40L DE BOSCH REXROTH.....	97
IL·LUSTRACIÓ 78. DADES DEL PERFIL 45x45L DE BOSCH REXROTH.....	98
IL·LUSTRACIÓ 79. ELEMENTS D'UNIÓ: CARAGOLS, ROSQUES I VOLANDERES .....	99
IL·LUSTRACIÓ 80. VENTILADOR TCBT/4-710/H I CORBA CARACTERÍSTICA.....	100
IL·LUSTRACIÓ 81. PUNT DE FUNCIONAMENT DEL VENTILADOR.....	101
IL·LUSTRACIÓ 82. ESQUEMA DE L'ORDRE DE COL·LOCACIÓ DELS DIVERSOS ACCESSORIS DEL VENTILADOR.....	102
IL·LUSTRACIÓ 83. DEFENSES DEL VENTILADOR.....	102
IL·LUSTRACIÓ 84. ACOBLAMENT PER A BRIDES .....	103
IL·LUSTRACIÓ 85. BRIDA.....	103
IL·LUSTRACIÓ 86. SUPORT DEL VENTILADOR (SUPORT D) .....	104
IL·LUSTRACIÓ 87. EMBOCADURES.....	104
IL·LUSTRACIÓ 88. VISTA ISOMÈTRICA DEL DISSENY DEFINITIU DEL TÚNEL DE VENT .....	105
IL·LUSTRACIÓ 89. VISTA ISOMÈTRICA DE DETALL DE LA ZONA DE PROVES DEL DISSENY DEFINITIU DEL TÚNEL DE VENT .....	105
IL·LUSTRACIÓ 90. MARCS DE LA CAMBRA D'ESTABLIMENT. D'ESQUERRA A DRETA: MARC DE LA BRESCA, MARC SEPARADOR, I MARC PER A PANTALLES.....	106
IL·LUSTRACIÓ 91. CON DE CONTRACCIÓ.....	107
IL·LUSTRACIÓ 92. ZONA DE PROVES .....	108
IL·LUSTRACIÓ 93. PEÇA A DE LA ZONA DE PROVES.....	108
IL·LUSTRACIÓ 94. PEÇA B DE LA ZONA DE PROVES.....	109



## Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques

IL·LUSTRACIÓ 95. PEÇA C DE LA ZONA DE PROVES .....	109
IL·LUSTRACIÓ 96. PEÇA D DE LA ZONA DE PROVES.....	110
IL·LUSTRACIÓ 97. PEÇA E DE LA ZONA DE PROVES .....	110
IL·LUSTRACIÓ 98. ZONA DE PROVES CURTA.....	111
IL·LUSTRACIÓ 99. TRANSICIÓ DE LA ZONA DE PROVES AL DIFUSOR .....	112
IL·LUSTRACIÓ 100. DIFUSOR .....	112
IL·LUSTRACIÓ 101. TROMPETA .....	113
IL·LUSTRACIÓ 102. SUPORT A.....	114
IL·LUSTRACIÓ 103. SUPORTS B I C.....	114
IL·LUSTRACIÓ 104. EMMALLAT PER A L'ANÀLISI ESTRUCTURAL ESTÀTICA PER MÈTODES FINITS.....	116
IL·LUSTRACIÓ 105. DEFORMACIONS .....	117
IL·LUSTRACIÓ 106. DEFORMACIONS. VISTA LATERAL DE LA ZONA DE PROVES .....	117
IL·LUSTRACIÓ 107. TENSÍO EQUIVALENT DE VON MISES .....	118
IL·LUSTRACIÓ 108. TENSÍO EQUIVALENT DE VON MISES. VISTA LATERAL DE LA ZONA DE PROVES .....	118
IL·LUSTRACIÓ 109. FACTOR DE SEGURETAT.....	119
IL·LUSTRACIÓ 110. ETAPA 1 DE LA SELECCIÓ DE MATERIALS .....	120
IL·LUSTRACIÓ 111. ETAPA 2 DE LA SELECCIÓ DE MATERIALS .....	120
IL·LUSTRACIÓ 112. ETAPA 3 DE LA SELECCIÓ DE MATERIALS .....	120
IL·LUSTRACIÓ 113. GRÀFIC ESQUEMÀTIC DEL PROCÉS D'EMMOTLAMENT DE POLÍMERS .....	121

## Índex de taules

TAULA 1. REQUISITS BÀSICS DEL TÚNEL DE VENT .....	26
TAULA 2. PRESSIÓ I TEMPERATURA EN LA ZONA DE PROVES PER A UNA VELOCITAT DE 30 M/S - FLUX ISENTRÒPIC .....	28
TAULA 3. DENSITAT DE L'AIRE EN LA ZONA DE PROVES PER A UNA VELOCITAT DE 30 M/S - GAS IDEAL.....	28
TAULA 4. CLASSIFICACIÓ DE FLUXOS D'AIRE SEGONS LA SEUA VELOCITAT EN RELACIÓ A LA DEL SO .....	30
TAULA 5. EXEMPLES DE VELOCITATS A OBTINDRE EN EL TÚNEL AMB MAQUETES A ESCALA PER A REPLICAR EL CAS REAL .....	31
TAULA 6. ALTURA MÀXIMA RESPECTE A LA PARET DEL TÚNEL DE LA PRIMERA CAPA D'EMMALLAT.....	33
TAULA 7. COEFICIENT DE PÈRDUES DE LA ZONA DE PROVES I DEL CON.....	35
TAULA 8. COEFICIENT DE PÈRDUES DE LA BRESCA (K2H) I DE LES PANTALLES (K2P).....	36
TAULA 9. COEFICIENT DE PÈRDUES DEL DIFUSOR .....	36
TAULA 10. COEFICIENT DE PÈRDUES PER L'EIXIDA D'AIRE DE TORNADA A L'ENTORN.....	36
TAULA 11. RAÓ D'ENERGIES DEL TÚNEL DE VENT .....	37
TAULA 12. RESULTATS DE LA SIMULACIÓ DELS CONS A, B, I C.....	45
TAULA 13. RESULTATS DE LA SIMULACIÓ DELS CONS B1, B2, I B3.....	47
TAULA 14. RESULTATS DE LA SIMULACIÓ DELS CONS B3A, B3B, I B3C .....	49
TAULA 15. VARIABLES CARACTERÍSTIQUES DE LA PANTALLA IDEADA.....	54
TAULA 16. COEFICIENT DE PÈRDUES K DE LA PANTALLA IDEADA .....	54
TAULA 17. COEFICIENT DE PÈRDUES K DE LA BRESCA IDEADA.....	55
TAULA 18. RESULTATS DE LA SIMULACIÓ DELS DIFUSORS A, B, C, D, E, I F.....	60
TAULA 19. CARACTERÍSTIQUES DEL DISSENY DEL DIFUSOR DE LA FASE 1 .....	61
TAULA 20. DIMENSIONS DELS OBSTACLES INCLOSOS EN ELS MODELS.....	65
TAULA 21. SALT DE PRESSIONS I POTÈNCIA DE PÈRDUES DE LA SIMULACIÓ DE LA FASE 2 .....	70
TAULA 22. SALT DE PRESSIONS I POTÈNCIA DE PÈRDUES DE LA SIMULACIÓ DE LA FASE 3 .....	76
TAULA 23. REQUISITS DEL TÚNEL DE VENT.....	77
TAULA 24. PESOS DE CADA PART DEL TÚNEL DE VENT .....	82
TAULA 25. MATERIALS PER A LA SIMULACIÓ DE PREDIMENSIONAMENT .....	83
TAULA 26. CÀRREGUES COL·LOCADES PER A LA SIMULACIÓ DE PREDIMENSIONAMENT .....	83
TAULA 27. MATERIALS CANDIDATS PER AL SEU ÚS EN EL TÚNEL DE VENT .....	89
TAULA 28. MATERIALS CANDIDATS PER A LA ZONA DE PROVES.....	91
TAULA 29. GRANDÀRIES DE BRESQUES CANDIDATS .....	92
TAULA 30. CÀRREGUES COL·LOCADES PER A LA SIMULACIÓ DEL CÀLCUL DE RESISTÈNCIA .....	115
TAULA 31. REACCIONS EN I DELS QUATRE SUPORTS.....	119
TAULA 32. MÈTODES DE FABRICACIÓ CANDIDATS .....	121
TAULA 33. PREU DE PECES .....	123
TAULA 34. PREU DELS MATERIALS .....	124
TAULA 35. COST DELS PROCESSOS DE FABRICACIÓ DE LES PECES.....	124
TAULA 36. COST D'OPERACIÓ PER CONSUM ELÈCTRIC .....	125
TAULA 37. RESUM DE COSTOS .....	125

## 1. Introducció

### 1.1. Antecedents

#### 1.1.1. Presentació

Un túnel de vent es defineix com un tub de gran magnitud l'objectiu del qual és replicar la interacció entre l'aire i un cos. L'ús de túnels de vent per a l'anàlisi de flux ha sigut fonamental des del primer dia en què es va entendre que l'aire amagava un gran potencial per al desenvolupament de l'home. Des que els germans Wright aconseguiren realitzar el primer vol amb avió a principis del segle XX, la necessitat d'analitzar el comportament de l'aire d'una forma senzilla va continuar augmentant. Aquest és el gran avantatge que presenta un túnel de vent enfront d'un assaig real: el poder realitzar proves sense haver de desplaçar-se, o haver de córrer el risc de patir un accident. Gràcies a aquestes construccions, s'ha pogut avançar de gran manera en l'enteniment de la mecànica de fluids, amb aplicacions que van des dels cotxes als avions, passant pel comportament d'edificis a les càrregues de vent.



*Il·lustració 1. Rèplica del túnel de vent dels germans Wright*

Durant la dècada dels 70 i els 80, conforme la informàtica començava a assentar la seua importància, un gran nombre de científics pronosticaven la fi dels túnels de vent en uns pocs anys en favor de les simulacions informàtiques, tan prompte com s'obtinguera un poder computacional suficient; no obstant això, ben entrats en el segle XXI, els túnels de vent no poden ser més imprescindibles per a qualsevol mena d'estudi aerodinàmic. La dinàmica de fluids computacional, CFD en anglés, ha realitzat grans avanços i té els seus avantatges, com es tractarà també en el present treball, però continua empal·lidint davant la fidelitat i precisió que un túnel de vent pot oferir.



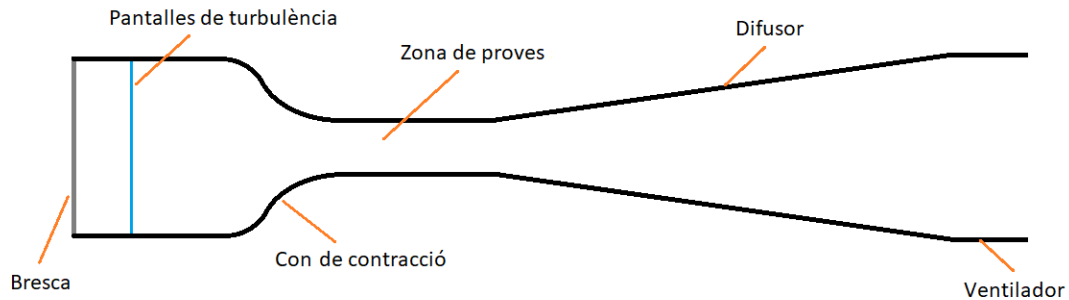
*Il·lustració 2. Turbina a Alemanya en 1935 (esq.) i turbina actual del Langley Research (dreta)*

Com s'ha comentat, els usos dels túnels de vent són múltiples: disseny d'una ala d'avió que maximitze la sustentació, estudi de la capa límit, reducció de la resistència a l'aire d'un vehicle, anàlisi d'ones de xoc, comportament aeroelàstic d'estructures i components, transmissió de calor i ventilació... Es podria continuar fins a abastar quasi qualsevol objecte que trobem en la nostra vida quotidiana. Per a poder dur a terme aquestes proves, encara que se solen utilitzar models a escala en nombroses ocasions, les dimensions de la instal·lació són considerables, motiu pel qual la majoria de túnels de hui dia tenen un edifici construït específicament per al seu ús.



*Il·lustració 3. Túnel de vent de l'equip Red Bull de Fórmula 1 en Milton Keynes, Regne Unit*

No obstant això, un túnel de tanta magnitud no és ni rendible ni necessari. Amb túnels més xicotets, que poden caber en una habitació o un laboratori qualssevol, es poden realitzar anàlisis molt interessants de qualsevol tipus. Aquest treball té per objectiu el disseny d'un d'aquests túnels, de grandària reduïda, multifuncional, que siga fàcil de manipular i que servisca per a l'enteniment de l'aerodinàmica, sense necessitar la precisió que aconseguix un túnel de grans dimensions. Aquest serà de retorn obert ja que, per a aquestes grandàries, un túnel tancat augmenta considerablement la complexitat i el cost. Les parts d'un túnel d'aquest estil són les següents:

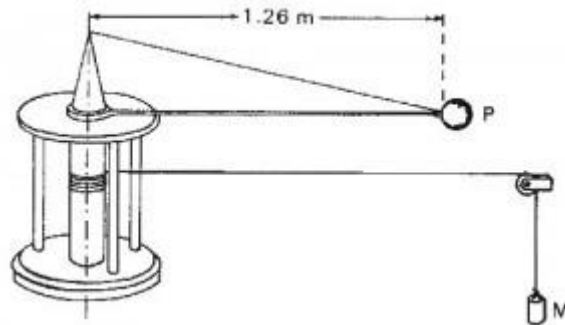


*Il·lustració 4. Esquema d'un túnel de vent NPL*

L'aire és aspirat pel ventilador, que està al final del túnel. Després, entra a la cambra d'establiment, primer passant per una bresca de xicotetes cel·les i després per una o més pantalles de control de turbulència; l'objectiu és aconseguir un flux el més net de vòrtex possible. Després d'això, passa pel con de contracció per a accelerar-se fins a la zona de proves o de test, on es duen a terme els assajos. Després d'això, l'aire redueix a poc a poc la seua velocitat en el difusor, fins a arribar al ventilador, i tornar a eixir a l'exterior.

### 1.1.2. Inicis i evolució del túnel de vent

Els túnels de vent, lluny del que puga semblar, tenen molta història. Remuntant-nos al segle XIII, l'enginyer britànic Benjamin Robins va idear una espècie de braç rotatori amb el qual poder estudiar la resistència aerodinàmica d'alguns objectes. Aquest braç era simplement una vara ancorada a un eix sobre el qual donava voltes, obtenint així una velocitat lineal amb la qual estudiar el flux. Sir George Cayley també va emprar un braç similar per a estudiar perfils alars, igual que Otto Lilienthal, qui va estudiar l'efecte de diversos angles d'atac amb el mateix sistema.



Il·lustració 5. Esquema de funcionament del braç de Benjamin Robins

No obstant això, és evident les manques d'aquesta construcció. Un braç giratori no produeix un flux d'aire estable, uniforme, i que abast l'objecte de manera normal a aquest. Les forces centrífugues, i el fet d'estar circulant l'objecte darrere del seu propi deixant, fan de l'estudi una tasca àrdua i imprecisa.

No va ser fins a 1871, quan Francis Herbert Wenham, membre de l'*Aeronautical Society of Great Britain*, hui coneguda com a RAF, va idear el primer túnel de vent modern. Va ser a partir d'aquest moment quan l'estudi de l'aire va començar a augmentar, i en poc temps es van aconseguir grans avanços, com l'enteniment dels efectes de la relació d'aspecte, atribuït a Wenham i al seu company John Browning. També es van realitzar construccions de túnels de vent innovadores. Konstantin Tsiolkovsky va construir el primer túnel de vent de secció oberta i amb ventilador centrífug en 1897, i li va servir per a obtenir els coeficients de resistència aerodinàmica de plaques planes, cilindres i esferes. L'inventor danès Poul la Cour, va aprofitar els túnels de vent per a desenvolupar turbines de vent, i més tard Carl Rickard Nyberg va emprar un per a dissenyar el *Fiugan*, un dels primers intents realistes d'avió de motor.

Sens dubte, un dels majors genis de l'aerodinàmica, que va avançar de gran manera en l'estudi de la matèria, va ser Osborne Reynolds. A ell es deu el número que porta el seu cognom, fonamental per a entendre la similitud dinàmica.

En 1901, els germans Wright van aconseguir construir el primer avió capaç de realitzar un vol exitós en tota la història, posant la primera pedra per a aconseguir transformar la manera de viatjar pel món, i avançar en el procés de globalització.



*Il·lustració 6. El Wright Flyer, primer avió exitós. Kitty Hawk, Carolina del Nord, EUA (1903)*

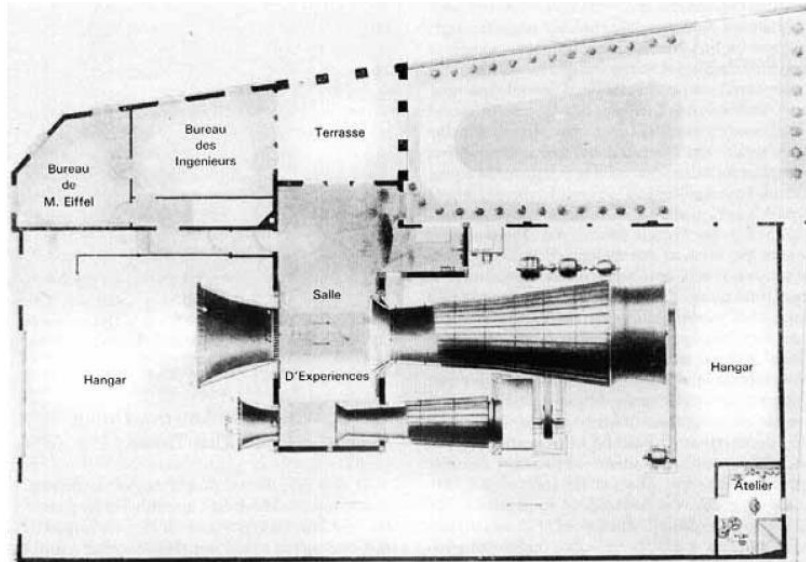
Res d'això podria haver sigut possible sense l'ús d'un túnel de vent, per a poder replicar casos reals i poder millorar la tecnologia: ni Reynolds hauria aconseguit establir el seu famós número, ni els germans Wright haurien aconseguit un avió capaç de volar.



*Il·lustració 7. Els germans Wright. Wilbur (esq.) i Orville (dreta)*

En 1909, Alexandre Gustave Eiffel, mundialment conegut per ser el dissenyador de la parisenca Torre Eiffel, va construir un túnel de vent de retorn obert amb un ventilador de 50 kW de potència. Durant els tres següents anys, va realitzar més de 4.000 proves, establint una forma de treball i experimentació que va crear els estàndards pels quals es regirien posteriorment els estudis aeronàutics. Però no va ser la seua única aportació, ja que va millorar en gran manera el disseny i l'eficiència dels túnels de vent, afegint bresques d'abella per a adreçar el flux, una forma

acampanada a l'entrada, una zona de proves oberta, un difusor, i la col·locació del ventilador aigües avall. Aquesta disposició va crear escola; tal és així, que hui dia no han variat en forma tant com les modificacions que Eiffel va introduir.



*Il·lustració 8. Distribució en planta de la nau d'Alexandre Gustave Eiffel*

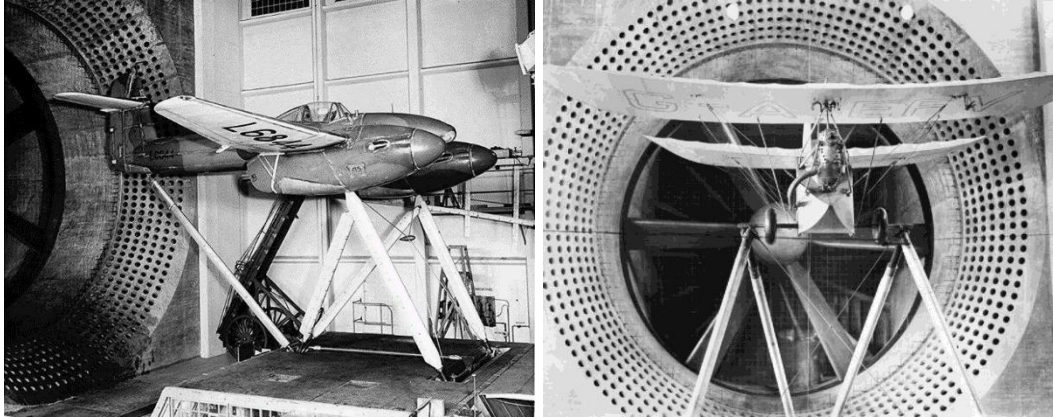
No es pot deixar de costat a Ludwig Prandtl, qui durant el primer terç del segle XX va avançar en l'estudi de les ones de xoc supersòniques i dels fenòmens de compressibilitat, que li van permetre crear les primeres toveres per a aconseguir velocitats de vent que superaren la barrera del so. Així doncs, va aconseguir crear els primers túnels de vent supersònics de tal forma que, hui dia, es continuen basant en les creacions de Prandtl.



*Il·lustració 9. Alexandre Gustave Eiffel (esq.), Ludwig Prandtl (al centre), i Osborne Reynolds (dreta)*



Durant el segle XX van tindre lloc dues guerres mundials, que van ser les primeres en les quals es van usar avions per a combatre amb els exèrcits, unint-se a la infanteria i la marina. La seua importància estratègica va obligar els països bel·ligerants a dedicar esforços d'investigació per a tindre els millors aeroplans, per la qual cosa els túnels de vent van continuar augmentant la seua importància i millorant la seua tecnologia. Cada vegada es construïen més grans, més potents, i de millor qualitat.



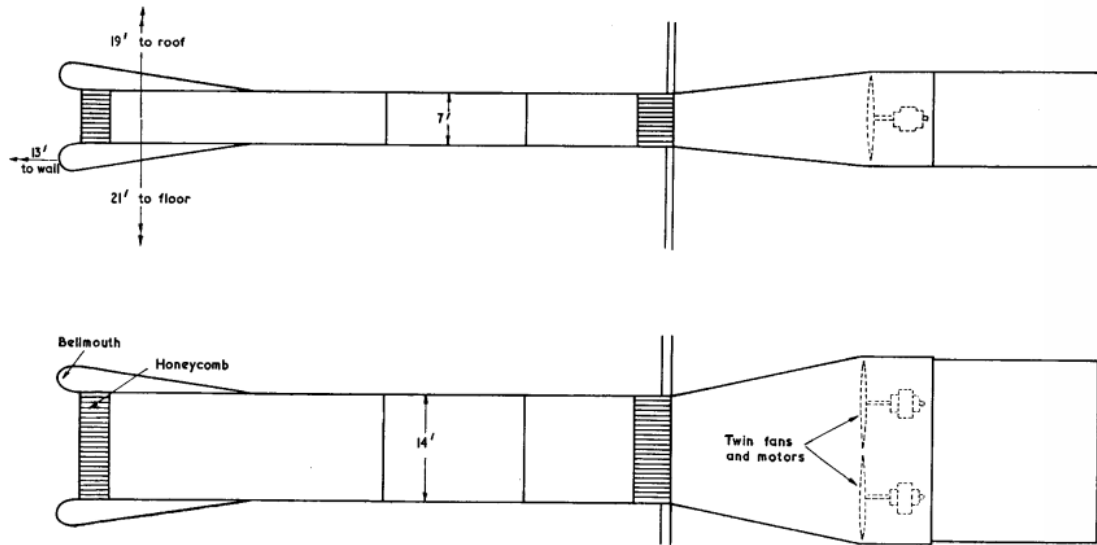
*Il·lustració 10. Avió britànic de la RAF en 1914 (esq.) i en la II Guerra Mundial (dreta)*

Més tard, s'aconseguiria construir el primer caça capaç de trencar la barrera del so, i més endavant encara, durant la carrera espacial, també es van emprar en el desenvolupament de coets, permetent analitzar fluxos hipersònics.

Hui dia existeixen multitud de tipus de túnels, segons la seua geometria, el seu ús, la seua grandària... però el que queda clar és que continuen sent imprescindibles. Al llarg del segle XX han permés avançar en l'enteniment de la dinàmica de fluids de manera exhaustiva, permetent la creació dels primers avions, i canviant així la forma en la qual el món funciona, connectant llocs remots, millorant l'eficiència energètica, augmentant la solidesa de les estructures front al vent, i fins i tot permetent que l'home conquerisca l'espai. Un túnel de vent és, per dir-ho així, una clau mestra: aquell instrument que ha permés a l'home domar l'aire.

### 1.1.3. Exemples de túnels reals

#### Túnel NPL "Duplex" (1919)



Il·lustració 11. Túnel NPL "Duplex" (1919)

Aquest túnel de tipus NPL, de ja fa més d'un segle, mostra una disposició constructiva similar a la de hui dia: Ventilador aigües avall, difusor, i bresca a l'entrada. No obstant això, no hi ha un con de contracció, per la qual cosa hi ha moltes pèrdues per fricció pel fet que gran part del túnel té un diàmetre molt xicotet. També presenta una bresca després de la zona de proves, cosa que no se sol emprar hui dia. A més, hi ha dos ventiladors en lloc d'un; en l'actualitat es tracta d'una opció encara emprada en alguns túnels. La col·locació dels dos ventiladors, no obstant això, obliga a fer un difusor amb una expansió més agressiva horitzontalment que verticalment, i fa que hi haja uns espais sense cobrir per les aspes en la zona intermèdia.

### Túnel NPL d'aire comprimit (1930)

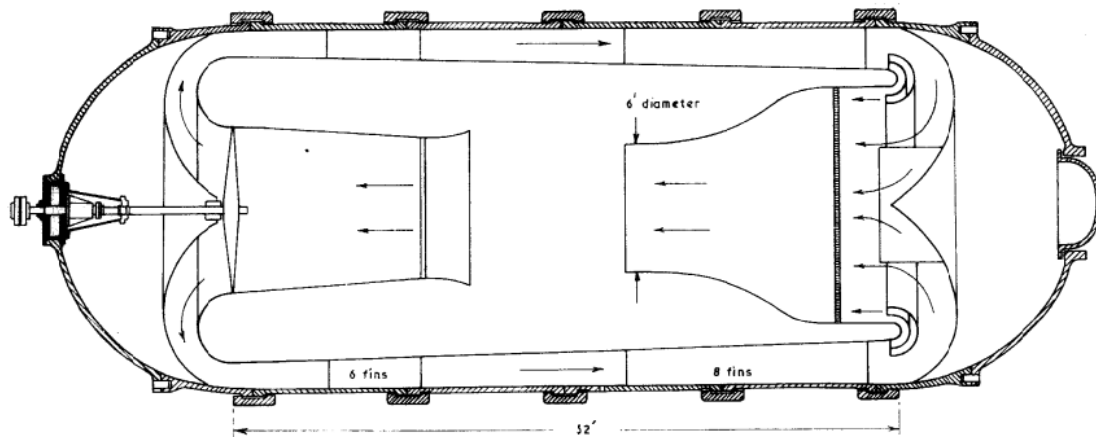


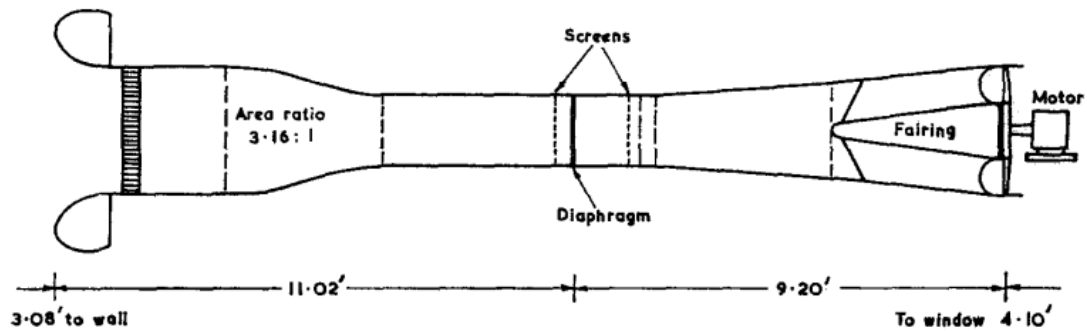
FIG. 10. NPL compressed-air tunnel (1930).

*Il·lustració 12. Túnel NPL d'aire comprimit (1930)*

Aquest túnel de 1930 d'aire comprimit és una espècie d'híbrid entre un tancat i un altre obert. La disposició interna s'assembla a un túnel tancat, ja que té conductes de retorn. No obstant això, és d'una grandària reduïda, i els canals no són propis d'un túnel tancat: per a poder ser un túnel tancat, l'estructura externa hauria de ser els propis conductes, no com en aquest cas, en el qual l'exterior és la carcassa que manté la pressió dins.

El principal avantatge d'un túnel de vent que empraria aire comprimit és poder aconseguir números de Reynolds més semblants a la realitat. El número de Reynolds és el principal paràmetre de semblança dinàmica entre dos casos, i és directament proporcional a la grandària, a la densitat de l'aire i a la velocitat. Usualment, els túnels de vent han d'emprar models a escala reduïda, per la qual cosa han d'augmentar la velocitat dins del túnel per a mantenir el número de Reynolds del cas real. No obstant això, si per exemple es vol recrear un cas real a 200 km/h amb un model a escala 1:3, la velocitat dins del túnel hauria de ser de 600 km/h, valor difícil d'aconseguir i que exigeix molta potència. L'opció que empraven aquests túnels és modificar la densitat per mitjà d'una compressió. Així, a una pressió de 3 atmosferes, mantenint els 200 km/h dins del túnel, el número de Reynolds seria el mateix que en la realitat. Per tant, és una opció que facilita tècnicament l'aconseguir una bona recreació de la realitat, sense haver de recórrer a grans desemborsaments.

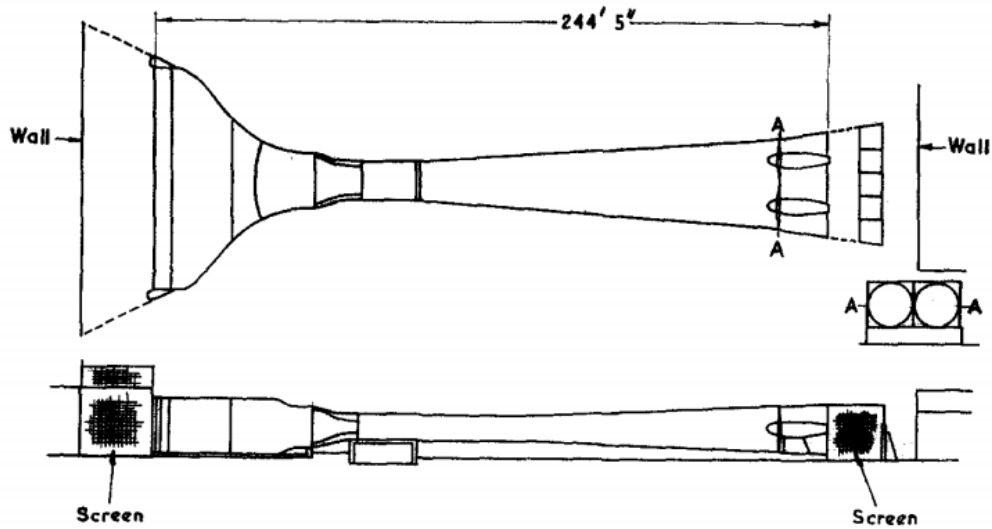
Túnel NPL de baixa velocitat (1947)



Il·lustració 13. Túnel NPL de baixa velocitat (1947)

En comparació amb el primer túnel mostrat, aquest presenta un parell de diferències que l'acosten més a l'actualitat. En primer lloc, emprava un con de contracció que permet reduir les pèrdues per fregament, a més d'evitar el creixement de la capa límit. D'altra banda, emprava un únic ventilador, que s'adequa millor a la geometria circular del difusor. També emprava pantalles de control de turbulències, però les col·loca en la pròpia secció de la zona de test, per la qual cosa produeixen majors pèrdues, i no s'aprofita al complet el seu efecte d'homogeneïtzació de la distribució de velocitats.

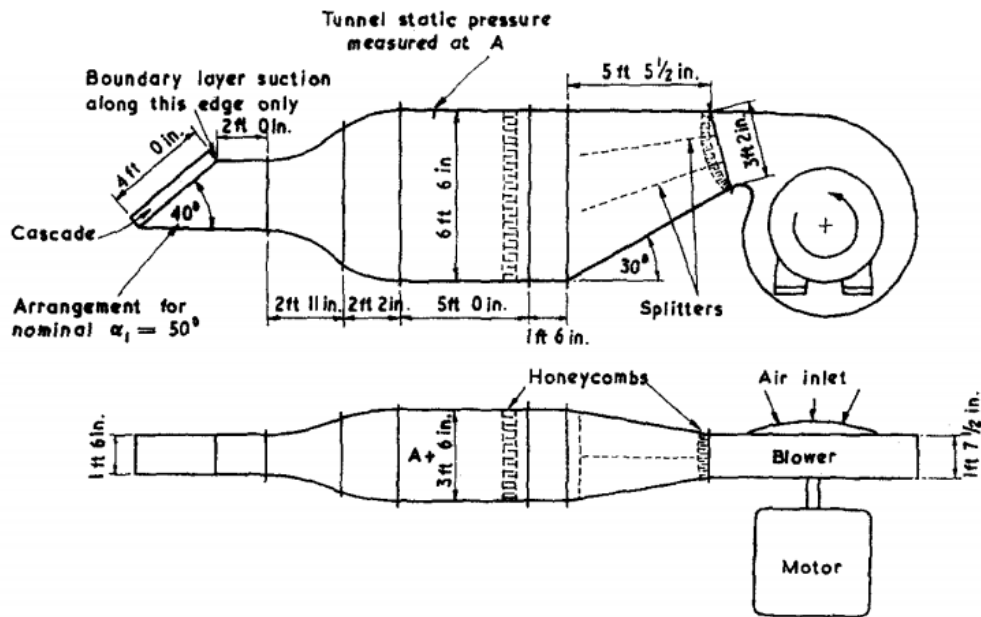
Túnel de l'Institut Indi de Ciències (1960)



Il·lustració 14. Túnel de l'Institut Indi de Ciències (1960)

Aquest túnel torna a emprar dos ventiladors, al igual que el primer, com es pot veure en la secció transversal. La principal diferència respecte a la resta és que només presenta una gran contracció en l'eix horitzontal, mentre que en l'eix vertical la secció es manté quasi constant. Aquest tipus de contracció s'empra hui dia per a túnels específics per a l'estudi de la capa límit; no obstant això, per a un túnel normal és preferible una contracció homogènia en totes les direccions.

Túnel bufador de la Universitat de Cambridge (1951)



Il·lustració 15. Túnel "bufador" del laboratori d'enginyeria de la Universitat de Cambridge

Aquest túnel és també de tipus obert, però és substancialment diferent a la resta: es tracta d'un túnel "bufador". La principal diferència és que el ventilador es troba aigües amunt, sent típicament centrífug. Aquesta disposició se sol emprar per a aconseguir velocitats més altes en la zona de proves, pel fet que aquest tipus de ventiladors permeten arribar a elles més fàcilment. No obstant això, les pèrdues són també majors, i la qualitat de l'aire és pitjor, ja que el ventilador "l'embruta" al introduir turbulències en ell.

Pel que fa a l'estructura pròpia d'aquest túnel, es pot veure una cambra d'establiment amb pantalles i bresques, a diferència de túnels anteriors que els incloïen en la pròpia zona de proves. D'altra banda, no presenta difusor, cosa característica d'aquesta mena de túnels: l'aire es retorna a l'exterior just després de la zona de proves. No obstant això, aquest fet perjudica encara més al rendiment del túnel; retornar l'aire a tanta velocitat genera moltes pèrdues, sempre és convenient emprar un difusor de, almenys, una relació d'expansió de 2.

## 1.2. Motivació

Un dels objectius que m'he plantejat al estudiar enginyeria, és poder acostar-me més al món de la competició. En concret, hi ha dues disciplines que sempre m'han cridat l'atenció: els motors, i l'aerodinàmica. El treball de fi de grau és, sens dubte, l'ocasió perfecta per a aprofundir els meus coneixements en elles.

Havent de triar, he decidit que el coneixement de l'aerodinàmica és un poc més difícil de veure en un enginyer mecànic, en comparació amb el món dels motors: hi ha diverses assignatures relacionades en la carrera, com són termodinàmica, màquines tèrmiques, motors... i fins i tot la UPV és reconeguda internacionalment pel CMT. És per això que l'aerodinàmica es converteix en un coneixement diferencial que no és fàcil d'adquirir pel propi currículum del grau, i que tinc l'oportunitat d'aprendre pel meu propi compte.

Dins de l'aerodinàmica i, buscant una relació amb els automòbils, hi ha diversos temes que podria haver triat: efecte sòl, anàlisi de perfils alars, de vehicles, i un llarg etcètera. No obstant això, l'aerodinàmica deu el seu gran avanç actual a un element de molta importància: el túnel de vent. És a través d'ell pel qual grans figures com Osborne Reynolds o Ludwig Prandtl van aconseguir avançar en el seu estudi i, sens dubte, és el principal instrument que s'empra en la Fórmula 1 per a millorar el rendiment dels monoplaques, per grans enginyers com Adrian Newey o Rory Byrne. Per descomptat, aquest tema reuneix tots els requisits que jo buscava.

A més, el propi fet de dissenyar un túnel de vent, que també siga factible construir per al seu ús en la universitat, pot permetre al propi campus d'Alcoi un major acostament a l'aerodinàmica. Des del seu ús en assignatures per a observar diversos fenòmens, a fins i tot poder realitzar investigació en ell, em propose dissenyar un túnel de vent funcional que no sols em permeta a mi millorar els meus coneixements, sinó que també pugui ser d'utilitat a la resta d'alumnes, professors i investigadors i, per què no, iniciar una cultura de l'aerodinàmica al nostre campus.

## 2. Objectius

### 2.1. Objectiu general

L'objectiu del present treball és el disseny d'un túnel de vent obert, que siga funcional i tinga una qualitat suficient com per a ser emprat per al seu ús dins de la universitat, ja siga amb finalitats educatius o, fins i tot, per a la investigació.

### 2.2. Objectius particulars

En les següents línies es definiran els objectius específics per a aquest túnel de vent.

#### Geometria

1. Retorn obert i cambra tancada (Tipus NPL).
2. Grandària reduïda, que pugui cabre en una sala qualsevol. Per prendre un exemple, que ocupe un espai similar a un torn, o una injectora de plàstics, com les que es troben en la planta baixa de l'edifici de Carbonell de l'EPSA.
3. Seguint amb la grandària, es desitja que el túnel siga capaç de provar maquetes de vehicles almenys d'escala 1:20.
4. Ha de tindre una estructura modular, que permeti fer canvis i millores *a posteriori*, per a mantindre-ho actualitzat al llarg del temps.
5. És preferible que tinga una geometria que no presenti una gran dificultat de fabricació, però sempre prevalent la qualitat del túnel.

#### Preu

1. Ha de tindre un cost reduït, assimilable pel departament d'Enginyeria mecànica i materials, per a una possible construcció en el futur.
2. El cost d'operació no ha de superar el de cap màquina típica (torn, fresadora, etc), és a dir, la potència del ventilador ha de ser moderada, sota els 5 kW.

#### Ús

1. Ha de ser útil per a l'observació de fenòmens aerodinàmics, i és desitjable que siga útil també per a la investigació.
2. Es desitja aconseguir a màxima potència una velocitat del flux d'aire en la cambra d'assajos d'uns 100 km/h, és a dir, entre 25 i 30 m/s. El túnel és, per tant, subsònic.
3. Ha de ser versàtil, de manera que permeti un rang de velocitats de funcionament ampli: des de 0, fins al màxim.
4. Que siga fàcilment muntable i desmuntable.
5. Que siga fàcil de guardar, sense que ocupe massa espai, aprofitant que està format per peces principalment de formes còniques buides –com si d'apilar gots es tractara–.
6. Fàcil de posar en marxa, de manipular, de recollir dades, etc.
7. Que siga plenament funcional, que assegure una bona qualitat de l'aire.



## Materials

1. Han d'emprar-se materials comuns en l'àmbit de l'enginyeria, que no siguin difícils d'adquirir, o que tinguen preus alts.
2. Es requereix que la cambra o zona d'assajos siga completament transparent, i que tinga una bona accessibilitat a l'interior.

## Instrumentació

1. S'ha de dotar d'espai a la zona d'assajos per a albergar la instrumentació bàsica necessària per a poder realitzar experiments.

### 3. Desenvolupament del treball

#### 3.1. Definició de característiques

##### Aerodinàmica

El túnel de vent es dissenyarà per al seu cas més desfavorable, és a dir, en el punt de màxima potència. Els objectius i requisits són els següents:

*Taula 1. Requisits bàsics del túnel de vent*

Velocitat en la zona de proves	30 m/s
Turbulència en la zona de proves	<1%
Variació màxima de velocitat en la zona de proves	<1%
Ample de model màxim permès	10 cm

El túnel ha de permetre provar models de vehicles d'una escala de 1:20 almenys, per la qual cosa l'ample del model màxim ha de ser d'uns 10 cm. Les condicions de l'aire seran d'1 atmosfera de pressió a 25°C.

##### Resistència

El túnel de vent ha de poder resistir una sèrie de càrregues, que s'exposen a continuació:

- Resistència general: Ha de suportar una càrrega de 5 kg en la zona de proves. Aquest valor és arbitrari, tenint en compte que la instrumentació i els models emprats no arribaran a superar aquest valor en cap cas. El coeficient de seguretat mínim serà de 10.
- Resistència de la bancada: S'empraran perfils metàl·lics per a poder mantindre el túnel en una altura correcta. El coeficient de seguretat mínim serà de 4; és menor que l'anterior, ja que són elements més simples, sense concentradors de tensions o geometries que facen a l'estructura tan crítica.
- Rigidesa: Des del punt de vista de l'aerodinàmica, és fonamental mantindre la forma de l'interior del túnel. Per a assegurar que es manté, es posa un límit de deformació màxima d'1 mm sota les condicions de càrrega descrites en el punt de resistència general.

### 3.2. Teoria i càlculs inicials

#### 3.2.1. Termodinàmica

L'aire pot considerar-se en aquest problema com un gas ideal i compressible. A més, l'entropia es pot considerar també invariable, per la qual cosa el flux és isentròpic. Les fórmules que caracteritzen aquest tipus de flux són les següents:

- Equació dels gasos ideals

$$p = \rho RT$$

(1)

on,

$p$  = Pressió estàtica (Pa)

$\rho$  = Densitat ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$T$  = Temperatura (K)

$R$  = Constant dels gasos ideals per a l'aire ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

- Relació entre pressió, volum, volum específic i temperatura

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} = cte$$

(2)

on,

$V$  = Volum ( $\text{m}^3$ )

$v$  = Volum específic ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$\gamma$  = Coeficient de dilatació adiabàtica

- Relació entre coeficient adiabàtic i la  $R$  del gas

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad R = C_p - C_v$$

(3a i 3b)

on,

$C_p$  = Calor específica a pressió constant ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

$C_v$  = Calor específica a volum constant ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

És necessari conèixer aquestes fórmules per a tindre una idea clara de com es comporta la pressió i la temperatura dins del túnel. Seguint-les, es pot veure que contràriament al que puga semblar, en accelerar-se el flux en la zona de test es produeix una expansió, per la qual cosa la pressió i la temperatura disminueixen respecte als valors fora del túnel. Això té dues implicacions: d'una banda, una depressió generarà una càrrega extra en les peces; per una altra, el número de Reynolds (que es veurà en el següent apartat), es pot veure afectat per una variació de la densitat, que és un paràmetre dependent de la pressió i la temperatura.

Per al càlcul de la pressió, s'empra la fórmula (2), coneixent a més els valors de l'aire circumdant. En la següent taula es resumeixen dades i resultats, per al cas de màxima velocitat de disseny:

Taula 2. Pressió i temperatura en la zona de proves per a una velocitat de 30 m/s - Flux isentròpic

Variable	Dades				Resultats	
	p1 (bar)	T1 (°C)	$\gamma$	Vel. (m/s)	p2 (bar)	T2 (°C)
Valor	1'01325	25	1'4	30	1'00805	24'56

Si a més apliquem l'equació dels gasos ideals (1), es pot obtenir la densitat. També es pot calcular fent la inversa del volum específic a través de la fórmula (2).

Taula 3. Densitat de l'aire en la zona de proves per a una velocitat de 30 m/s - Gas ideal

Variable	Dades				Resultat
	$\rho_1$ (kg/m <sup>3</sup> )	p2 (bar)	R (J/kg·K)	T2 (°C)	$\rho_2$ (kg/m <sup>3</sup> )
Valor	1'0500	1'00805	287'71	24'56	1'0431

Com es pot veure, la diferència de pressions és a penes de 0'005 bar, que és, sens dubte, irrisori per a l'estructura comparat amb un pes de 5 kg. Per tant, aquesta càrrega no es considerarà per a l'anàlisi de resistència. D'altra banda, la variació de densitat sí que té un impacte directe en el número de Reynolds, que ha de ser el més semblant possible al cas real; amb aquestes fórmules, i coneixent l'escala del model, es podrà establir per a cada velocitat de l'aire dins del túnel, quina velocitat està simulant a escala real.

### 3.2.2. Aerodinàmica

Si cal incloure la construcció del túnel de vent dins d'un camp de coneixement en concret, per descomptat aquest és l'aerodinàmica. En aquest apartat s'inclou la teoria necessària relacionada amb ella per al desenvolupament del túnel.

- Equació de Bernoulli

L'equació de Bernoulli es pot emprar per a fluids incompressibles. Per als gasos, si la velocitat no supera els 0'3 Mach, com succeeix en el túnel de vent, es poden considerar incompressibles; no obstant això, com s'ha comentat en el punt anterior, sí que es considerarà compressible. Així i tot, aquesta equació és fonamental dins del camp de la mecànica de fluids, per la qual cosa és digna d'esment ací. L'equació és:

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gh = cte$$

(4)

on,

$p$  = Pressió estàtica (Pa)

$\rho$  = Densitat ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = Velocitat (m/s)

$g$  = Acceleració de la gravetat ( $\text{m/s}^2$ )

$h$  = Altura (m)

- Números de Reynolds, Mach i Froude

Dins del camp de la mecànica de fluids, existeixen quatre forces que, relacionades entre si per aquests tres números adimensionals, permeten conèixer l'estat d'un fluid en un moment en concret. Aquestes forces són: les d'inèrcia, les de viscositat, les elàstiques, i les gravitatòries.

Les forces d'inèrcia es relacionen amb les de viscositat mitjançant el número de Reynolds. Aquest permet saber si un flux es comportarà de forma ordenada – flux laminar –, o desordenada i impredecible – flux turbulent –. Les forces viscoses són les que tendeixen a mantindre el flux en “carrils”, mentre que són les inercials les responsables del desordre. Per tant, com més gran siga el número de Reynolds, major serà la turbulència.

$$Re = \frac{\text{Forces d'inèrcia}}{\text{Forces de viscositat}} = \frac{VL}{\nu}$$

(5)

on,

V = Velocitat (m/s)

L = Longitud característica de l'objecte, depén de cada cas (m)

$\nu$  = Viscositat cinemàtica (m<sup>2</sup>/s)

El número de Mach relaciona les forces d'inèrcia amb les elàstiques. I ho fa expressant la velocitat d'un objecte respecte a la velocitat del so en el mitjà en el qual està. És un dels paràmetres més emprats, especialment per a expressar la velocitat que aconseguixen les aeronaus. Si la velocitat és inferior a 0'3 Mach, el fluid es pot considerar incompressible; si s'aconsegueix el Mach 1, s'està igualant la velocitat del so, cosa que canvia completament la manera de treballar amb el fluid. La classificació del flux se sol considerar de la següent forma

Taula 4. Classificació de fluxos d'aire segons la seua velocitat en relació a la del so

M < 0'7	Subsònic
0'7 < M < 1'2	Transsònic
1'2 < M < 5	Supersònic
M > 5	Hipersònic

I la fórmula queda finalment com:

$$M = \frac{\text{Forces d'inèrcia}}{\text{Forces elàstiques}} = \frac{V}{a}$$

(6)

on,

a = Velocitat del so en el mitjà (m/s)

Finalment, es troba el número de Froude, que relaciona les forces inercials amb les de la gravetat. És especialment emprat en flux hidràulic en làmina lliure, com el que es troba en els canals, però en l'aerodinàmica no té una aplicació tan important com els dos paràmetres anteriors, per la qual cosa per al disseny del túnel no s'utilitzarà. La fórmula del número de Froude és:

$$Fr = \sqrt{\frac{\text{Forces d'inèrcia}}{\text{Forces de gravetat}}} = \sqrt{\frac{V^2}{Lg}}$$

(7)

on,

g = Acceleració de la gravetat (m/s<sup>2</sup>)

La principal utilitat d'aquests tres números és poder establir una semblança dinàmica entre dues situacions que empen diferents paràmetres. Així, la semblança dinàmica total s'aconsegueix quan els tres números són iguals en totes dues situacions. Això s'ha de tindre en compte dins d'un túnel de vent, ja que en la gran majoria es treballa amb models a escala, de forma que la longitud característica disminueix, i es veuen afectats tant el número de Reynolds com el de Froude. A més, si es treballa amb diferents velocitats, o les condicions termodinàmiques de l'ambient varien, també es veuen afectats els tres números.

Tot això fa molt difícil aconseguir la semblança dinàmica total, per la qual cosa cal prioritzar un número front a uns altres. Per a aquest cas, un túnel de vent subsònic, el número de Froude no té importància, com ja s'ha comentat, per la qual cosa no aplica. A més, en cap cas el número de Mach aconseguix valors superiors a 0'3 M, ni en el propi túnel ni en la realitat dels models provats, per la qual cosa es pot prendre també com un número irrellevant, que no afecta de manera palpable a la semblança. No obstant això, el número de Reynolds sí que és important, i sí que pot variar el comportament de l'aire dràsticament si no s'igualen els valors del túnel amb el de la realitat.

Per tant, la prioritat en aquest túnel és aconseguir una semblança dinàmica respecte al número de Reynolds: tenint en compte que la viscositat cinemàtica es pot considerar invariant, i que la longitud característica disminueix amb l'escala, serà necessari augmentar la velocitat en la mateixa proporció que la pròpia escala per a obtindre un flux semblant. A més, com es va comentar en el punt 3.2.1, cal tindre en compte la variació de la densitat a causa de la disminució de pressió i de temperatura que ocorre en la secció més estreta d'un túnel de Venturi. Amb el fi de fer això una mica més visual, s'adjunta una taula a continuació amb una sèrie de casos reals, juntament amb els paràmetres que s'haurien de reproduir en el túnel de vent per a aconseguir una semblança dinàmica basada en el número de Reynolds (sense tindre en compte la variació de densitat: aquesta sí que s'haurà de calcular específicament a l'hora de fer els assajos pertinents).

*Taula 5. Exemples de velocitats a obtindre en el túnel amb maquetes a escala per a replicar el cas real*

Velocitat en el túnel (km/h)	50	75	100	50	100	90
Escala	1:10	1:15	1:20	1:5	1:10	1:3
Velocitat real (km/h)	5	5	5	10	10	30

- Capa límit ( $y^+$ ) i model de turbulències

La capa límit és un fenomen que es produeix quan un fluid interacciona amb una superfície que es troba a una velocitat diferent. Per la condició de no lliscament, imaginant que el fluid s'organitza en una sèrie de capes, la primera tindrà velocitat zero en relació amb la superfície. Conforme un s'allunya d'aquesta superfície, les capes del fluid tenen una velocitat major, fins que arribat un punt deixen d'estar afectades per la superfície, i la seua velocitat és la del flux lliure. Aquest punt defineix la frontera de la capa límit, i per conveni es pren que la capa última és aquella que té una velocitat del 99% respecte a la velocitat de flux lliure.

El fenomen de la capa límit és una cosa molt important a tindre en compte, i a l'hora de fer les simulacions mitjançant CFD, segons l'emmallat que es realitze, existeixen una sèrie de models de turbulència que treballen per a resoldre la capa límit. Per a poder esbrinar quin gruix de malla s'ha de tindre en les zones pròximes a les parets del túnel, existeix un concepte anomenat  $y^+$ . Aquest valor consisteix en un número que, depenent de la velocitat, la secció i altres paràmetres, permet estandarditzar la distància de la primera capa d'emmallat respecte a la paret. La seua utilitat resideix en què cada model de turbulència es comporta correctament per a un rang de  $y^+$  determinat, per la qual cosa és fonamental conèixer el seu valor per a seleccionar el model de turbulència correcte: un valor de  $y^+$  alt permetrà reduir el nombre d'elements de malla, i reduir la càrrega computacional. A causa de les limitacions de processament, és necessari trobar un model de turbulència que permeta treballar amb malles més gruixudes. Les fórmules per a obtindre aquest valor són les següents:

- Número de Reynolds basat en la longitud de la superfície en la direcció del flux:

$$Re, x = \frac{\rho U L}{\mu}$$

(8)

on

$Re, x$  = Número de Reynolds basat en la longitud de la capa límit en la direcció del flux

$\rho$  = Densitat de l'aire ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  = Velocitat de l'aire (m/s)

$L$  = Longitud de la capa límit en la direcció del flux d'aire (m)

$\mu$  = Viscositat dinàmica de l'aire ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

- Aproximació del coeficient de fricció:

$$C_f = [2 \log(Re, x) - 0'65]^{-2,3}$$

(9)

on,

$C_f$  = Coeficient de fricció basat en  $Re, x$



- Tensió tangencial a partir del coeficient de fricció:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2$$

(10)

on,

$\tau_w$  = Tensió tangencial impresa pel fluid en les parets (Pa)

- Velocitat modificada sobre la base de la tensió tangencial i a la densitat:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

(11)

on,

$u_*$  = Velocitat de fricció –velocitat modificada– (m/s)

- Altura dins de la capa límit sobre la base del valor d' $y^+$  buscat:

$$y = \frac{\mu y^+}{\rho u_*}$$

(12)

on,

$y$  = Altura respecte a la paret més pròxima (m)

$y^+$  = Altura normalitzada respecte a la paret més pròxima

El model de turbulències emprat en la simulació CFD serà el k-èpsilon, en la seua versió estàndard, ja que és el més comú a l'hora de realitzar simulacions, gràcies als seus bons resultats amb una menor exigència computacional front a altres models com el k-omega. Aquest tipus de model en concret, exigeix un valor de  $y^+$  per a la primera capa d'emmallat d'entre 30 i 300; de manera arbitrària, es tria un valor intermedi de 100. Això, juntament amb les equacions exposades a dalt d'aquest paràgraf, permeten conèixer quin espessor ha de tindre la primera capa de l'emmallat que es realitze. A continuació, es mostren els resultats.

Taula 6. Altura màxima respecte a la paret del túnel de la primera capa d'emmallat

Variable	Dades d'entrada			Resultats	
	U (m/s)	L (m)	$y^+$ buscada	Re, x	y (mm)
Valor	30	3	100	$6 \times 10^6$	1'3

Per tant, a l'hora de realitzar l'emmallat del túnel, s'haurà d'assegurar que la primera capa després de les parets laterals tinga un espessor de, com a màxim, 1'3 mm. Per a simplificar-ho, i prendre un xicotet marge de seguretat, la primera capa serà d'1 mm.

- Intensitat de turbulències

La intensitat de turbulències és un paràmetre que permet conèixer la importància de les fluctuacions de velocitat a causa de la turbulència que hi ha en un punt. Es defineix com el quocient entre la mitjana de les fluctuacions de velocitat entre la mitjana de la velocitat:

$$I = \frac{v'}{V}$$

(13)

sent,

$$v' = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

(14)

on,

$v'$  = Velocitat mitjana de les fluctuacions degudes a la turbulència (m/s)

$k$  = Energia cinètica de turbulència ( $m^2/s^2$ )

$V$  = Velocitat mitjana (m/s)

Segons el valor de la intensitat, se sol realitzar una classificació del flux de la següent forma: alta turbulència, per a valors per damunt del 5%; mitja turbulència, entre 1% i 5%; i baixa turbulència, si el valor és inferior a l'1%. Per descomptat, l'interés d'aquest túnel és que la turbulència siga el més baix possible.

### 3.2.3. Potència

En règim transitori, el ventilador ha d'accelerar l'aire a més de vencer les pèrdues de pressió. No obstant això, una vegada arriba a la velocitat desitjada, i s'aconsegueix el règim estacionari, la potència que ha de subministrar al fluid és exactament la mateixa que la potència de pèrdues de càrrega. D'aquesta manera, s'introdueix el concepte de raó d'energies del túnel, que s'entén com la raó de la potència de flux en la zona de proves a màxima velocitat ( $P_t$ ) entre la potència de pèrdues de càrrega ( $P_c$ ).

$$Er = \frac{P_t}{P_c} \quad (15)$$

Així doncs, tenint en compte que la potència de flux es defineix com,

$$P_t = \frac{1}{2} \dot{m}_t V_t^2 = \frac{1}{2} \rho A_t V_t^3 \quad (16)$$

Es té un valor de,

$$P_t = \frac{1}{2} \times 0'2 \times 30^3 \times 1'043 = 2816 \text{ W}$$

Només fa falta saber el valor d' $Er$ , per a això es pot realitzar un càlcul senzill com proposen Mehta i Bradshaw [11].

- Zona de test i con

$$K1 = 0'003 \frac{S L}{A} \quad (17)$$

Taula 7. Coeficient de pèrdues de la zona de proves i del con

S	1'8 m
L	2 m
A	0'2 m <sup>2</sup>
K1	0,054

- Pantalla i bresca

$$K_{2h} = K_{3p} = N K \left[ \frac{A_0}{A} \right]^2$$

(18)

Taula 8. Coeficient de pèrdues de la bresca ( $K_{2h}$ ) i de les pantalles ( $K_{3p}$ )

N	1	N	2
$K_h$	1	$K_p$	1
$A_0/A$	8	$A_0/A$	8
$K_{2h}$	0'020	$K_{3p}$	0'041

- Difusor

$$K_4 = (1 - \eta_D) \left[ 1 - \left( \frac{A_t}{A_d} \right) \right]$$

(19)

Taula 9. Coeficient de pèrdues del difusor

$\eta_D$	0'7
$A_t/A_d$	2
$K_4$	0'150

- Eixida

$$K_5 = \left( \frac{A_t}{A_f} \right)^2$$

(20)

Taula 10. Coeficient de pèrdues per l'eixida d'aire de tornada a l'entorn

$A_t/A_f$	3'2
$K_5$	0'099

- Suma total

$$E_r = \frac{1}{\sum_{n=1}^5 K_n}$$

(21)

En la següent taula es poden observar els resultats:

Taula 11. Raó d'energies del túnel de vent

K	K1	K2h	K3p	K4	K5	$\Sigma K_n$	Er
Valor	0'054	0'022	0'041	0'150	0'099	0'397	2'5

Tornant a la fórmula d'Er, substituint el valor obtingut d'Er i de Pt, podem obtenir la potència de pèrdues Pc:

$$Pc = \frac{Pt}{Er} = \frac{2'82}{2'5} = 1'11 \text{ kW}$$

La zona del ventilador està ben definida, de forma que coneixent tant la densitat de l'aire com la secció de pas, es pot obtenir el cabal que ha de traspasar el ventilador,

$$Q = \frac{G}{\rho} = \frac{7'25}{1'2} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$$

I coneixent que la potència de pèrdues és igual a la potència que el ventilador imprimeix al fluid, i que la definició de potència per a aquesta mena de màquines és,

$$Pc = Pabs = Q \Delta p \quad (22)$$

Es pot obtenir el salt de pressions que salva, que correspon a totes les pèrdues de càrrega del túnel.

$$\Delta p = \frac{Pabs}{Q} = \frac{1'11}{6} = 185 \text{ Pa}$$

Aquests resultats corresponen amb uns valors orientatius, però en cap cas definitius. Cal tindre en compte que les maquetes que es proven en un túnel de vent també introdueixen pèrdues, i pot haver-hi una infinitat de fenòmens que afecten el rendiment del túnel, per la qual cosa el ventilador triat ha de tindre una potència que guardi un bon marge amb els càlculs realitzats: un extra del 50% és suficient.

Per a l'elecció definitiva s'empraran les dades extrems d'una simulació realitzada mitjançant dinàmica de fluids computacional, que serà més precisa, i permetrà introduir un model que replique un comportament turbulent, aprofundint més en la versemblança del càlcul.

### 3.3. Disseny interior

En aquest apartat es realitzarà el disseny de la superfície interior del túnel, que és la que estarà en contacte amb l'aire del túnel. Es realitzaran diverses fases: en la primera, es definiran les grandàries i formes bàsiques; en la segona, s'uniran totes les peces i s'especificaran els canvis de tram més crítics; i en la tercera, es milloraran i corregiran els problemes de disseny de la fase anterior, per a tindre el disseny interior definitiu.

En cada fase es realitzaran simulacions mitjançant CFD per a validar els dissenys. Per descomptat, és necessari realitzar un estudi final amb un model dins del túnel, per a poder observar les pèrdues de càrrega i les turbulències que es generen, i així crear una simulació fidel a la realitat. Cal destacar que, a causa de limitacions en la capacitat de procés, no es duran a terme simulacions amb la bresca i les pantalles de turbulència, ja que suposen una càrrega computacional massa gran; no obstant això, açò influirà molt poc en el valor real a causa de les baixes velocitats que no provoquen grans pèrdues de càrrega, per la qual cosa es consideraran menyspreables.

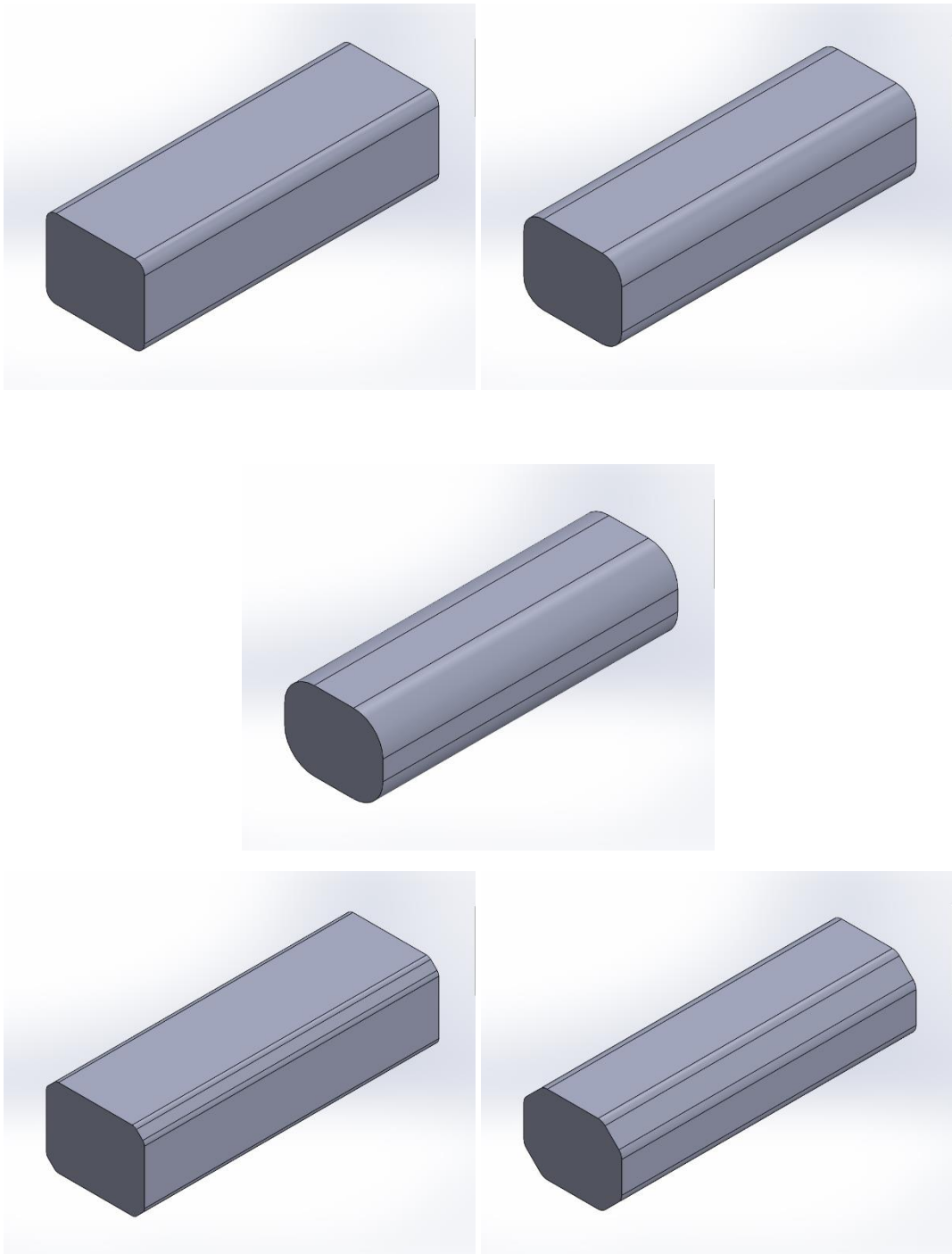
### 3.3.1. Fase 1. Disseny bàsic per parts

En primer lloc, cal realitzar el disseny aerodinàmic al voltant del qual gira tot el projecte. Les parts de les quals consta són: cambra d'establiment, bresca i pantalles de turbulència, con de contracció, zona de proves, difusor, i el ventilador.

#### Zona de proves

Com el seu propi nom indica, es tracta de la cambra en la qual es realitzen els assajos. La zona de proves ha de ser prou gran com perquè l'aire que passe sobre el model provat no interactue amb les parets del túnel. Segons Barlow [3], per a cossos roms, com són els automòbils, el bloqueig frontal no ha de suposar més del 5% de la secció del túnel, aproximadament. Sabent que es desitja aconseguir una grandària lateral de 10 cm, i que l'altura típica d'un vehicle sol ser el 80% de l'ample d'aquest, és a dir, 8 cm, es té un bloqueig lateral de  $80 \text{ cm}^2$ . Si això és el 5%, el 100% seran  $1600 \text{ cm}^2$ ; això fa una secció de  $40 \times 40 \text{ cm}$ . Tanmateix, per a deixar un marge de seguretat, i dotar-li una forma amb relació de 5/4 per a assemblar-lo a la proporció d'un automòbil, l'ample s'augmenta a 50 cm. La longitud sol ser 3 vegades la de l'ample, és a dir, 1'5 m.

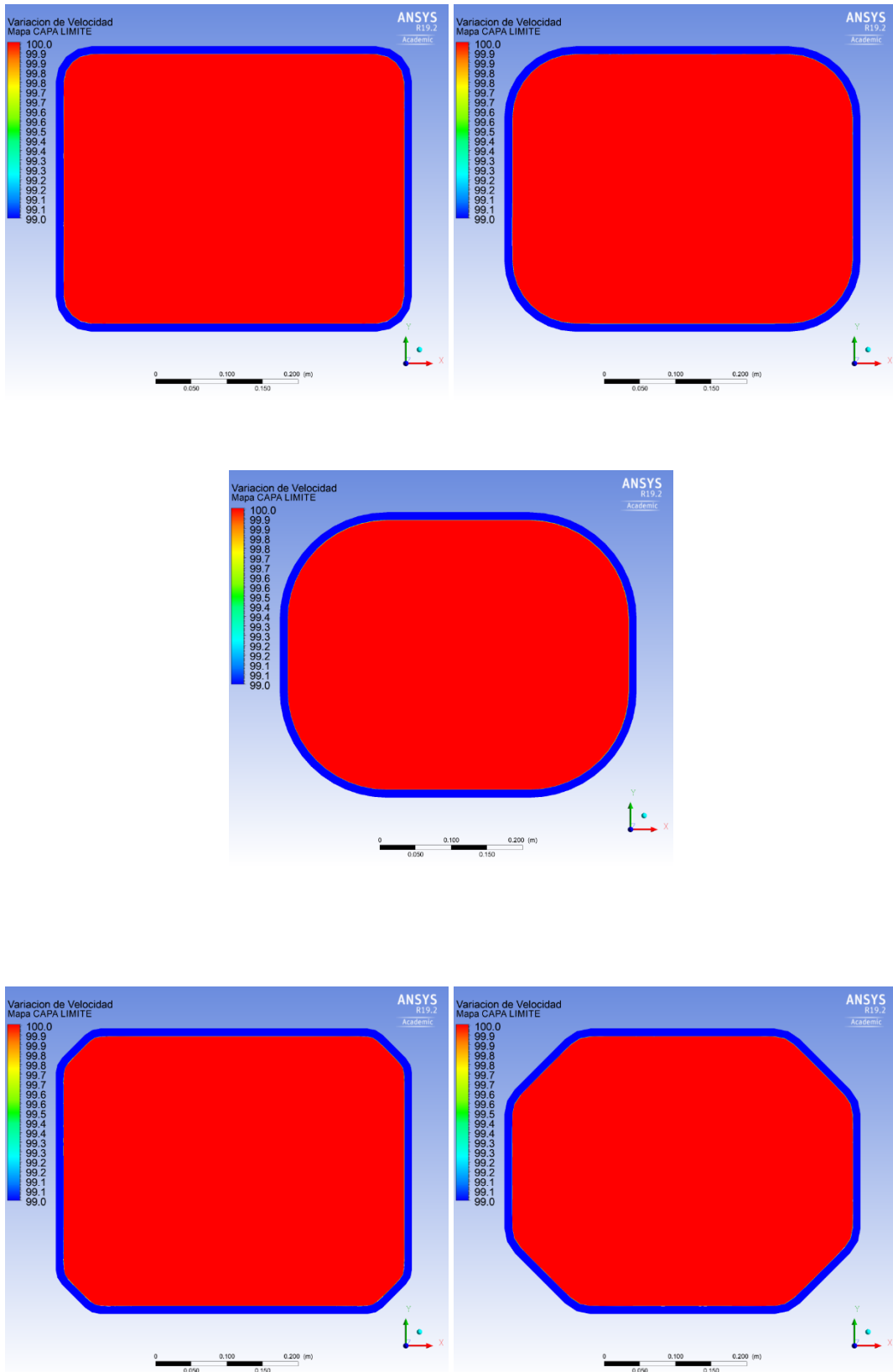
Per a evitar que en les quatre cantonades es genere un augment de la capa límit degut a la confluència de les dues parets, és convenient realitzar arrodoniments o xamfrans. S'han realitzat un total de 5 dissenys variant les grandàries d'aquests, que es mostren en la següent pàgina:



*Il·lustració 16. Configuracions de la zona de proves. D'esquerra a dreta, i de dalt a baix: A, B, C D i E*



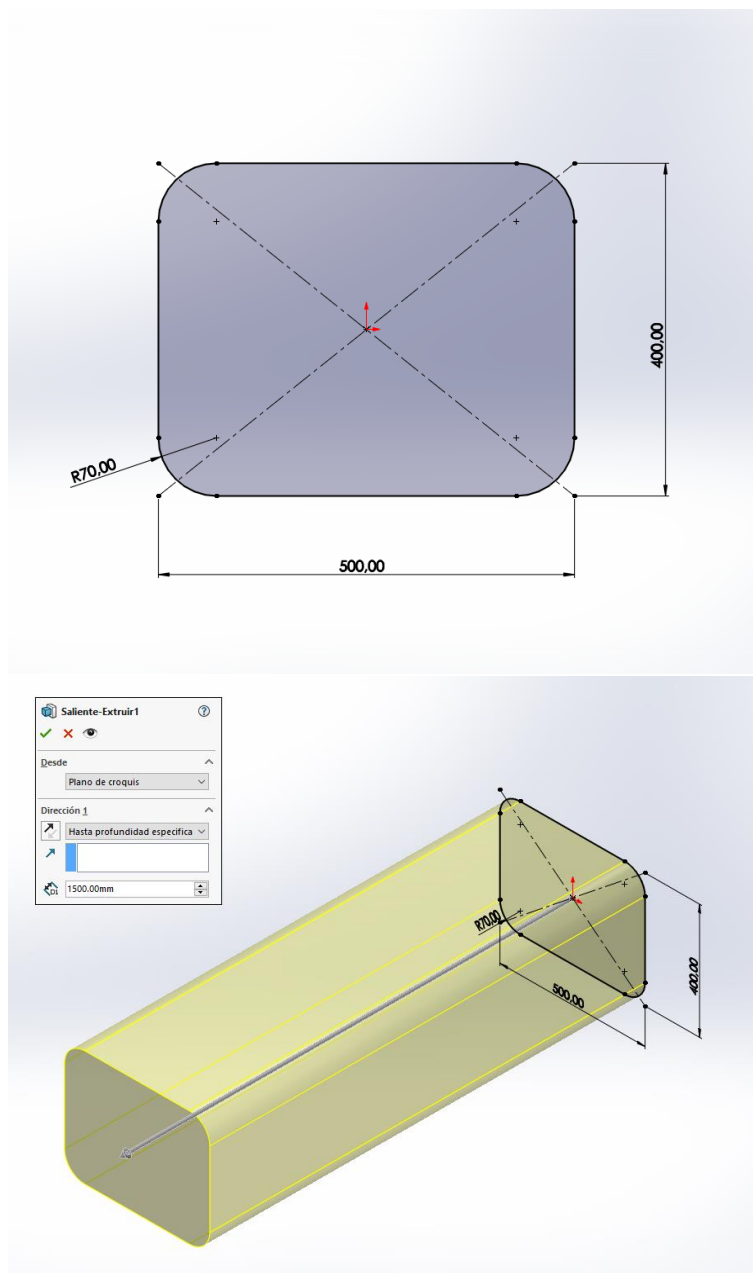
En les següents imatges es poden veure els resultats de la simulació per CFD:



Il·lustració 17. Gruix de la capa límit en les zones de proves. Mateix ordre que en la il·lustració 16.

Com es pot observar, tots els models tenen una capa límit a la mitat de la secció de la mateixa grandària pràcticament, per la qual cosa tots els dissenys són vàlids des d'aquesta perspectiva.

Per tant, per a realitzar la selecció, és oportú centrar-se en la senzillesa i facilitat de maneig. Es descarten els dos últims dissenys amb xamfrans perquè són una mica més complexos i més angulats. Entre els tres primers, l'últim pot adaptar-se millor a la secció circular del con de contracció, però l'arrodoniment és massa ampli i pot dificultar a la vista del model des de l'exterior, per la qual cosa la solució òptima és una solució intermèdia entre l'A i la B: secció rectangular amb arrodoniments de 70 mm de ràdio.



Il·lustració 18. Disseny de la zona de proves de la Fase 1 en Solidworks: Croquis (dalt) i Extrusió (baix)

## Con de contracció

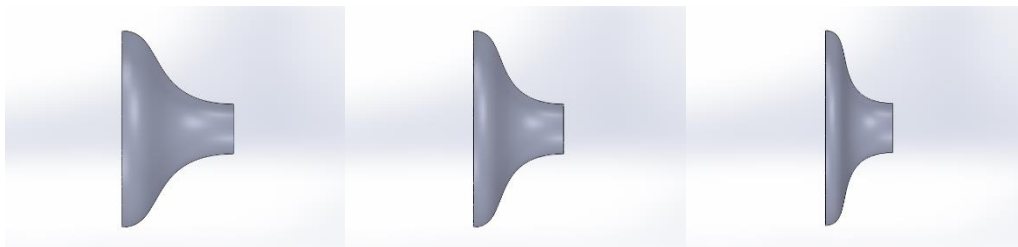
El con de contracció s'encarrega d'accelerar el flux des de la cambra d'establiment fins a la zona de test. L'objectiu és aconseguir en la menor longitud possible, el flux d'aire el més homogeni que es pugui. Així doncs, els paràmetres a definir són la relació de contracció, la forma, i la longitud.

Segons Mehta [10], les relacions de contracció més usuals van des de 6 a 9, i fins i tot 12. És convenient aconseguir la màxima relació possible perquè d'aquesta manera es pot reduir la velocitat de la cambra d'establiment, reduint a la vegada les pèrdues per fricció. A més, el con de contracció té un efecte de reducció tant de la turbulència com de la grossària de la capa límit, que augmenta també amb la relació de contracció.

No existeix un mètode de disseny del perfil del con, encara que sí que se sap que no és tan determinant com la relació de contracció; en aquest cas, autors com Barlow [3] advoquen per un disseny "a ull". No obstant això, sí que és convenient que la corba d'accés a la zona de proves siga més suau que la de contracció, pel fet que es pot generar una separació de flux en crear-se un gradient advers de pressions. Això afecta també a la longitud que, seguint a Bradshaw i Pankhurst [4], ha de ser tan curt com es pugui, abans de provocar una separació de flux a l'eixida. D'aquesta manera, s'han realitzat una sèrie de dissenys que s'han validat amb CFD.

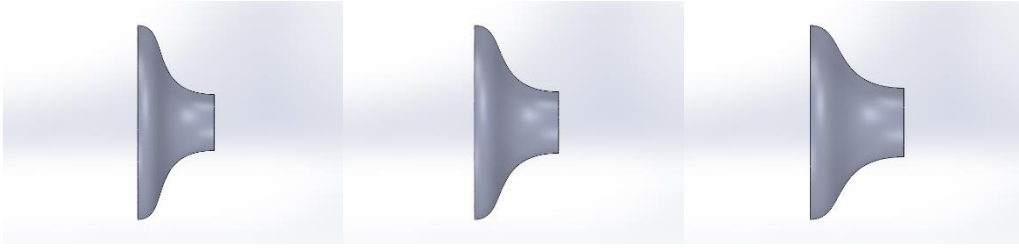


Il·lustració 19. Dissenys del con de contracció. D'esquerra a dreta: A, B, i C



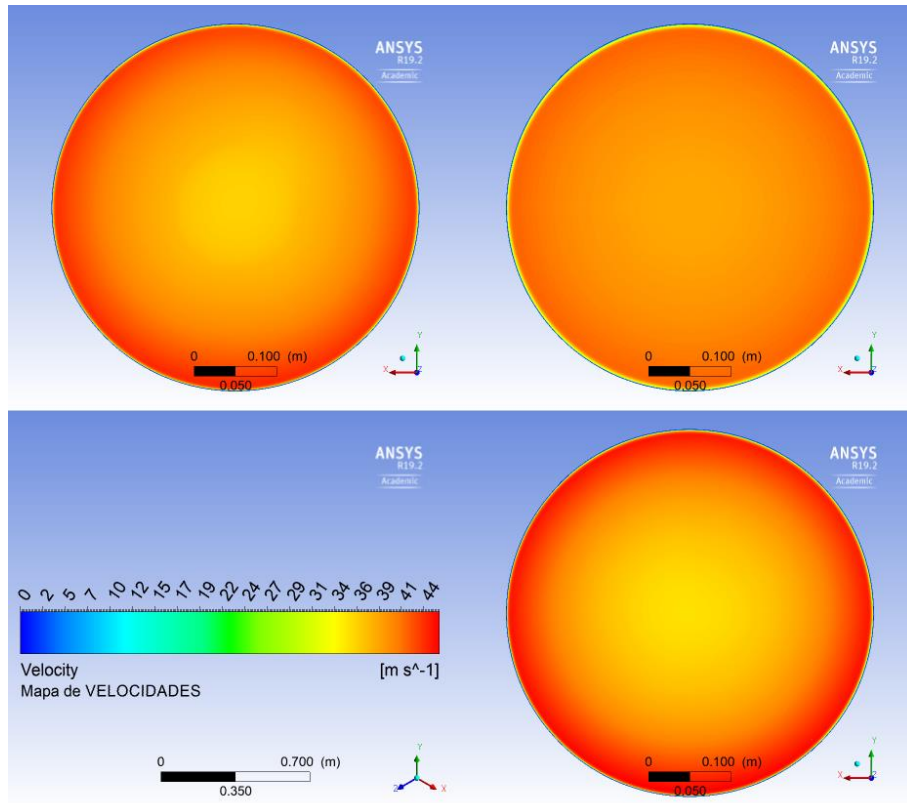
Il·lustració 20. Dissenys del con de contracció. D'esquerra a dreta: B1, B2, i B3

Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques



*Il·lustració 21. Dissenys del con de contracció. D'esquerra a dreta: B3A, B3B, i B3C*

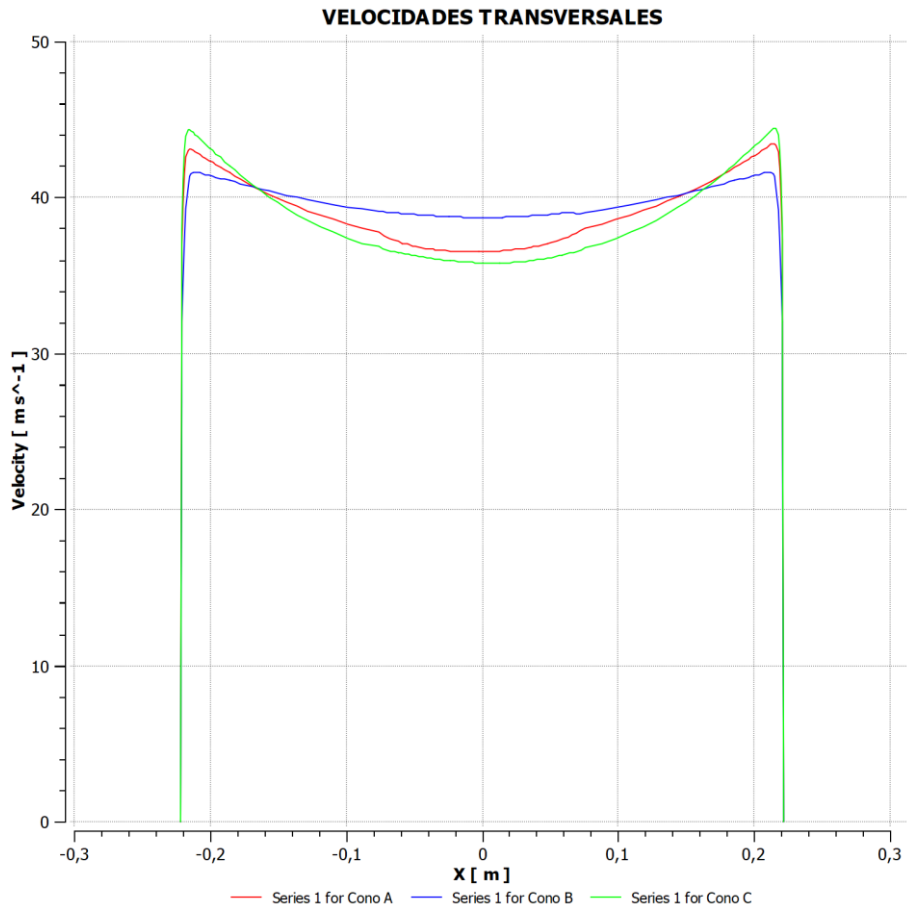
- Versions A, B i C



Il·lustració 22. Mapa de velocitats en l'eixida dels cons A, B, i C

Taula 12. Resultats de la simulació dels cons A, B, i C

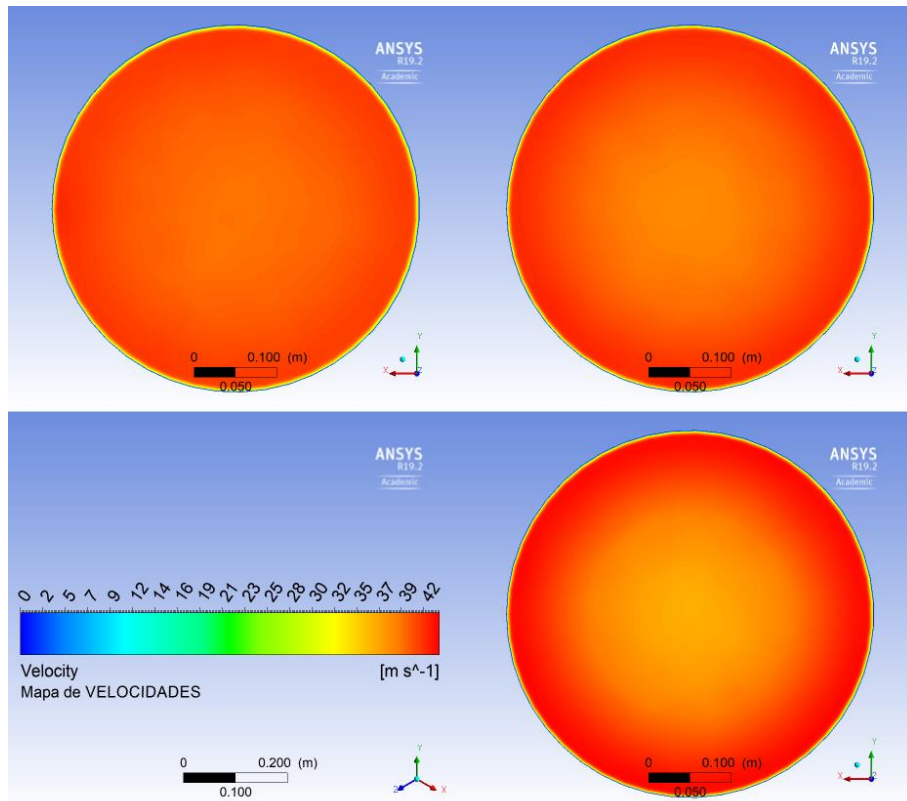
	Longitud (m)	Relació de contracció	Salt de pressions (Pa)
Con A	1	15:1	940
Con B	1	15:1	945
Con C	1	15:1	930



Il·lustració 23. Velocitats a l'eixida del con de contracció al llarg de l'eix transversal horitzontal

Veient els resultats de la simulació, es comprova allò que era evident des d'un principi: cap a l'eixida, existeix un gradient advers de pressions, per la qual cosa urgeix facilitar a l'aire que es mantinga pegat a la superfície per l'efecte Coanda. A més, permet disminuir l'efecte “embut” que genera la geometria cònica convergent, per la qual cosa l'aire flueix i s'organitza més fàcilment, i la distribució de velocitats és, per tant, més homogènia: mentre que la geometria C té variacions de 10 m/s del centre a les vores, la B a penes té uns 2 m/s de diferència. Així doncs, és el disseny B el més apropiat per a passar a la següent prova.

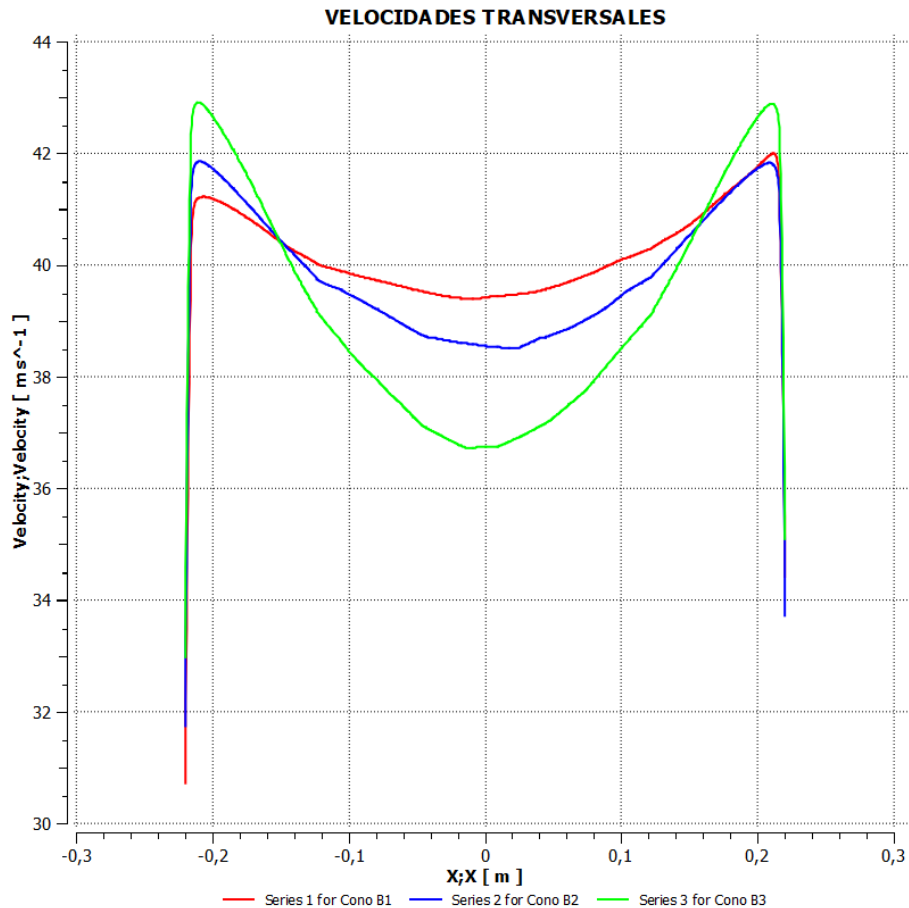
- Versions B1, B2 i B3



Il·lustració 24. Mapa de velocitats a l'eixida dels cons B1, B2, i B3

Taula 13. Resultats de la simulació dels cons B1, B2, i B3

	Longitud (m)	Relació de contracció	Salt de pressions (Pa)
Con B1	1	15:1	960
Con B2	0'8	15:1	960
Con B3	0'6	15:1	962

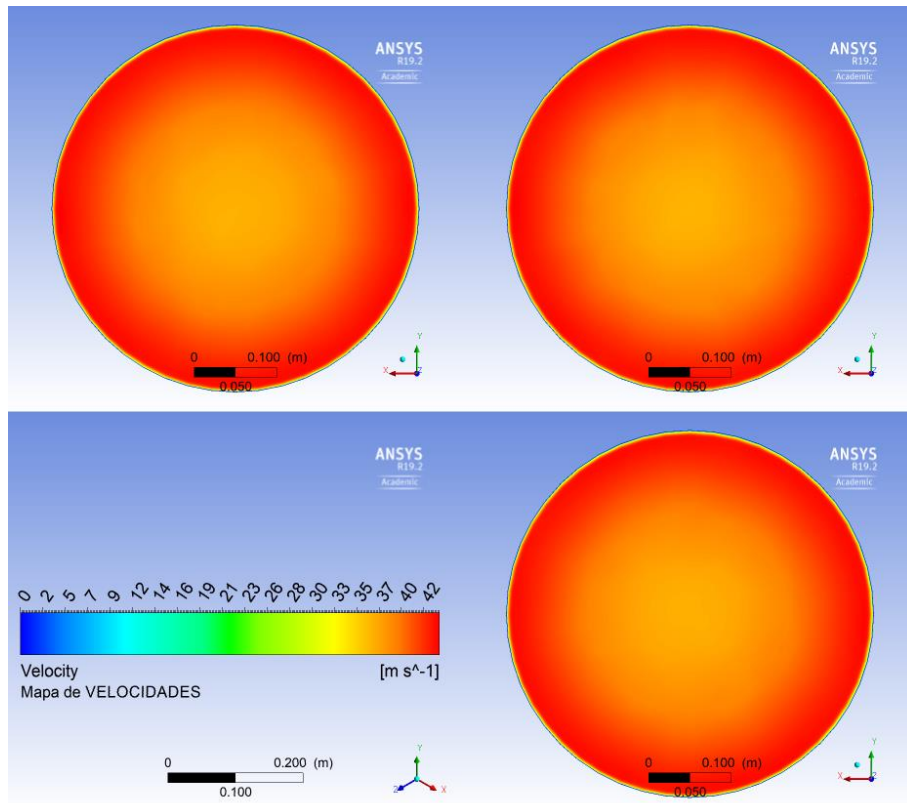


Il·lustració 25. Velocitats a l'eixida del con de contracció al llarg de l'eix transversal horitzontal

La idea darrere d'una modificació en la longitud del con és poder reduir les pèrdues que es produeixen per fregament: no obstant això, això pot desembocar en un flux menys homogeni, com a mostra la imatge anterior: el con B3 té una variació d'uns 4 m/s, mentre que l'A es mostra quasi totalment homogènia. A més, si es comparen els salts de pressions a l'entrada i l'eixida (tenint en compte que la velocitat és la mateixa, per la qual cosa l'energia cinètica també es manté constant en els tres casos), es pot veure que no hi ha una diferència significativa. Per tant, convé emprar una relació de longitud i contracció similar al del con A. No obstant això, per a la següent prova, tenint en compte que es baixarà la relació de contracció de 12, és evident que el con A no pot millorar molt més l'homogeneïtat de velocitats, per la qual cosa s'ha triat per a la següent prova el con C, sabent que, amb una reducció de la relació de contracció, s'obtindrà una geometria de proporcions similars al con A.



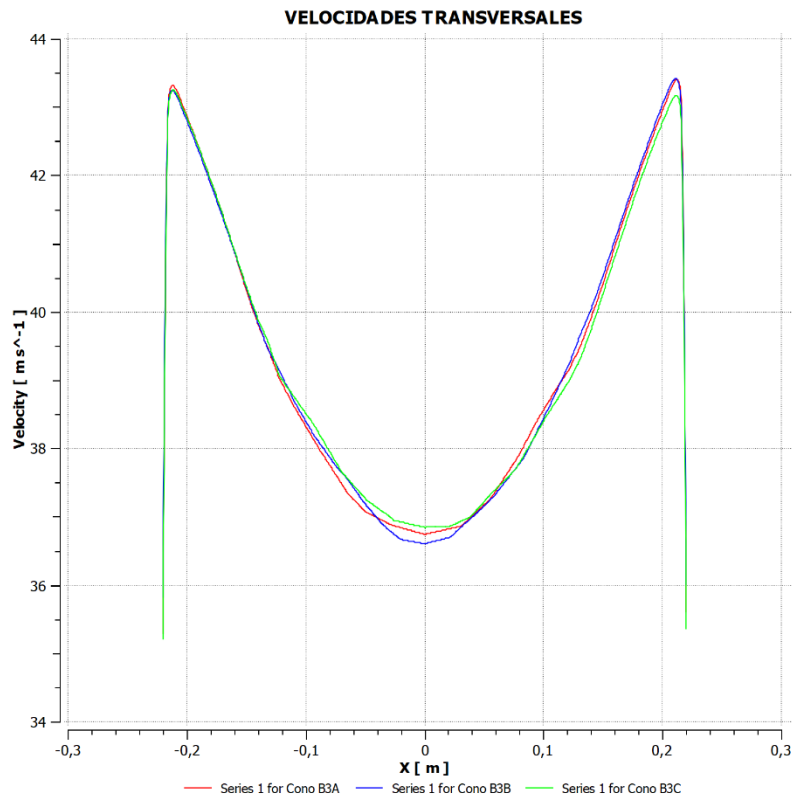
- Versions B3A, B3B i B3C



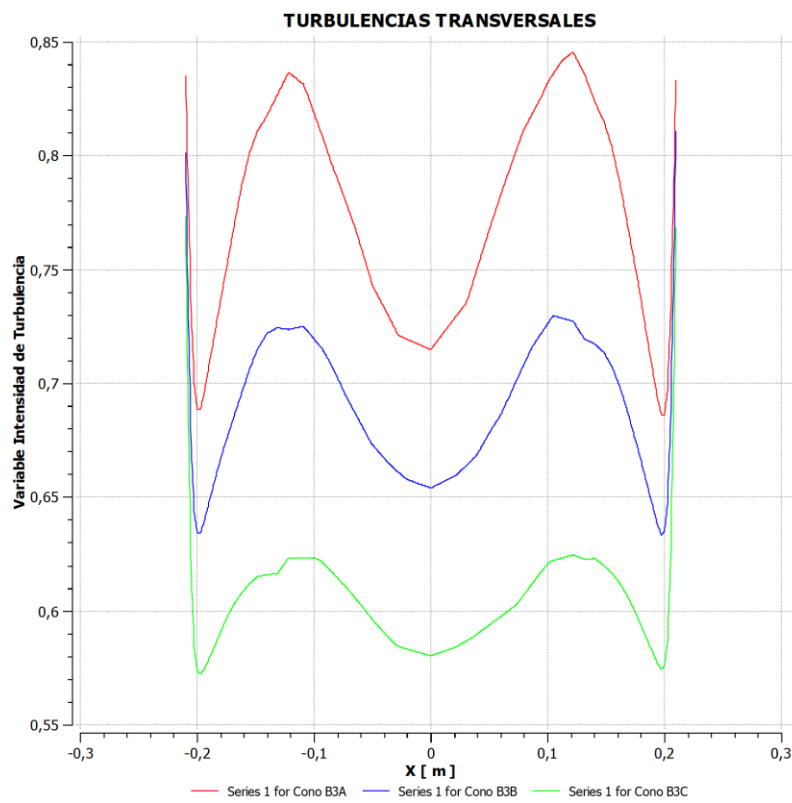
Il·lustració 26. Mapa de velocitats a l'eixida dels cons B3A, B3B, i B3C

Taula 14. Resultats de la simulació dels cons B3A, B3B, i B3C

	Longitud (m)	Relació de contracció	Salt de pressions (Pa)
Con B3A	0'6	12'5:1	959
Con B3B	0'6	10:1	956
Con B3C	0'6	8:1	950



Il·lustració 27. Velocitats a l'eixida del con de contracció al llarg de l'eix transversal horitzontal



Il·lustració 28. Intensitat de turbulències a l'eixida del con de contracció al llarg de l'eix transversal horitzontal

No s'aprecia una gran diferència entre una tipologia de con i una altra, per la qual cosa la reducció en la relació de contracció no millora l'homogeneïtat del camp de velocitats, una variació d'uns 5 m/s s'aprecia en els tres casos. L'únic avantatge ve en forma de reducció de velocitat a l'entrada, per la qual cosa les pèrdues en la bresca i les pantalles de turbulència poden ser reduïdes. No obstant això, no es guanya quasi res, ja que la gran majoria de pèrdues es produeixen en el difusor i en l'eixida.

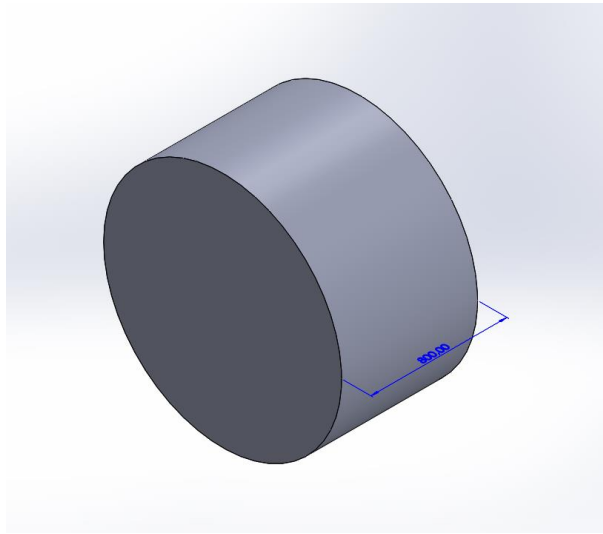
D'altra banda, és important atendre les turbulències generades a l'eixida. Si s'observa la gràfica següent, sí que s'aprecia una diferència entre les diverses relacions: és la relació de contracció més baixa (Con B3C) la que aconseguix menors nivells de turbulència.

Per tant, la relació de contracció, afecta fonamentalment a la intensitat de turbulència. Seguint les directrius de Mehta [10], juntament amb les simulacions realitzades, la relació de contracció òptima varia entre 6 i 8. A més, una relació baixa té un avantatge constructiu i d'ús: la cambra d'establiment és la zona més voluminosa de tota la instal·lació i, especialment per a túnels destinats a usar-se en habitacions, una grandària reduïda presenta avantatges de muntatge i transport.

Després d'aquestes proves, s'ha determinat que els paràmetres de construcció seran: una relació de contracció de 7 a 1, i una longitud de 0'6 m.

### Cambra d'establiment

La funció de la cambra d'establiment és allotjar tant les pantalles de turbulència com les bresques d'eliminació de vòrtex. Per aquest motiu, és una zona de baixa velocitat, sense quasi pèrdues, de secció circular constant per a encaixar amb l'inici del con de contracció, i amb la longitud suficient com per a poder allotjar la bresca i unes tres o quatre pantalles de turbulència. Això fa que 1 metre de longitud siga suficient per a aquest disseny, encara que es dissenyarà perquè pugui variar en funció de quantes pantalles es col·loquen: si no es col·locara cap, no és necessari arribar al metre de longitud. Per a aquest disseny es prendran 0'8 m.



*Il·lustració 29. Disseny de la Fase 1 de la cambra d'establiment*

### Pantalles de turbulència

Aquestes pantalles es col·loquen després de la bresca, i poden variar en número segons la qualitat de flux que es desitja obtenir. El seu funcionament és el següent: mitjançant les pèrdues de càrrega que introdueixen, aconseguen homogeneïtzar el camp de velocitats del flux d'aire, reduint així la turbulència. No són més que una sèrie de xarxes a manera de "mosquiteres" de gran tamany, és a dir, un marc amb un teixit de fils primers que generen una malla. Perquè el seu funcionament siga el millor, s'ha d'emprar fils el més fins possibles, per a així aconseguir un major nombre de cel·les, i que les pèrdues introduïdes tinguin una  $K$  pròxima a 1. Si es col·loquen diverses pantalles, cal tindre en compte una separació entre elles d'unes 20 vegades l'ample de cel·la perquè l'homogeneïtzació es duga a terme completament. La fórmula que permet conèixer les perdudes és la següent:

$$K = 6'5 \frac{1 - \beta}{\beta^{5/3}} \left( \frac{U d_w}{\nu} \right)^{-1/3} \quad (23)$$

on,

$U$  = Velocitat a l'entrada (m/s)

$\nu$  = Viscositat cinemàtica (m<sup>2</sup>/s)

$d_w$  = Diàmetre del cable que forma la malla

$\beta$  = Densitat de malla, definit per la següent fórmula:

$$\beta = (1 - d_w \rho_m)^2 \quad (24)$$

on  $\rho_m$  = densitat de malla, definit a la vegada per:

$$\rho_m = \frac{D}{a} \quad (25)$$

on,

$D$  = Diàmetre de la cambra d'establiment (mm)

$a$  = Ample d'una cel·la de la malla (mm)

La fórmula 23 és vàlida sempre que el número de Reynolds del cable ( $Re, w$ ) complisca la següent condició.

$$60 < Re, w = \frac{U d}{\beta \nu} < 600 \quad (26)$$

En aquest cas hipotètic s'usaran fils de nilons de 3 mm de gruix, que són prou fins i resistents per al túnel en qüestió. Els càlculs queden tal que així,

*Taula 15. Variables característiques de la pantalla ideada*

Variable	D (mm)	A (mm)	$\rho m$	dw (mm)	$\beta$	Re,w
Valor	1400	3	467	0'4	0'662	123

*Taula 16. Coeficient de pèrdues K de la pantalla ideada*

Variable	U (m/s)	Dw (mm)	v (m <sup>2</sup> /s)	$\beta$	K
Valor	4'3	0'4	$1'54 \times 10^{-5}$	0'662	0'968

## Bresca

La bresca és la primera part que entra en contacte amb el flux d'aire, i la seua funció és eliminar possibles irregularitats en la direcció d'aquest, ja siguin corrents perpendiculars a la direcció de pas, vòrtexs, etc. Seguint la recomanació de Mehta [10], unes 150 cel·les per metre al llarg del diàmetre de la cambra d'establiment és suficient. La longitud ha de ser entre 6 i 10 vegades l'ample de cel·la, i la constant de pèrdues  $K$  sol estar en el rang de 0'5 i 1. El material emprat depèn de l'ús, però ha de ser el més fi i llis possible, per a reduir al màxim les pèrdues.

Per a aquest càlcul inicial, s'emprarà una bresca amb cel·les hexagonals, de 10 mm d'ample, i de 70 mm de profund (una relació de 7 a 1). La  $K$  s'obté mitjançant la fórmula oferida per Idelčik [8] de la següent forma:

$$K_h = \lambda_h \left( \frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left( \frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left( \frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2$$

$$\lambda_h = \begin{cases} 0'375 \left( \frac{\Delta}{D_h} \right)^{0,4} Re_{\Delta}^{-0,1} \\ 0'214 \left( \frac{\Delta}{D_h} \right)^{0,4} \end{cases}$$

(27a i 27b)

on,

$K_h$  = Coeficient de pèrdues

$L_h$  = Longitud d'una cel·la (m)

$D_h$  = Diàmetre hidràulic d'una cel·la (m)

$\beta_h$  = Densitat d'emmallat de la bresca

$\Delta$  = Rugositat  $Ra$  del material de la bresca (mm)

$Re_{\Delta}$  = Número de Reynolds prenent la longitud característica la rugositat  $\Delta$

Taula 17. Coeficient de pèrdues  $K$  de la bresca ideada

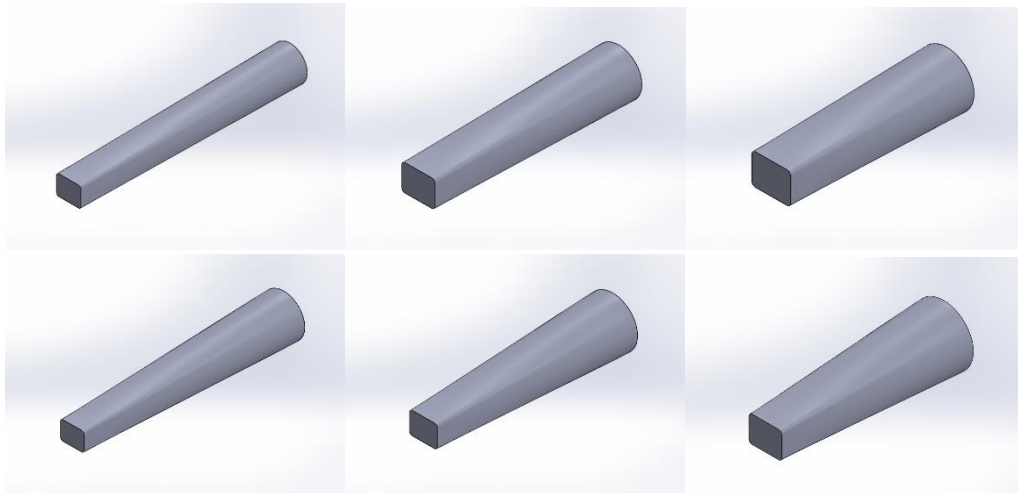
Variable	$L_h$ (m)	$D_h$ (m)	$\beta_h$	$\Delta$ (mm)	$Re_{\Delta}$	$K_h$
Valor	0'007	0'001	0'986	0'0015	2100	1

## Difusor

El difusor s'encarrega de convertir l'energia cinètica de nou en energia de pressió, per a reduir la fricció de l'aire i així disminuir les pèrdues. En un túnel de vent obert com és aquest, també es produeixen pèrdues per retornar l'aire de nou al mitjà, que disminueixen quant menor siga la velocitat d'eixida. No obstant això, els difusors creen gradients de pressió adversos, que poden generar una separació de flux. Això, sumat al fet que els models provats generen turbulències, fan necessari que els angles de divergència es mantinguen molt baixos en comparació amb els dels cons de contracció; així doncs, les longituds dels difusors poden ser molt grans.

No obstant això, aquesta grandària està limitada també, pel fet que l'augment de gruix de la capa límit pot causar també separació de flux cap al final del difusor. Els valors típics dels difusors són una relació d'àrees d'entre 2 i 3, i angles de divergència totals de  $4^\circ$ .

En aquest cas, s'han provat diversos difusors, tenint en compte que el primer tram ha d'acomodar-se a la geometria rectangular a la circular del difusor.

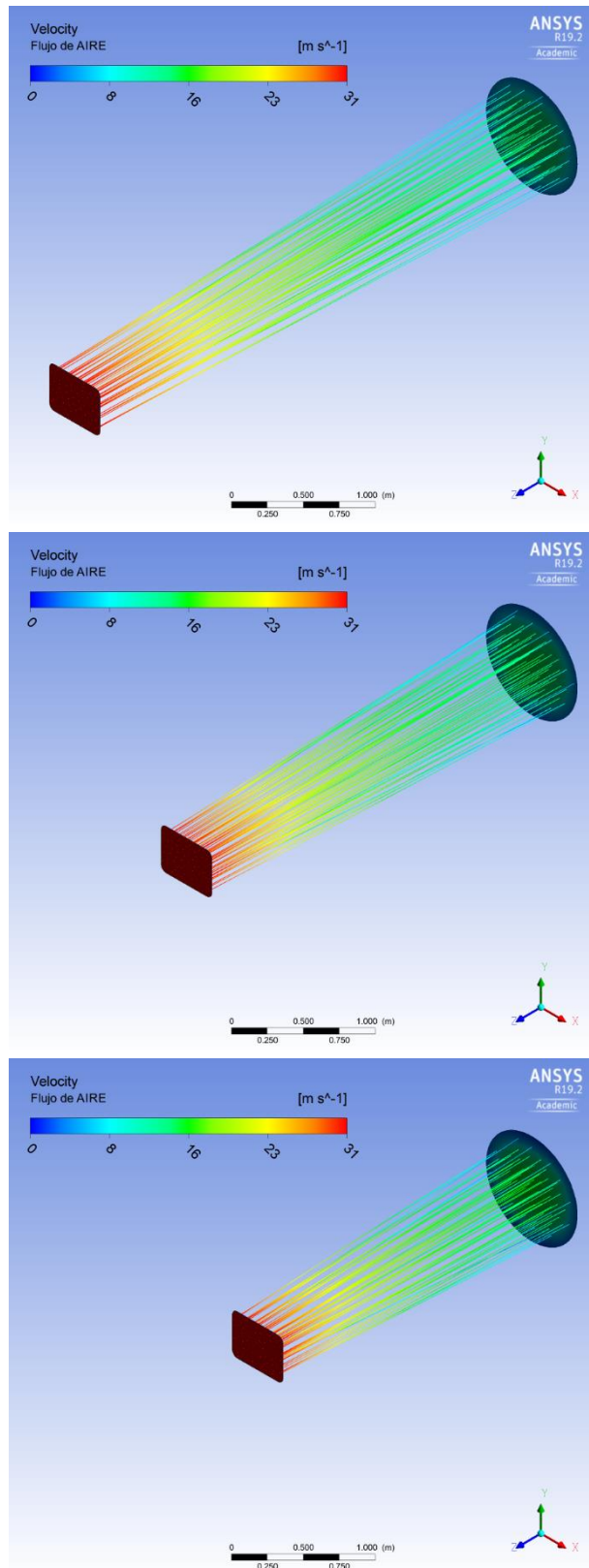


*Il·lustració 30. Disseny del difusor de la Fase 1. D'esquerra a dreta, i de dalt a baix: A, B, C, D, E, i F*

En les següents dues pàgines es poden veure diverses imatges amb els resultats de la simulació per CFD.

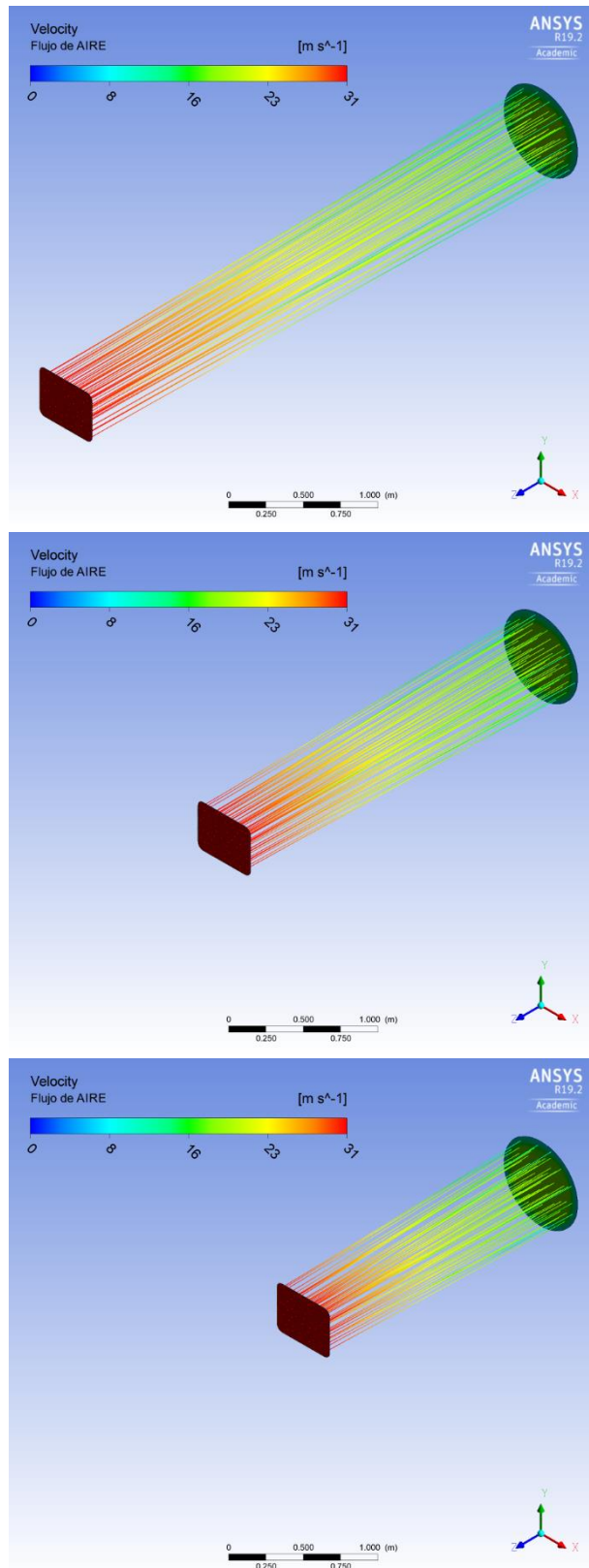


Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques



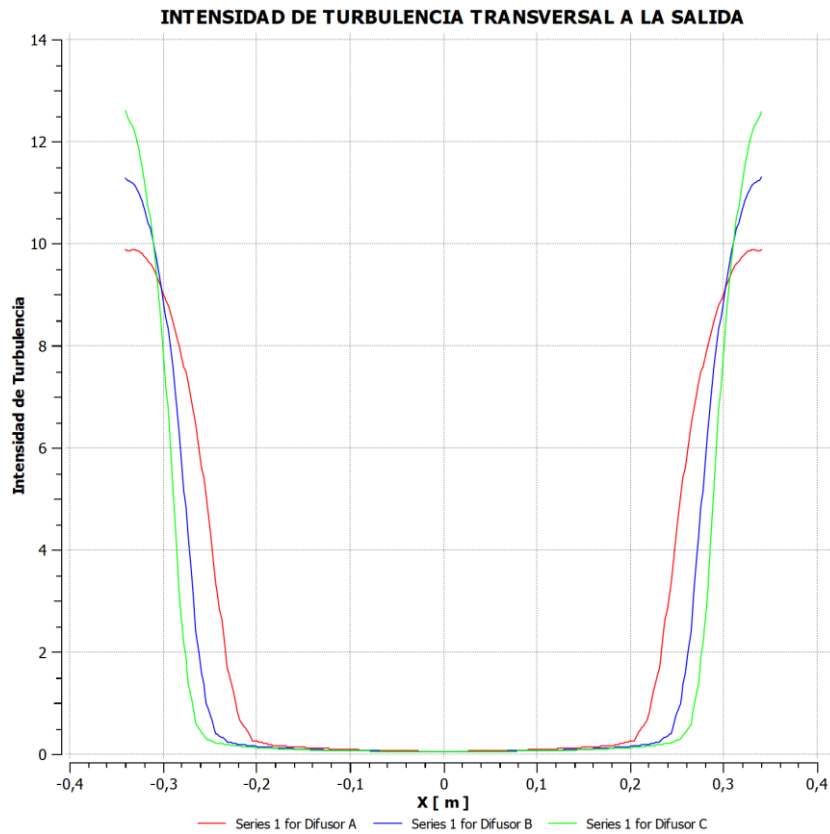
Il·lustració 31. Flux d'aire en els difusors A, B, i C

Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques

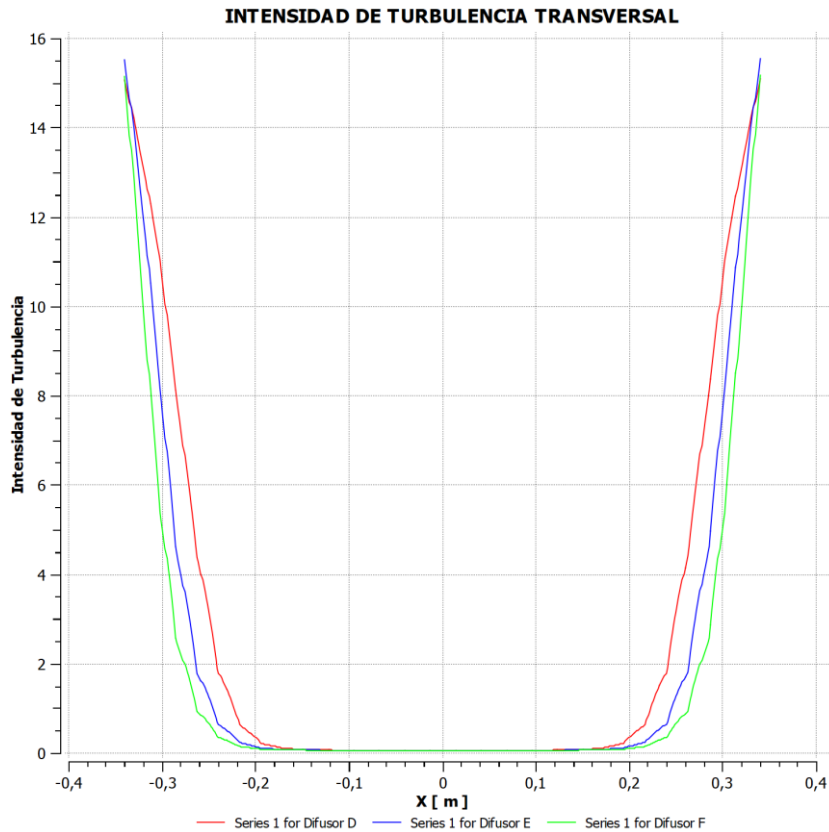


Il·lustració 32. Flux d'aire en els difusors D, E i F

Modificant tant la longitud com la relació d'expansió no produeix despreniment de flux ni turbulències amb flux net aigües amunt, per la qual cosa tots els dissenys són vàlids. Tenint en compte que el difusor desemboca en el ventilador, és convenient també que les turbulències no siguin altes, ja que això pot afectar el rendiment d'aquest; a major turbulència, major imprevisibilitat i inestabilitat.



Il·lustració 33. Gràfica d'intensitat de turbulències a l'eixida del difusor al llarg de l'eix transversal horitzontal dels difusors A, B, i C



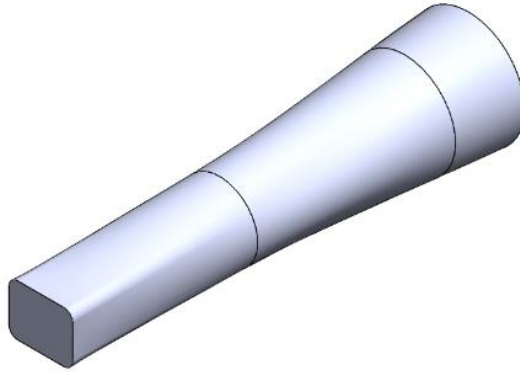
Il·lustració 34. Gràfica d'intensitat de turbulències a l'eixida del difusor al llarg de l'eix transversal horitzontal dels difusors D, E, i F

Prop de les parets s'aprecia una major diferència de turbulències entre els models, encara que en la zona central els valors són iguals. Per tant, només hi ha una regió anular (del radi 0'2 al 0'3 m) que presenta una diferència de valors considerable; no és trivial, ja que coincideix amb una gran part del ventilador (flux anular), però tampoc és crític. La principal conclusió a extraure és que un difusor massa llargament pot ser contraproductiu, i pot acabar creant un augment del gruix de la capa límit, i el flux podria desprendre's. Per tant, la longitud ha de ser tan curta com siga possible. D'altra banda, els salts de pressions són molt similars entre els difusors A, B i C, i entre el D, l'E i l'F.

Taula 18. Resultats de la simulació dels difusors A, B, C, D, E, i F

	Longitud (m)	Relació d'expansió	Angle d'expansió $\theta$	Salt de pressions (Pa)
Difusor A	4'5	2:1	2°	376
Difusor B	3	2:1	3°	385
Difusor C	2'25	2:1	4°	389
Difusor D	4'5	3:1	3°	475
Difusor E	3'4	3:1	4°	473
Difusor F	2'7	3:1	5°	466

Tenint en compte aquestes dades, el disseny triat és curt, amb una relació d'expansió intermèdia, i un angle d'expansió mig prou agressiu. No obstant això, no és igual en tota la seua longitud, ja que a poc a poc va augmentant aquest angle, així que és més horitzontal al principi que al final.



*Il·lustració 35. Disseny definitiu del difusor per a la Fase 1*

*Taula 19. Característiques del disseny del difusor de la Fase 1*

	Longitud (m)	Relació d'expansió	Angle d'expansió $\theta$
Difusor Fase 1	2'85	2'5:1	4°

### Zona del ventilador

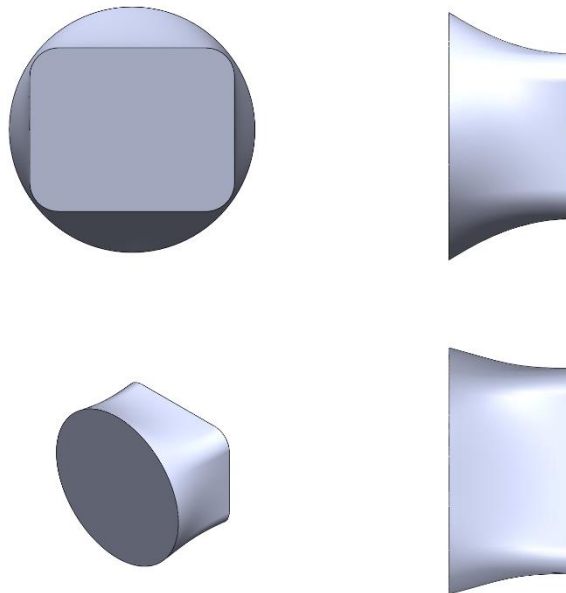
El ventilador és la part del túnel que aporta la velocitat i pressió necessàries al fluid, i el seu disseny queda fora de l'àmbit d'aquest treball. Així doncs, es triarà un model comercial que s'adeqüe a les necessitats, les quals es realitzaran en el següent apartat. Per a aquest primer disseny, no es tindrà en compte com una zona separada de secció constant, sinó que estarà inclòs en el propi difusor.

### 3.3.2. Fase 2. Primera versió completa

En aquest apartat s'exposa el disseny que té la primera versió del túnel complet, per al seu estudi per CFD. Cal tindre en compte en aquest cas la geometria de les unions entre les peces, per la qual cosa s'ha de posar l'accent principalment en la transició con-zona d'assajos, zona d'assajos-difusor, i difusor-ventilador.

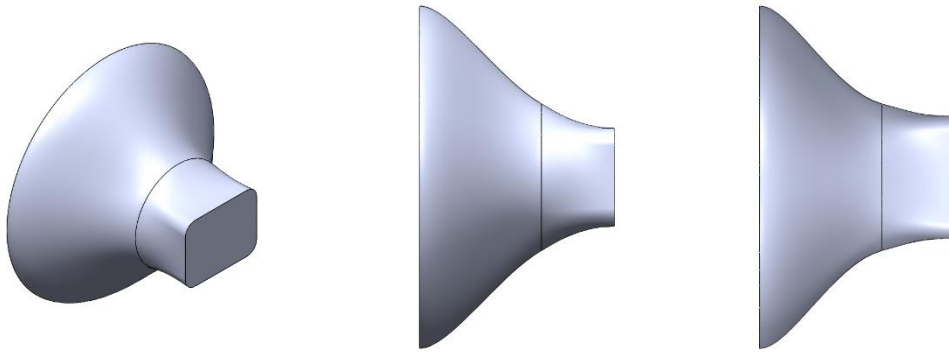
#### Transició con-zona d'assajos

El con de contracció ha de tindre una zona de transició que acomode la secció circular a la rectangular de la zona de proves. Ha de ser també molt suau per a mantindre el flux el més homogeni possible, evitant geometries amb gradients adversos.



*Il·lustració 36. Transició de secció circular a rectangular per a implementació en el con de contracció*

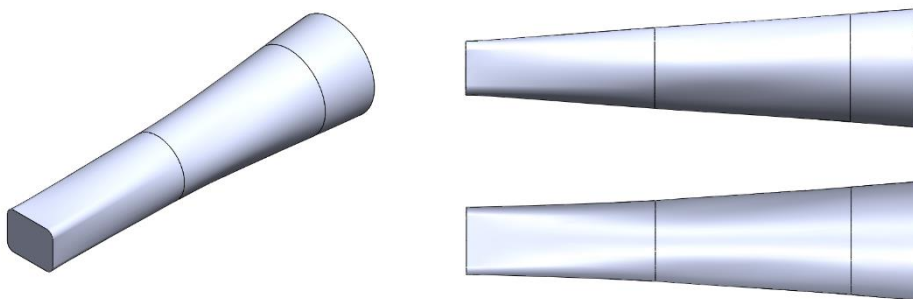
El disseny realitzat correspon a una modificació del con: ara, per la mitat, quan comença a canviar la seua curvatura, es procedeix a transformar la geometria en la secció rectangular, assegurant una transició de geometria suau.



*Il·lustració 37. Con de contracció de la Fase 2*

### Difusor

En el cas del difusor, es troba un problema similar: transició de secció rectangular a circular. El difusor es parteix en dos, igual que el con, i és la primera part la que fa un canvi molt més sostingut, per a evitar la possible separació de flux en el principi del túnel. Un difusor genera gradients adversos per la seua pròpia forma divergent, per la qual cosa aquest canvi de secció és el més crític de tot el túnel. En cas de separació de flux, es pot col·locar una pantalla de turbulències a l'entrada per a intentar controlar i reduir les turbulències.



*Il·lustració 38. Difusor de la Fase 2*

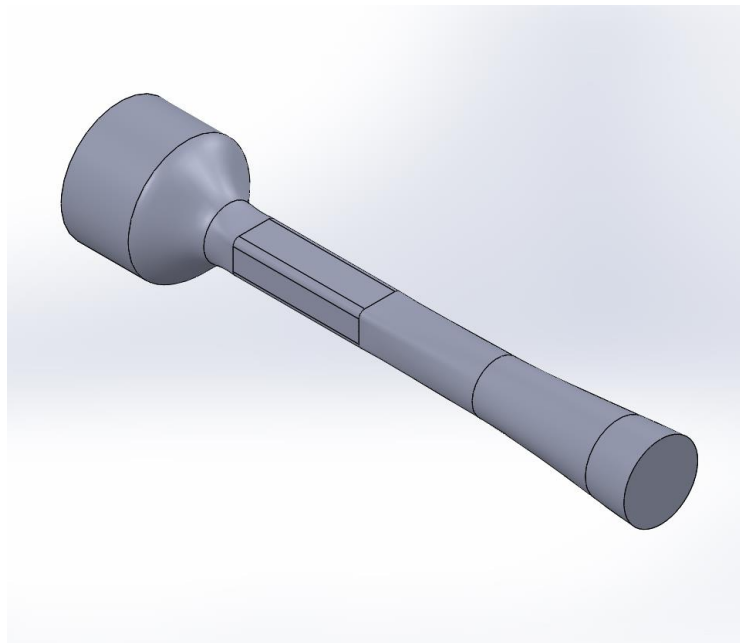
## Ventilador

Finalment, per al ventilador cal mantindre una zona de secció constant, per a permetre el seu correcte acoble i funcionament. El ventilador seleccionat tindrà la seua pròpia carcassa, per la qual cosa aquesta última part se simplificarà en el model com un cilindre d'1 metre de llarg. Finalment, per a l'eixida del túnel, es pot emprar un xicotet difusor extra, amb una certa forma de "trompeta", i aprofitar així que després del ventilador l'aire serà capaç d'aguantar una mica més d'expansió.

Aquesta part anirà just després del difusor mostrat, però no es considerarà en aquesta fase, perquè és necessari tindre unes dades de salt de pressions més fiables per a poder seleccionar el ventilador, que pot tindre diferents diàmetres. Per tant, en la fase 3, en el disseny definitiu, sí que es tindrà en compte tant la secció del ventilador com en la trompeta d'eixida.

## Models per a la simulació

Es realitzaran tres simulacions d'aquest túnel: un sense model, un altre amb un model dins lleugerament per damunt del límit del 5% de bloqueig lateral, i un altre completament sobredimensionat.



*Il·lustració 39. Model interior complet del túnel per a la Fase 2*

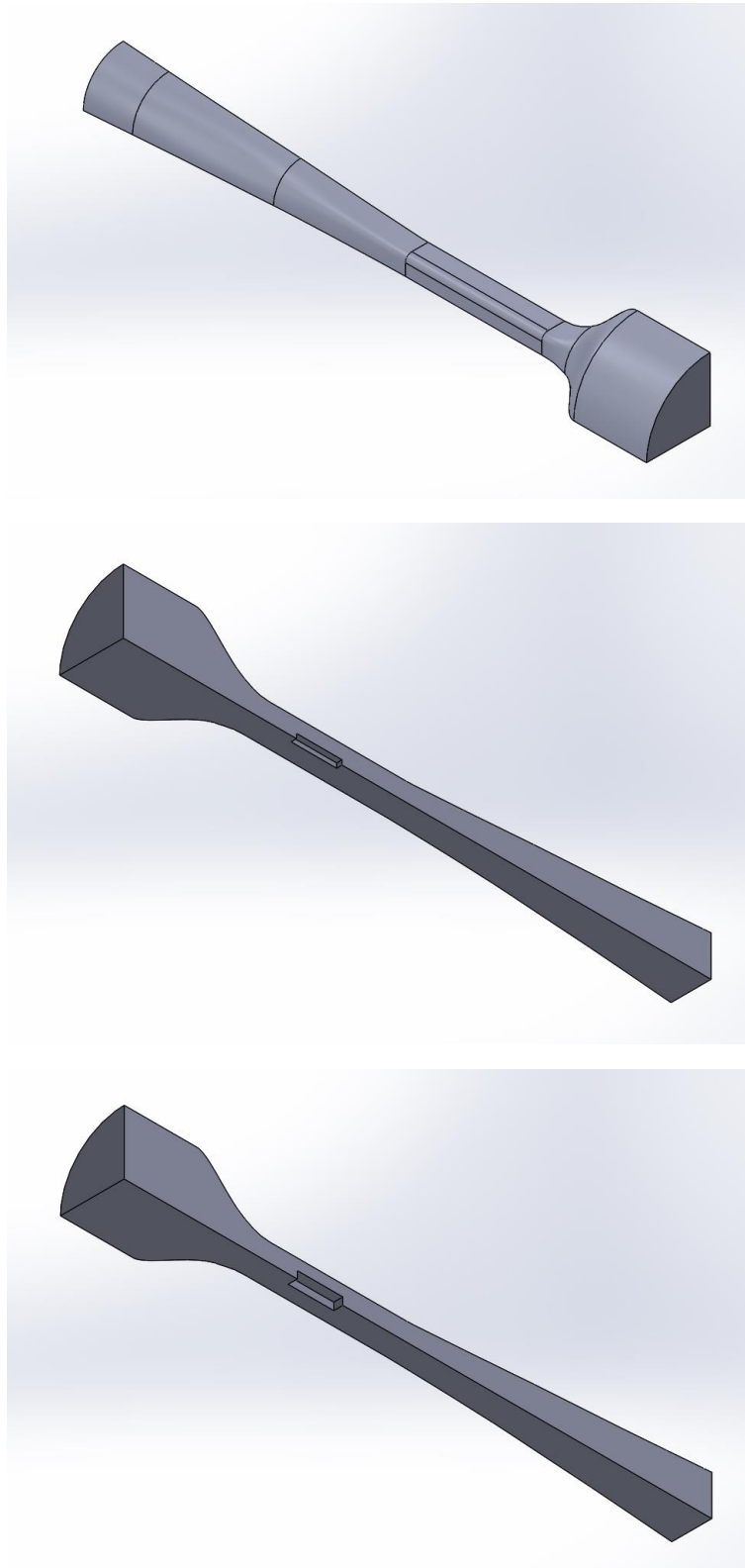
Per a facilitar l'emmallat i el càlcul, s'aprofitaran dos plans de simetria per a reduir el domini de càlcul a un quart. El model emprat serà un prisma rectangular, ja que és un cos rom i senzill que genera bastants turbulències en comparació amb un cotxe, per la qual cosa es podrà assegurar que, si no hi ha problemes amb ell, no n'hi haurà en el túnel real.



*Taula 20. Dimensions dels obstacles inclosos en els models*

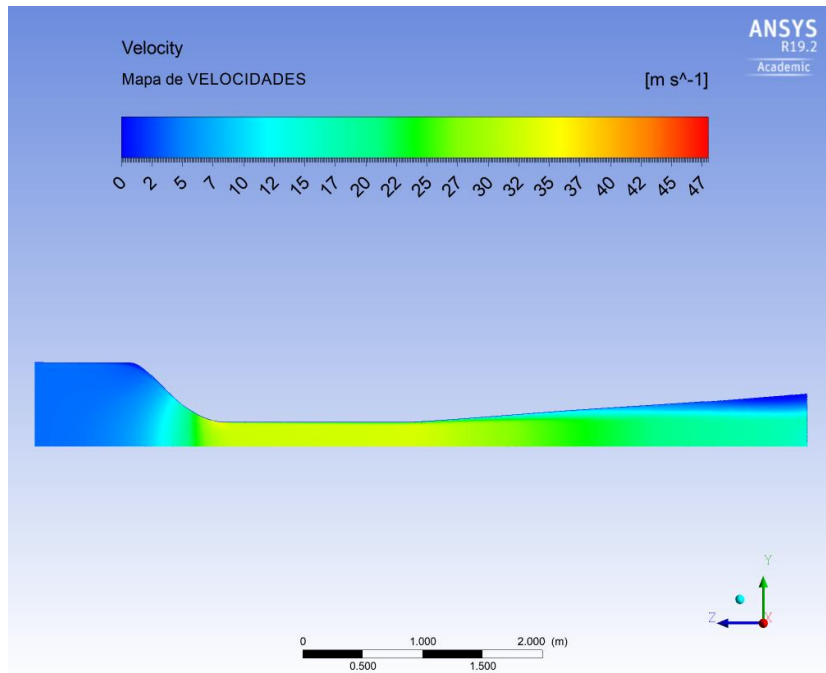
	Ample (mm)	Alt (mm)	Llarg (mm)	Bloqueig frontal
Obstacle Normal	120	100	500	6%
Obstacle Gran	200	160	500	15%

En la següent pàgina es poden observar els tres models emprats per a la simulació per CFD del túnel de la fase 2.

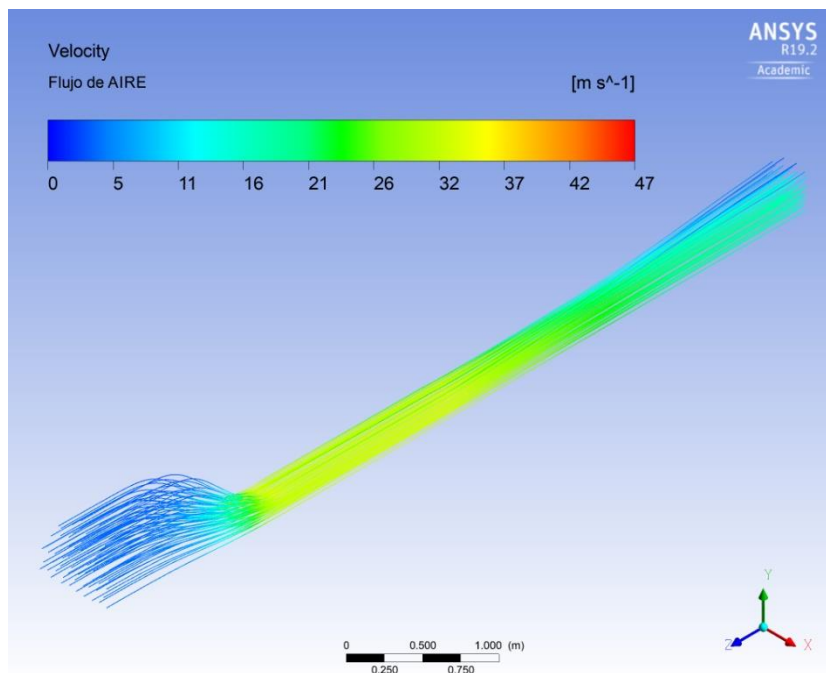


*Il·lustració 40. Models del túnel de la Fase 2, tallats en un quart. De dalt a baix: Túnel sense obstacle, amb obstacle normal, i amb obstacle gran*

Simulació

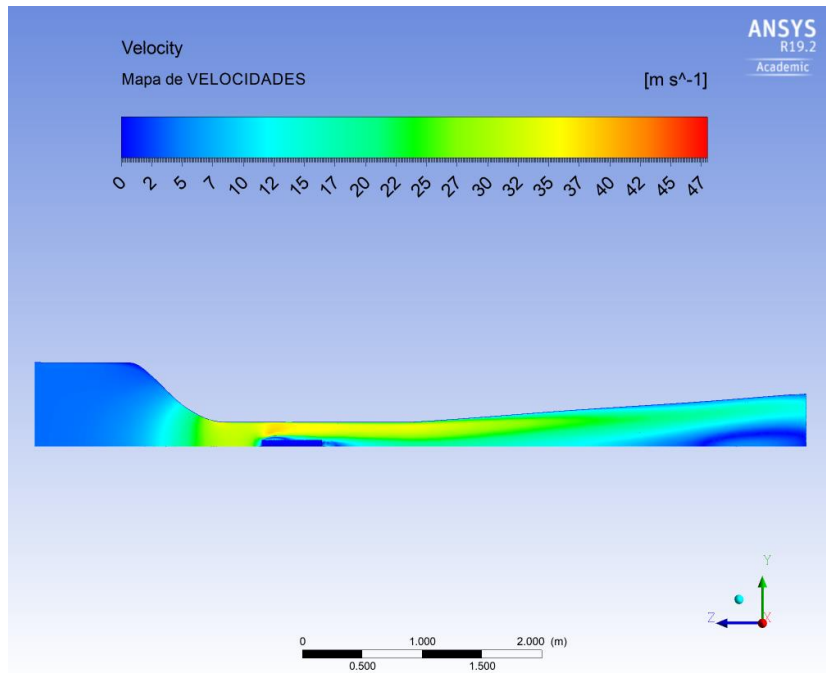


Il·lustració 41. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel sense obstacle

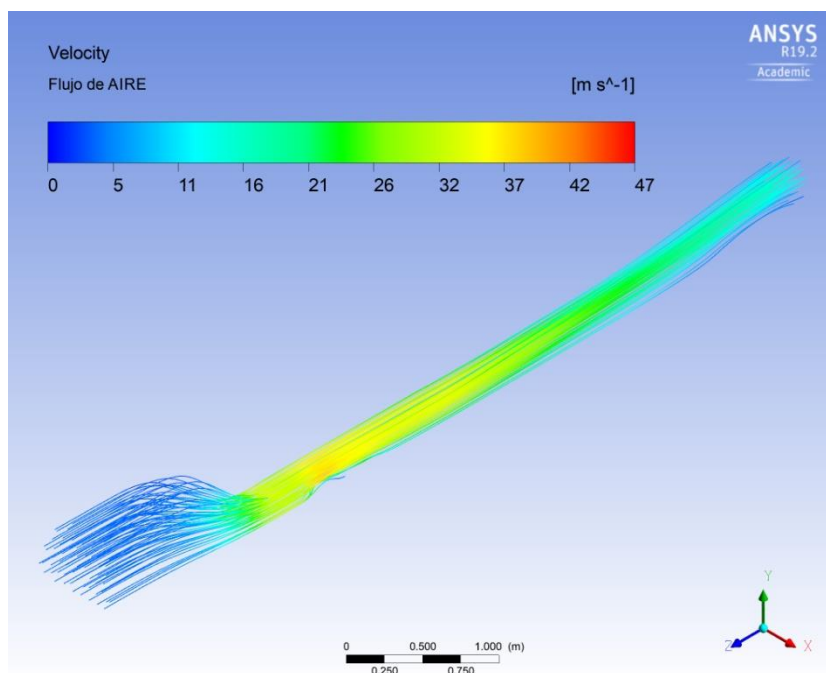


Il·lustració 42. Flux d'aire en el túnel sense obstacle

En aquesta primera simulació sense obstacle, es pot observar com fins a la meitat del difusor el flux és bo, però a partir de llavors es produeix un creixement molt gran de la capa límit (Imatge 41), encara que no s'aprecia un desprendiment de la mateixa (Imatge 42).

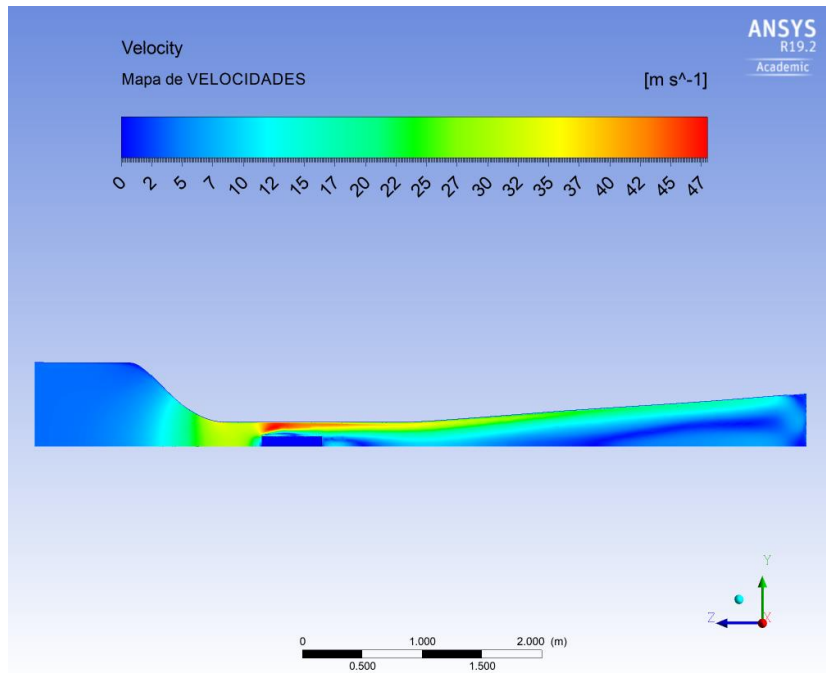


Il·lustració 43. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel amb obstacle normal

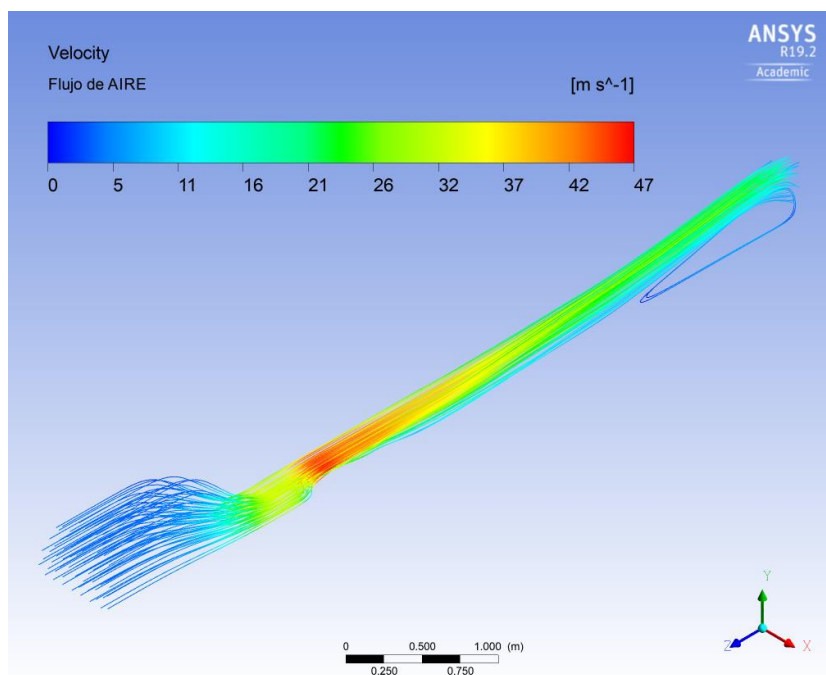


Il·lustració 44. Flux d'aire del túnel amb obstacle normal

En aquest cas, l'obstacle genera una espècie de buit en la zona central del difusor, però el flux no es desprèn de les parets. No obstant això, sí que s'aprecia en la imatge com hi ha una recirculació de l'aire en la mateixa zona central. No és especialment greu tenint en compte que el ventilador no rep aire de la zona central (flux anul·lar), però evidència que el funcionament del difusor és massa susceptible a les turbulències.



Il·lustració 45. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel amb obstacle gran



Il·lustració 46. Flux d'aire del túnel amb obstacle gran

Seguint amb l'anàlisi anterior, la col·locació d'una maqueta de major grandària genera un mal funcionament del túnel, i les pèrdues augmenten de gran manera. Es torna a notar una recirculació en la zona central del difusor, en aquest cas encara més gran.

## Resultats

Com es pot observar, les línies de flux en el primer cas es mantenen paral·leles les unes amb les altres. No obstant això, en el cas dels models, s'aprecia en la zona central del túnel una sèrie de turbulències que poden afectar el rendiment del ventilador, i augmentar les pèrdues de càrrega al llarg del túnel.

No s'arriba a apreciar una separació de flux clara en el cas sense obstacle, però sí un creixement gran de la capa límit. Així i tot, aquesta separació pot ser preocupant durant la prova d'algun model. És per tant necessari realitzar un redisseny del difusor, afegint un angle equivalent d'expansió menor.

La potència requerida d'un cas a un altre sí que és considerable, ja que en per al túnel sense model el salt de pressions és de 166 Pa, però en el cas intermedi és de 209 Pa, i en l'extrem és de 465 Pa. Això suggereix un augment de potència del 181%, per la qual cosa seria adequat reduir aquesta sensibilitat del túnel als models.

*Taula 21. Salt de pressions i potència de pèrdues de la simulació de la Fase 2*

	Sense Obstacle	Obstacle Normal	Obstacle Gran
Salt de pressions (Pa)	166	209	465
Potència de pèrdues (kW)	1	1'26	2'81

## Discussió

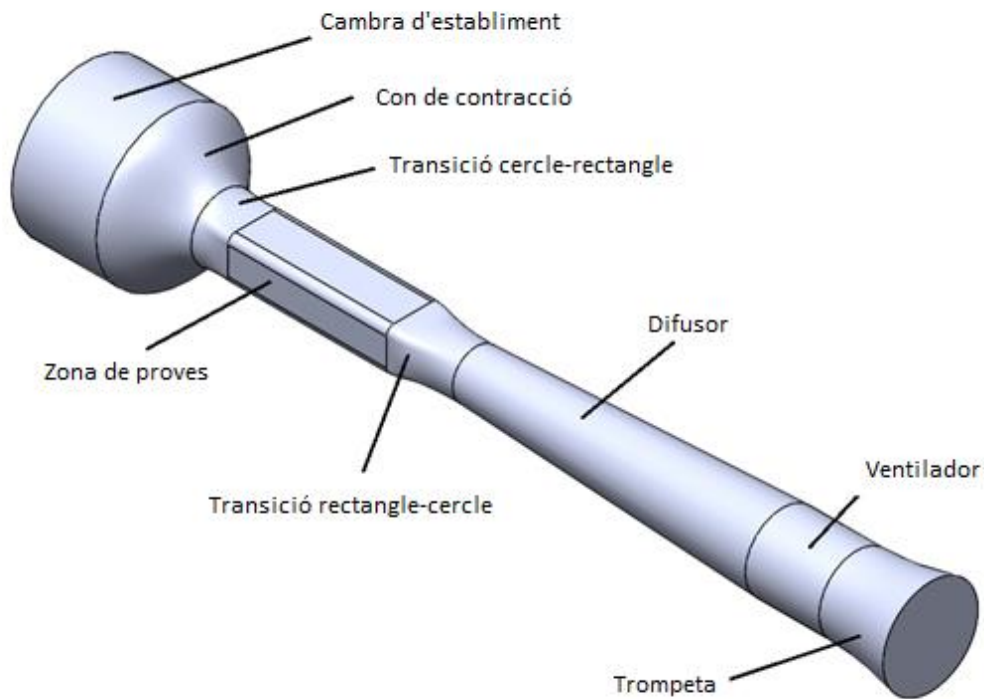
El disseny actual del túnel es mostra, abans de res, inestable. És molt sensible a les turbulències generades per un cos rom en la zona d'assajos. Aquestes turbulències es poden intentar controlar mitjançant una secció lleugerament més estreta després de la zona d'assajos per a obligar les línies de flux a reorganitzar-se. A part, és convenient reduir l'expansió del difusor, que sembla massa agressiva: és necessari fer-ho més llarg, corrent el risc, això sí, que la capa límit també cresca massa cap al final. Per a això, també es pot col·locar el ventilador una mica abans, deixant un difusor final amb una geometria de "trombó" o "trompeta" més agressiva.

### 3.3.3. Fase 3. Versió interior definitiva

#### Redisseny

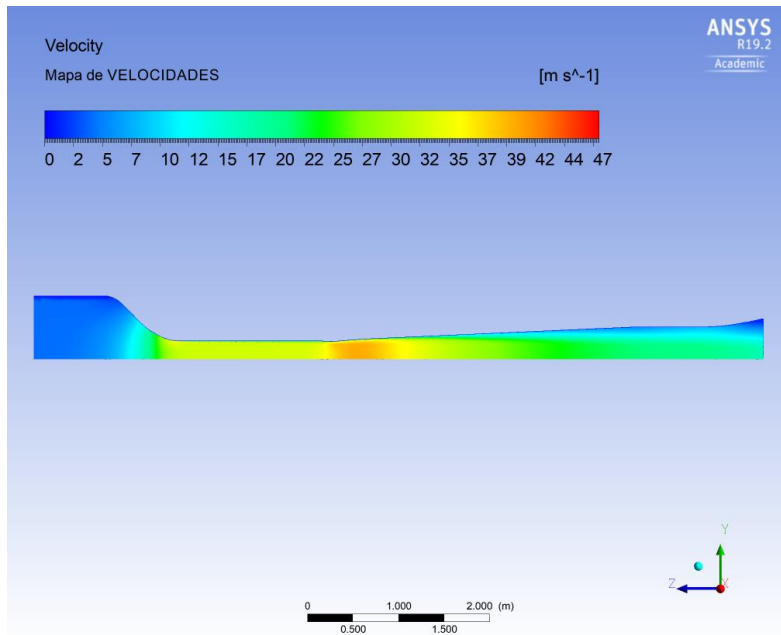
En aquesta fase es procedeix a realitzar els següents redissenys:

- Difusor més llarg i amb menor inclinació.
- Entrada al difusor amb transició més curta, amb un lleuger abombament per a intentar redirigir el flux, a canvi d'unes majors pèrdues.
- S'ha d'adequar el perfil a l'entrada del ventilador, que se substituirà per una zona de secció constant.
- Aprofitant el flux que ix del ventilador, que serà lleugerament centrífug (efecte *twister*) es realitzarà una trompeta amb una expansió major.

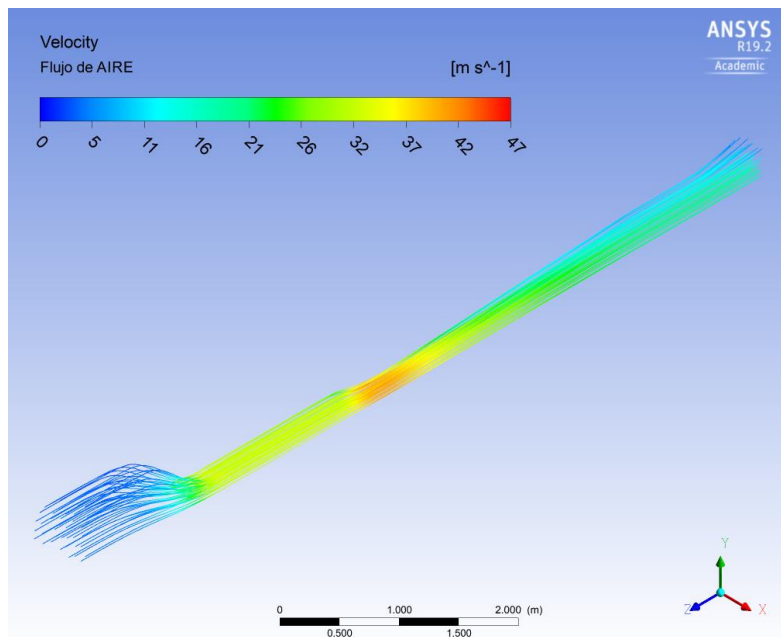


Il·lustració 47. Redisseny del túnel de vent per a la Fase 3

## Simulació



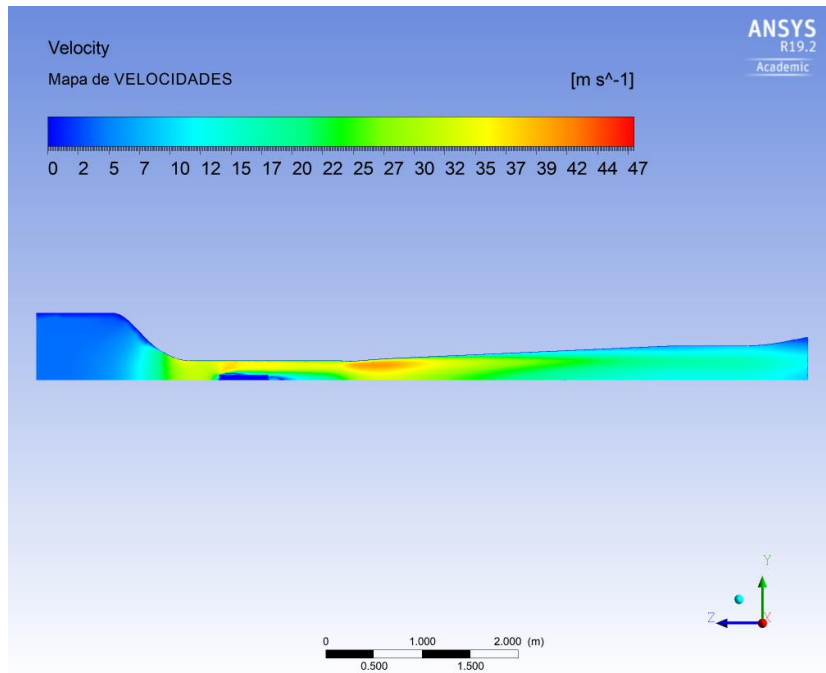
Il·lustració 48. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel sense obstacle



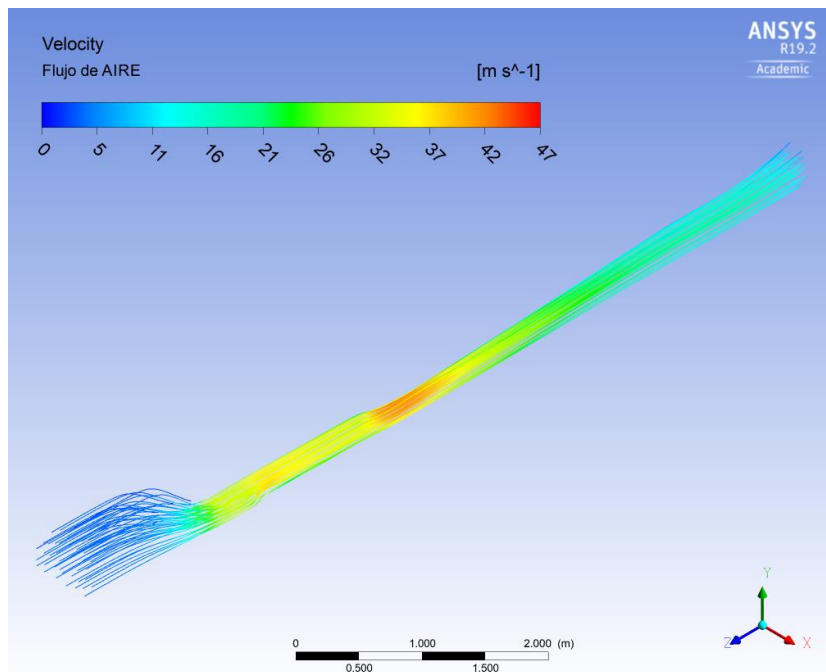
Il·lustració 49. Flux d'aire del túnel sense obstacle

En aquesta primera simulació sense obstacle, s'aprecia una gran millora en la part mitjana del difusor: es veu un lleuger increment de la capa límit, molt de menor que en el disseny de la fase 2 però que, a més, torna a reduir-se en la zona del ventilador. Hi ha una separació en la zona de la trompeta, però no es pot considerar que les dades siguin totalment fiables, ja que en aquesta secció es generarà un flux rotatiu a causa del ventilador que no s'ha tingut en compte. En termes generals, la millora és palpable i evident.



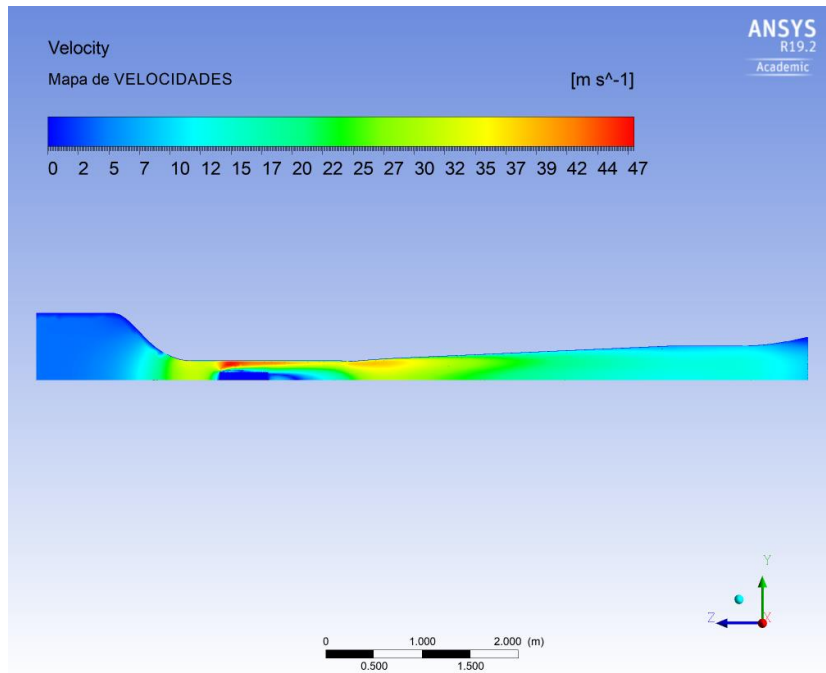


Il·lustració 50. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel amb obstacle normal

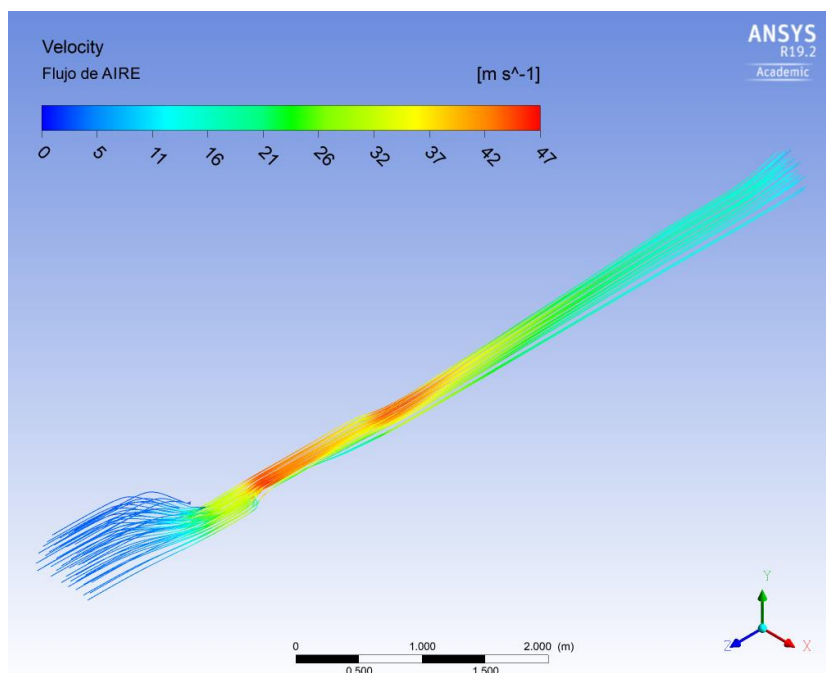


Il·lustració 51. Flux d'aire del túnel amb obstacle normal

En aquesta simulació, s'observa amb claredat com el buit en la zona central s'ha eliminat, i ja no es generen turbulències ni recirculacions en aquesta. Més important encara, el camp de velocitats és molt similar al de la simulació sense obstacle, mostrant que aquest disseny és més robust front a les pertorbacions dels models.



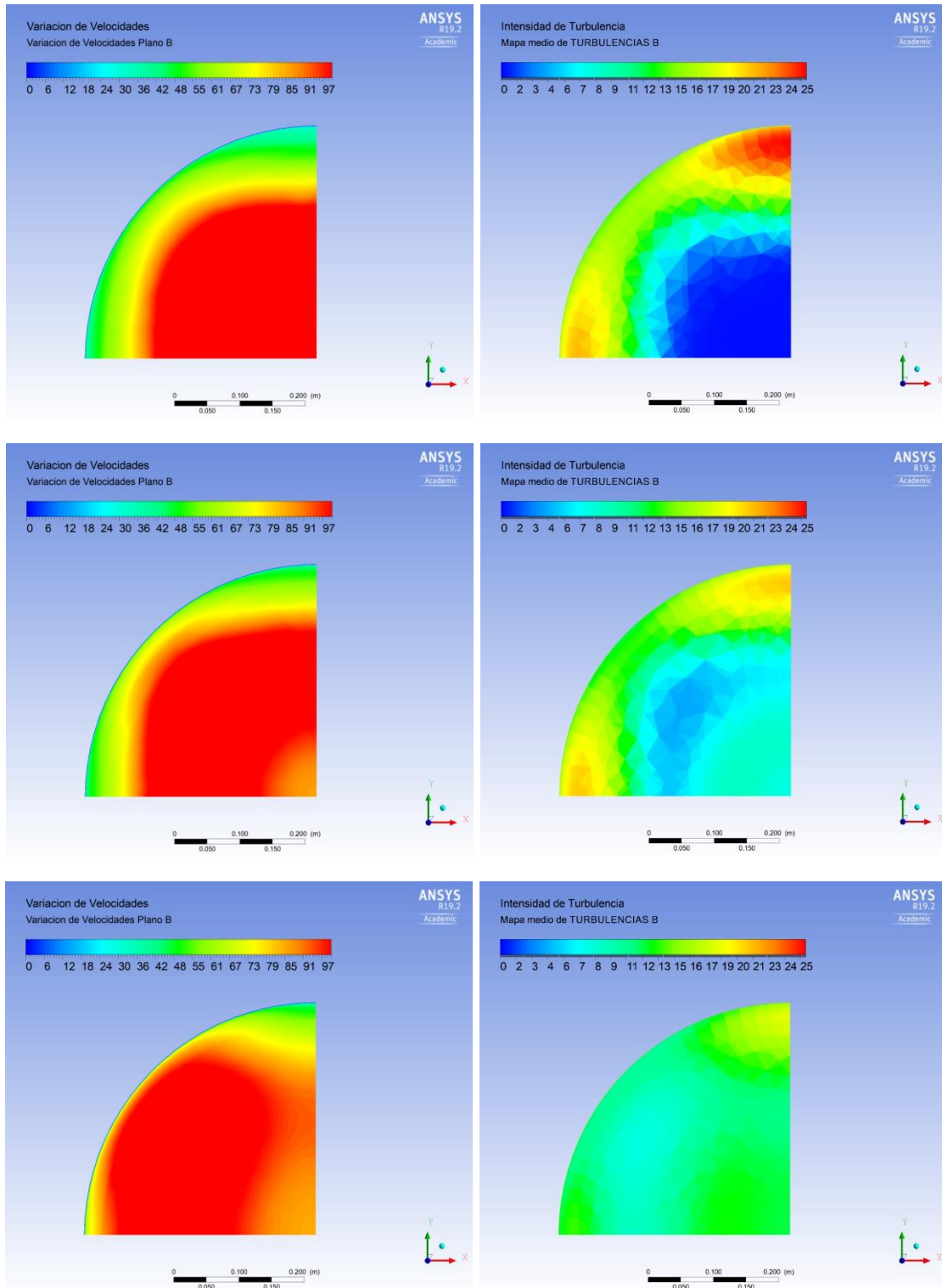
Il·lustració 52. Mapa de velocitats en el pla YZ del túnel amb obstacle gran



Il·lustració 53. Flux d'aire del túnel amb obstacle gran

Finalment, aquesta simulació segueix en la línia de les altres dues: robustesa front a perturbacions, camp de velocitats molt similar a la resta, i no hi ha ni recirculacions ni turbulències cap al final del túnel. Si s'atén la zona de transició de la zona de test al difusor, sembla ser clau en la producció d'un flux més uniforme que evite diferències entre casos amb model i sense ell.

- Zona del ventilador



Il·lustració 54. Variació de velocitats (columna esquerra) i intensitat de turbulències (columna dreta) en l'eixida del difusor per als tres casos estudiats

En els tres casos s'aprecia un flux relativament uniforme, amb una capa límit d'un gruix molt superior al de la zona de proves, encara que en el cas de l'obstacle gran les diferències de velocitats estan distribuïdes de forma una mica diferent: no sorprén, tenint en compte que les turbulències són molt majors al que el túnel està dissenyat per a suportar. Així i tot, el patró no és molt més diferent, per la qual cosa es redunda en el fet que el túnel és robust enfront de les perturbacions. Cal apuntar una xicoteta reducció de velocitat en la zona central en el cas dels obstacles, encara que tenint en compte que el flux en la zona del ventilador és anul·lar (el cercle central del ventilador no actua ací), no suposen un problema.

Quant a les pròpies turbulències, en els dos primers casos la distribució és la mateixa, i la tercera és també molt parella. Només varien els valors que, evidentment, són majors conforme l'obstacle augmenta de grandària.

En la següent taula es resumeixen els salts de pressions i la potència de pèrdues per a cada cas del nou disseny, apuntant també quant s'ha millorat respecte al segon disseny.

*Taula 22. Salt de pressions i potència de pèrdues de la simulació de la Fase 3*

	Sense Obstacle	Obstacle Normal	Obstacle Gran
Salt de pressions (Pa)	182	205	320
Potència de pèrdues (kW)	1'1	1'25	1'94
Variació front a la Fase 2	+10%	-1%	-31%

S'ha produït un augment de les pèrdues en el cas del túnel sense obstacle, però en el de l'obstacle normal s'han mantingut quasi constants i, sobretot, s'han reduït de gran forma per a l'obstacle gran. Encara que puga semblar que un augment en el primer cas puga ser perjudicial, la veritat és que no ho és, perquè allò interessant són les pèrdues que es produeixen amb els models, que és la forma en la qual s'emprarà el túnel, òbviament. El principal objectiu era reduir la sensibilitat del túnel als diferents models, reduint especialment el gran salt que hi ha entre els dos models provats, i com es pot veure, la reducció és molt significativa. Per tant, es pot concloure que el nou disseny millora les àrees proposades després del disseny de la Fase 2.

## Discussió

Al principi del punt 3 es van definir les característiques de disseny a complir pel túnel de vent, en la taula 1, que es recorda a continuació.

Taula 23. Requisits del túnel de vent

Velocitat en la zona de proves	30 m/s
Turbulència en la zona de proves	<1%
Variació màxima de velocitat en la zona de proves	<1%
Ample de model màxim permès	10 cm

L'ample màxim de model s'ha complit ja en la Fase 1, ja que la grandària de la zona de proves s'ha basat en aquesta dada. Quant a la velocitat en la zona de proves, es pot observar en les següents imatges com se superen els 30 m/s, complint amb el primer punt.

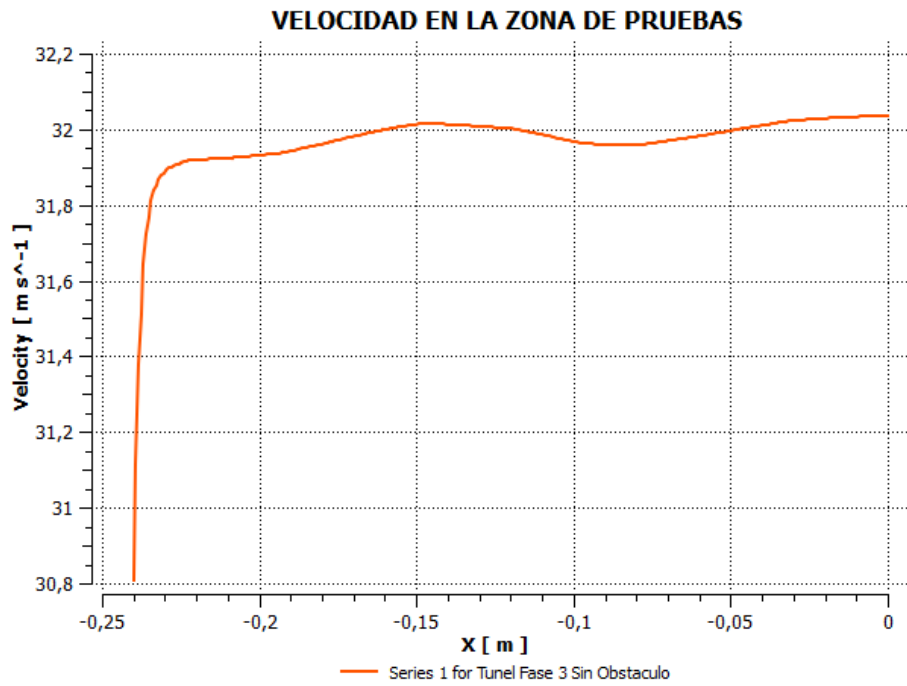
## Primer disseny realista sobre la base de la Fase 3

Una vegada es té la geometria interna desitjada, s'ha de dissenyar un model CAD del túnel buit, amb les formes bàsiques que ha de tindre (pestanyes, unions, etc). Per a això, mitjançant l'eina *Solidworks*, se li ha aplicat un buidatge cap a fora amb una grossària de 10 mm en totes les superfícies. A més, s'ha dividit en les diferents parts, i s'ha afegit en els límits de cada peça unes pestanyes per a posteriorment poder unir-les. El disseny és el següent:

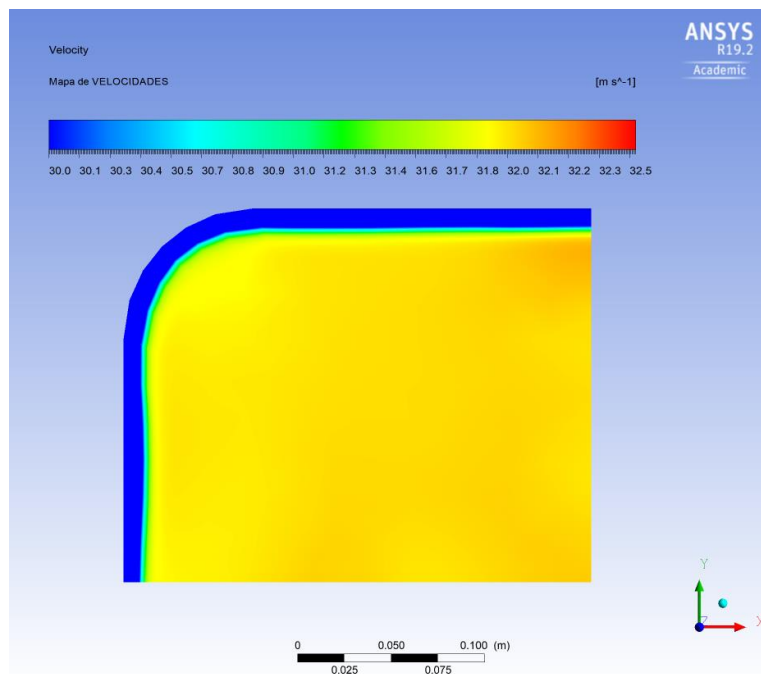


Il·lustració 55. Primer disseny realista sobre la base del disseny de la Fase 3

- Velocitat



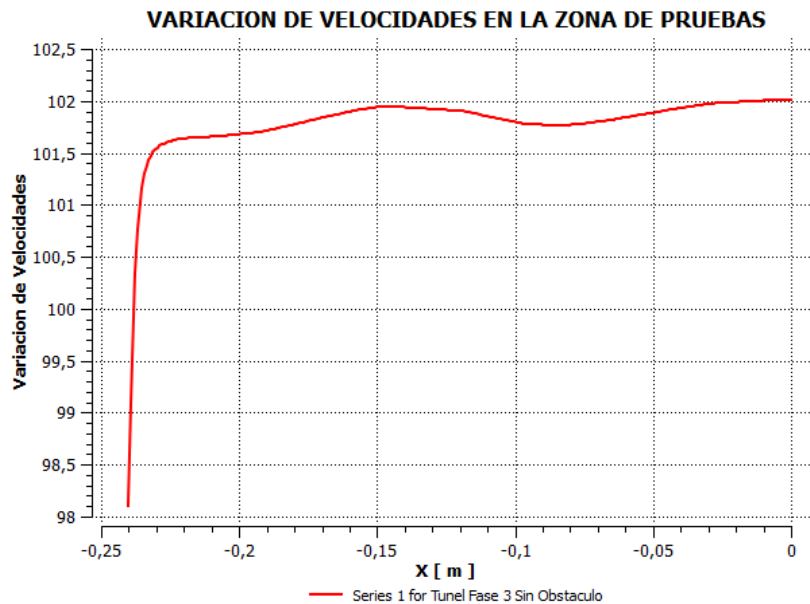
Il·lustració 56. Gràfica de velocitats a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle, al llarg de l'eix transversal horitzontal



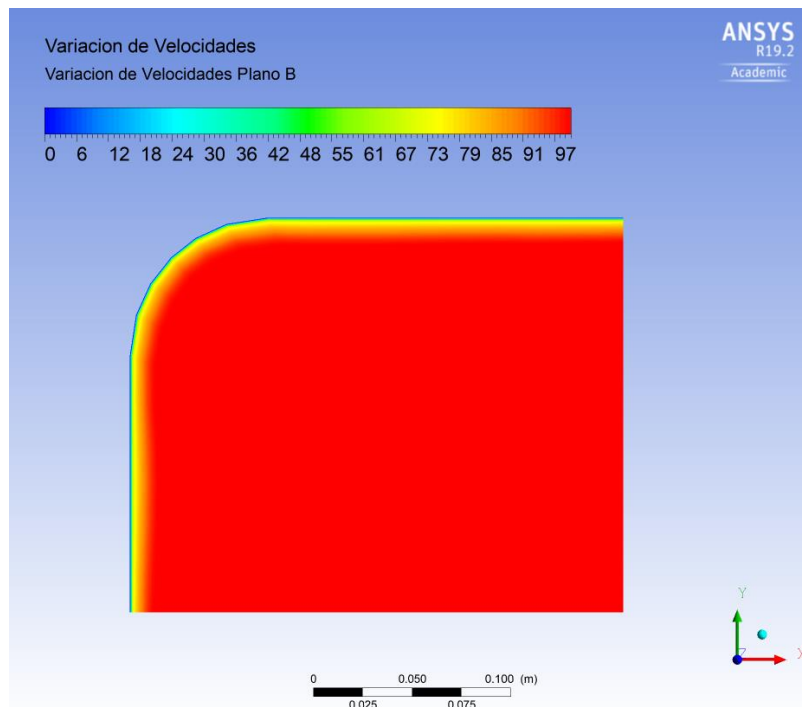
Il·lustració 57. Mapa de velocitats a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle

- Variació de velocitats

En el que concerneix la variació de velocitats, també es compleix el requisit de no superar una variació de l'1%. Es pot observar en les següents dues imatges, que són una gràfica i un mapa de colors que mostren en percentatge la relació de velocitat en cada punt respecte a la mitjana de la secció.



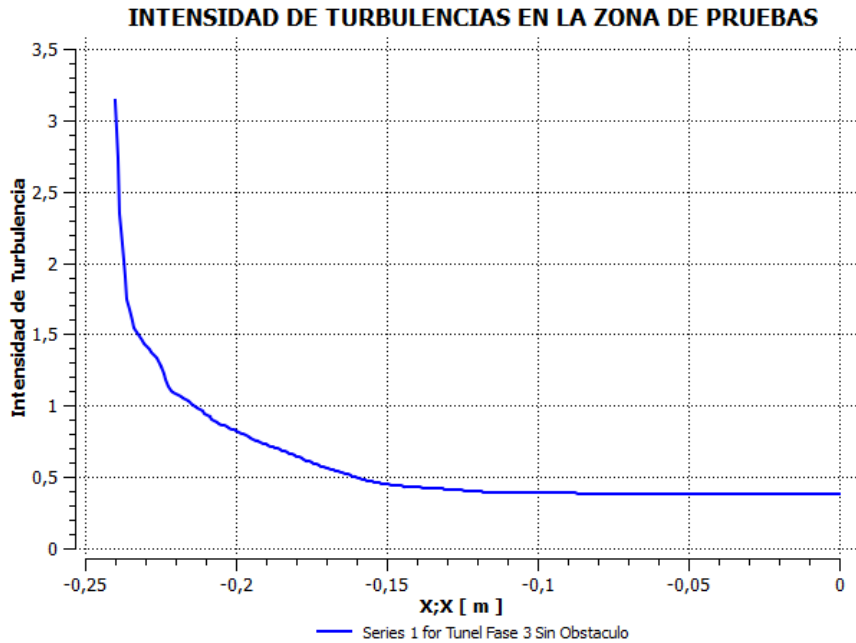
Il·lustració 58. Gràfica de variació de velocitats a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle al llarg de l'eix transversal horitzontal



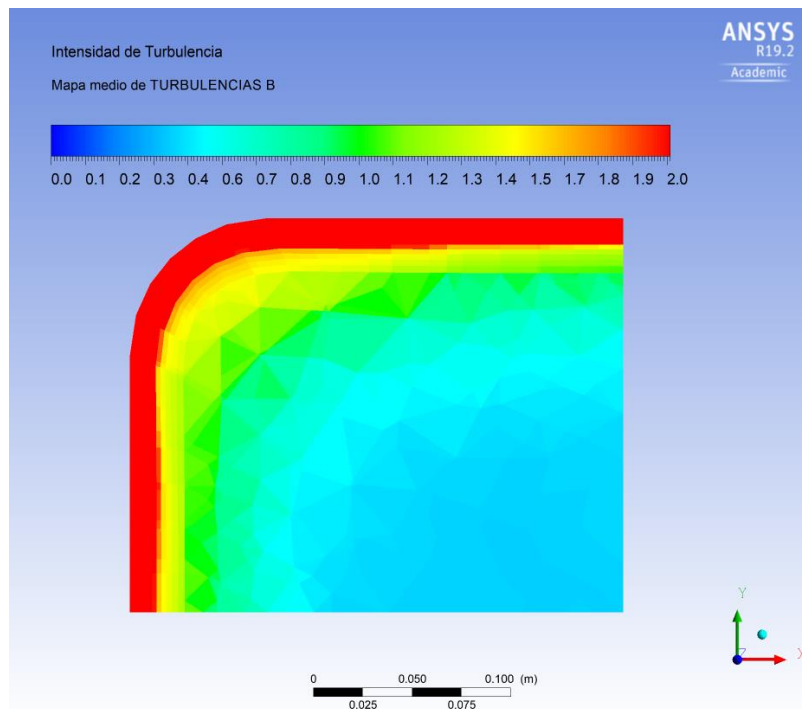
Il·lustració 59. Mapa de variació de velocitats a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle

- Intensitat de turbulències

Finalment, s'exigia el requisit que la intensitat de turbulències fora inferior a l'1% en la zona de proves i, de nou, en les dues imatges a continuació es pot comprovar com es compleix perfectament.



Il·lustració 60. Gràfica d'intensitat de turbulències a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle, al llarg de l'eix transversal horitzontal



Il·lustració 61. Mapa d'intensitat de turbulències a la meitat de la zona de proves del túnel sense obstacle



En resum, els objectius de qualitat i velocitat de l'aire en la zona de proves han sigut aconseguits, com s'ha pogut comprovar en aquest apartat: La variació de velocitats és inferior a l'1%, la turbulència també és inferior a l'1%, i la velocitat aconseguida supera l'objectiu dels 30 m/s.

### 3.4. Càlculs - predimensionat

Per a poder tindre una idea dels esforços i les tensions, és convenient realitzar un primer càlcul a mà de les zones més crítiques, i després un altre càlcul mitjançant el mètode d'elements finits amb un disseny semidefinitiu de les peces.

La zona més crítica és aquella que suporta més pes, és a dir, la zona de proves. La resta de peces només ha de ser capaç de suportar el seu propi pes, és a dir, ser autoportant. D'altra banda, el ventilador és la zona més pesada, però l'estructura ja ve dissenyada pel propi fabricant, per la qual cosa no és preocupant per a aquest treball.

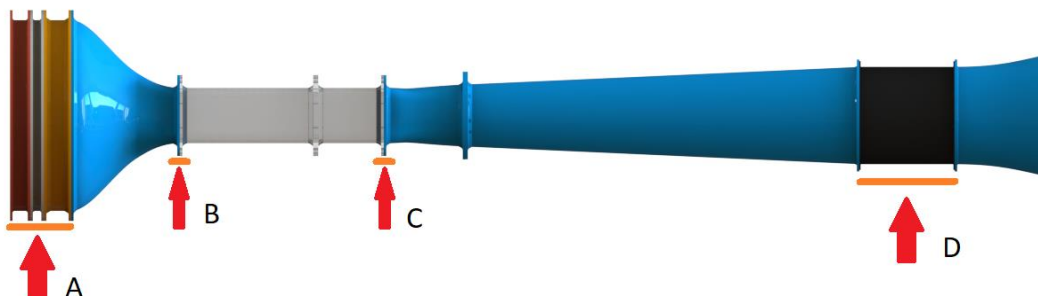
#### 3.4.1. Suports

En primer lloc, és necessari definir la col·locació dels suports, i per a això s'ha de tindre una idea de quant pes se suporta en cada part. L'eina de CAD permet conèixer el volum de cada peça, i sabent que el material emprat serà un plàstic, es pot emprar una densitat típica d' $1 \text{ kg/m}^3$ , pròxima a valors del polietilè o del polipropilè; d'aquesta manera, es pot conèixer aproximadament la massa de cada peça. A més, l'únic pes extra a tindre en compte és el que es pose en la zona de proves, que tenint en compte instrumentació i models, no ha de superar els 5kg. En la següent taula es recullen els pesos resumits de cada secció:

Taula 24. Pesos de cada part del túnel de vent

	Cambrada d'establiment	Con de contracció	Zona de proves	Difusor	Ventilador	Trompeta
Massa (kg)	78	28	58	52	150	13
Percentatge	21%	7%	15%	14%	40%	3%

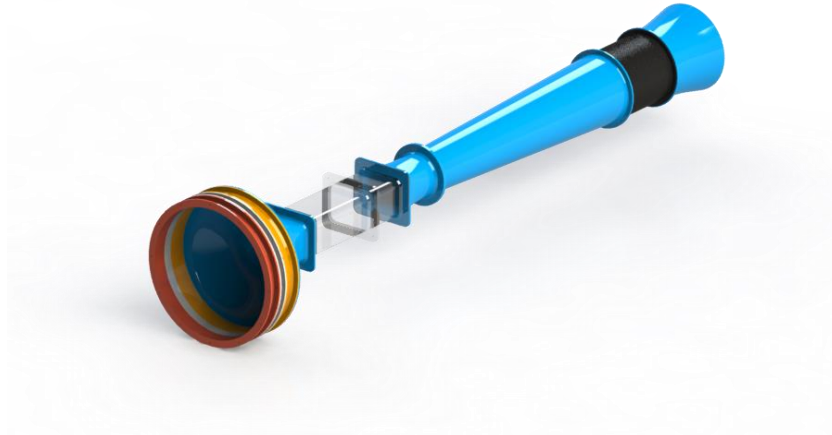
En vista d'aquestes dades, s'ha triat realitzar quatre suports: un per a la cambra d'establiment (A), dos a l'inici i al final de la zona de proves (B i C), i un últim especial per a la zona del ventilador (D). Es poden observar en la següent imatge:



Il·lustració 62. Esquema indicatiu dels suports del túnel de vent

### 3.4.2. Càlcul per mètodes finits – predimensionament

Per a comprovar que el túnel pot resistir les càrregues suportades, s'emprarà el mòdul *Static Structural* d'ANSYS. La geometria que s'emprarà és el primer disseny realista, basat en la Fase 3, que es va realitzar en el punt 3.3.3. Per a major comoditat, s'adjunta la següent imatge en la qual es troba aquest model.



*Il·lustració 63. Model del túnel de vent per a predimensionament. Versió no definitiva.*

Cal no oblidar que es tracta només d'un model previ, no està detallat. D'altra banda, els materials emprats per a aquesta primera simulació, seleccionats de manera arbitrària, són els següents:

*Taula 25. Materials per a la simulació de predimensionament*

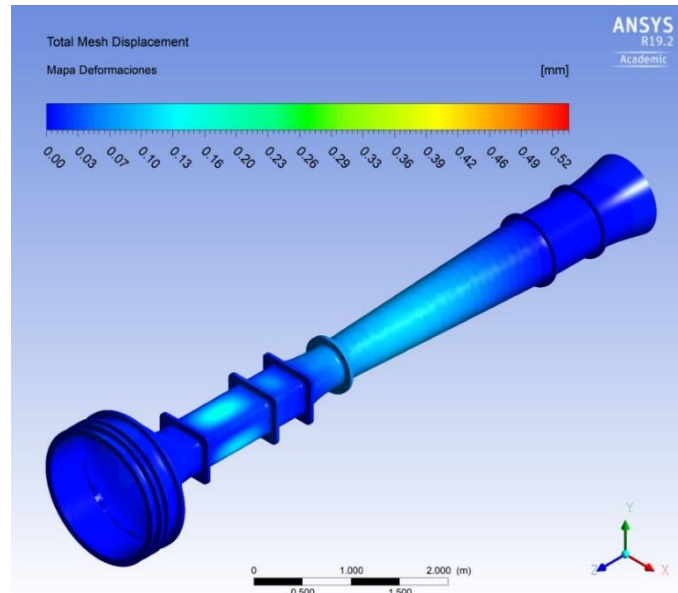
Component	Resta de peces	Ventilador
Material	Poliestiré (PS)	Acer estructural

El poliestiré és un plàstic molt emprat, de bones propietats, per la qual cosa serveix per a aquest cas com a material genèric. El ventilador, en estar provat pel propi fabricant, se li ha assignat acer estructural per defecte. Per últim, les càrregues col·locades són:

*Taula 26. Càrregues col·locades per a la simulació de predimensionament*

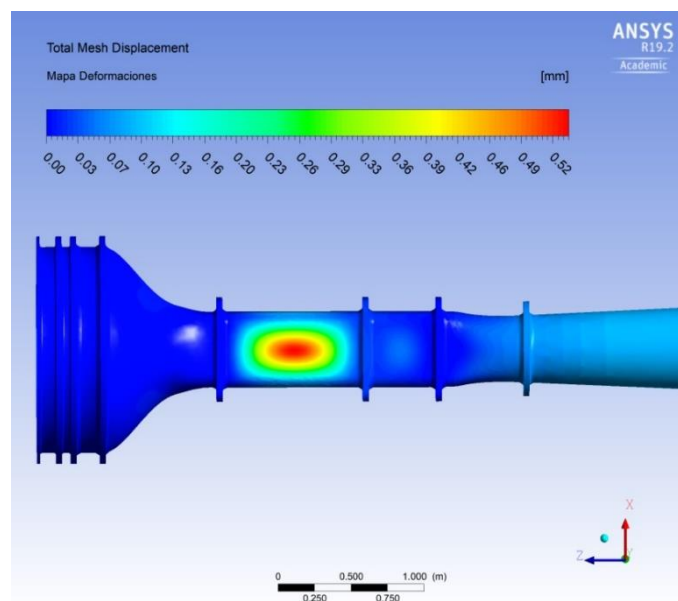
Càrrega	Gravetat	Pes de la bresca	Pes del ventilador	Càrrega màxima en la zona de proves
Valor (N)	(Pes propi de cada peça)	200	1500	50

Els resultats són els següents: Ateses les deformacions, sota aquestes càrregues no hi ha valors superiors al mil·límetre de variació, per la qual cosa compleix perfectament, mantenint correctament la forma interior dissenyada. Una deformació major podria començar a donar problemes, especialment quan el túnel estiga a màxim rendiment, que és quan és més sensible a les variacions en les formes.



Il·lustració 64. Deformacions en el predimensionament

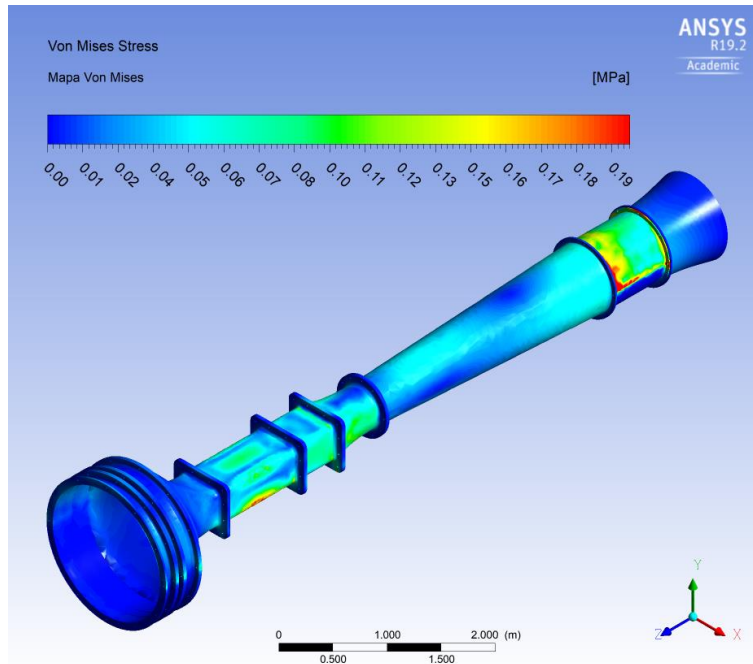
Els suports es mostren adequats: són suficients, i brinden un bon suport al túnel complet. Els tres primers eviten que el túnel haja de treballar a flexió innecessàriament, mentre que el quart transmet el gran pes del ventilador directament a la bancada.



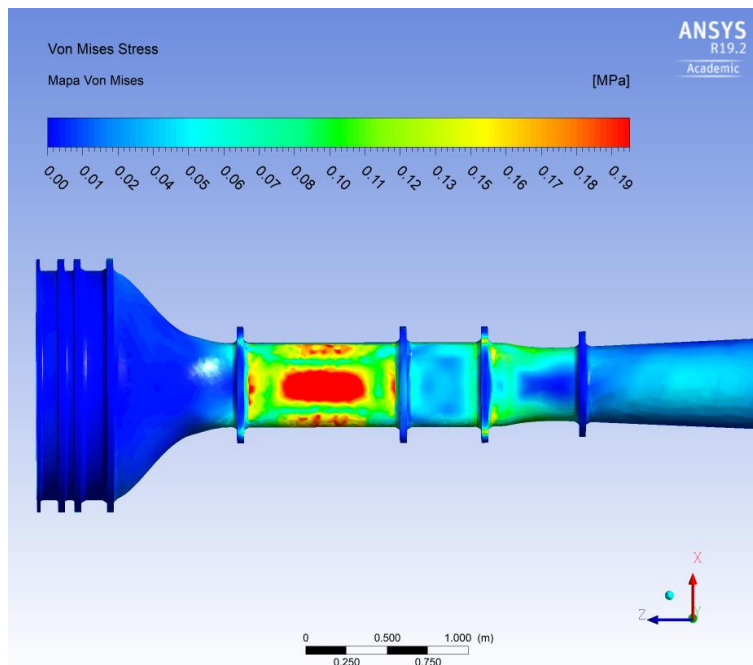
Il·lustració 65. Deformacions en el predimensionament, vista inferior

Disseny d'un túnel de vent de baixa velocitat per a medicions aerodinàmiques

Quant a les tensions, en cap cas s'acosten al coeficient de seguretat de 10 establert, que per al cas del PS i el PMMA estaria prop dels 3 MPa.



Il·lustració 66. Tensió equivalent de Von Mises en el predimensionament



Il·lustració 67. Tensió equivalent de Von Mises en el predimensionament, vista inferior

En vista dels resultats, és evident que el disseny compleix perfectament amb els requeriments mecànics: les deformacions són mínimes (bona rigidesa), i les tensions també (baix estrés mecànic). Això mostra que, de fet, encara té molt de marge per a majors càrregues, en vista de possibles millores que es puguin realitzar en un futur. Això es veurà més detalladament en l'apartat de discussions.

### 3.5. Selecció de materials

En aquesta secció es procedirà a una selecció dels materials necessaris per a la construcció dels components del túnel. Podem diferenciar quatre parts segons les necessitats: en primer lloc, la cambra d'establiment, el con i el difusor, en segon lloc, la zona d'assajos i, finalment, la bresca.

Per a realitzar una selecció correcta i ordenada, s'ha emprat el programa informàtic *CES EduPack*, que permet imposar una sèrie de restriccions per a acabar trobant el material més adequat.

Cal dir que els esforços del túnel són realment baixos: a penes és necessari que siguin capaços de sostindre el seu propi pes i de mantindre una bona rigidesa. És llavors avantatjós utilitzar materials de baix cost i fàcils de treballar, que tinguen poc pes, i una resistència i rigidesa moderades; per descomptat, la família dels plàstics compleix a la perfecció amb aquests requisits. Dins d'aquests, buscant emprar materials que puguen ser reciclables i reutilitzables en el moment que finalitze la seua vida útil, és preferible emprar termoplàstics ja que, encara que tinguen pitjors propietats mecàniques en comparació amb els termoestables, són més responsables envers el medi ambient.

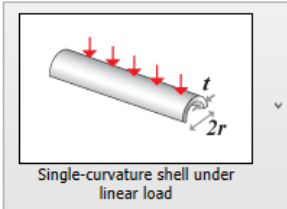
### 3.5.1. Cambra d'establiment, con, difusor, trompeta i suports

Com s'ha comentat, no és necessari que siguin materials amb massa resistència o rigidesa, ja que només han de ser capaces de suportar el seu propi pes. Les principals característiques buscades són dues: facilitat de fabricació, i baix cost. Les etapes de selecció que s'han emprat són les següents:

1. Limitació a materials termoplàstics.
2. Reforços o bé de fibra de vidre o sense cap.
3. Facilitat de producció per injecció.
4. Gràfica comparativa entre l'índex de cost comparat amb la rigidesa (mètode Ashby – Panells amb càrrega lineal), i el límit de fluència en l'eix d'abscisses.

**Definición de componentes**

**Función y carga:**



**Notas del componente:**

Single-curvature panels, equipment casings, vehicle bodywork, packaging...

r - shell radius  
t - wall thickness

Single-curvature shell under linear load

**Variables libres:** wall-thickness

**Variables fijas:** radius

**Restricción limitante:** stiffness

**Optimizar:** cost

**Índice de rendimiento**

Minimizar:

$$\frac{C_m \cdot \rho}{E f^{\frac{1}{3}}}$$

[símbolos](#)

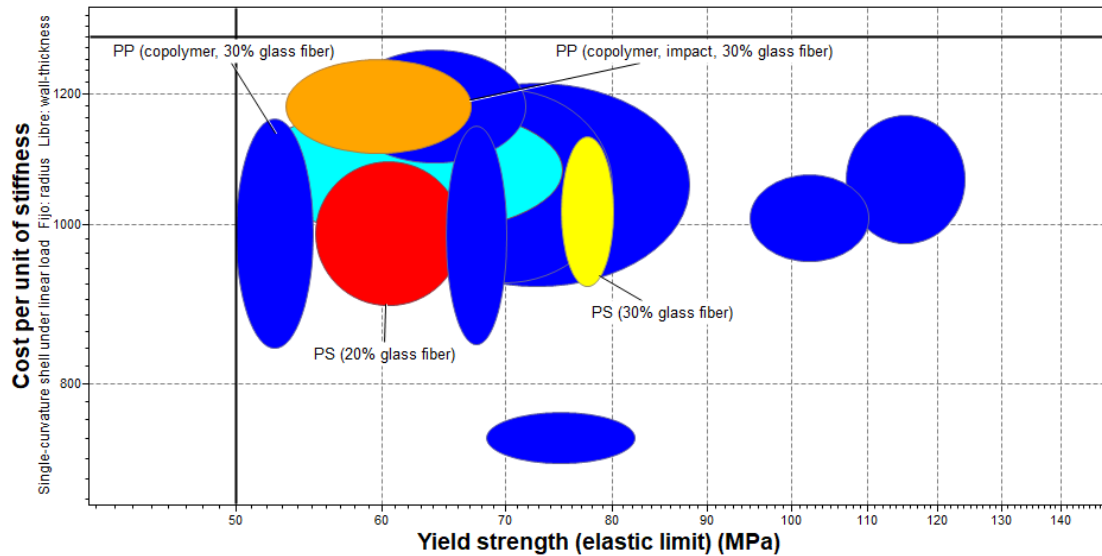
**Ajustes del eje**

**Título del eje:** Cost per unit of stiffness

Logarítmica     Lineal  
 Escala automática     Conjunto

Il·lustració 68. Inserció de dades en el CES Edupack





Il·lustració 69. Gràfica de materials: Cost per unitat de rigidesa contra límit de fluència

Després d'aplicar aquesta sèrie de filtres, s'ha arribat a una vintena de materials, d'entre els quals s'ha triat els dos més comuns: el poliestiré i el polipropilè. Dins de cadascun s'han obtingut dues versions, la qual cosa fa un total de quatre materials, que es mostren en la següent taula.

Taula 27. Materials candidats per al seu ús en el túnel de vent

	Límit a fluència (MPa)	Mòdul elàstic (GPa)	Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	Preu per quilo (€/kg)
PS 20% Fibra de Vidre	55'2 – 66'2	6'21 – 8'27	1190 - 1210	1'43 – 1'74
PS 30% Fibra de Vidre	75 - 80	8'27 – 8'96	1280 - 1300	1'44 – 1'77
PP 30% Fibra de Vidre	51 - 75	4'7 – 5'67	1120 - 1140	1'47 – 1'74
PP Impacte 30% Fibra de Vidre	53'3 - 67	3'27 – 5'12	1110 - 1130	1'6 – 1'81

Hi ha un material que sobreix de la resta: el poliestiré amb una càrrega del 30% de fibra de vidre en forma de fibres curtes. És per tant un material compost, ja que el poliestiré actua com a matriu, i la fibra de vidre de fase dispersa; no obstant això, té l'avantatge que es pot treballar a extrusió i injecció de la mateixa forma que qualsevol termoplàstic. Aquest material té les millors propietats mecàniques, al mateix preu per quilo que la resta. La densitat és lleugerament major, un 15% major que el PP al 30%, però no té cap efecte perjudicial en l'estructura. El que és realment interessant és el seu alt rang de mòdul elàstic, ja que les peces precisen d'una bona rigidesa per a mantindre la seua forma, i no variar així la geometria interna, afectant el rendiment aerodinàmic de la instal·lació. De fet, té un índex de cost en relació a la rigidesa baixa, similar a la variant al 20%, però amb un límit de fluència més alt.

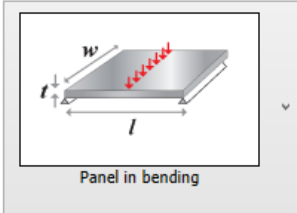
### 3.5.2. Zona d'assajos

La zona d'assajos ha de complir els mateixos requisits que les peces anteriors, amb la particularitat que, evidentment, ha d'emprar-se un material transparent per a poder observar l'interior del túnel.

1. Limitació a materials termoplàstics.
2. Transparència bona o de qualitat òptica.
3. Facilitat de producció per injecció.
4. Gràfica comparativa entre l'índex de cost comparat amb el límit de fluència (mètode Ashby – Panell ancorat als extrems amb càrrega en el centre), i el límit de fluència en l'eix d'abscisses.

**Definición de componentes**

**Función y carga:**



Panel in bending

**Notas del componente:**

Panels, equipment casings, unsupported horizontal surfaces, vehicle bodywork...

l - length  
w - width  
t - thickness

**Variables libres:** thickness

**Variables fijas:** length, width

**Restricción limitante:** strength

**Optimizar:** cost

**Índice de rendimiento**

Minimizar:

$$\frac{C_m \cdot \rho}{\sigma_f^{\frac{1}{2}}}$$

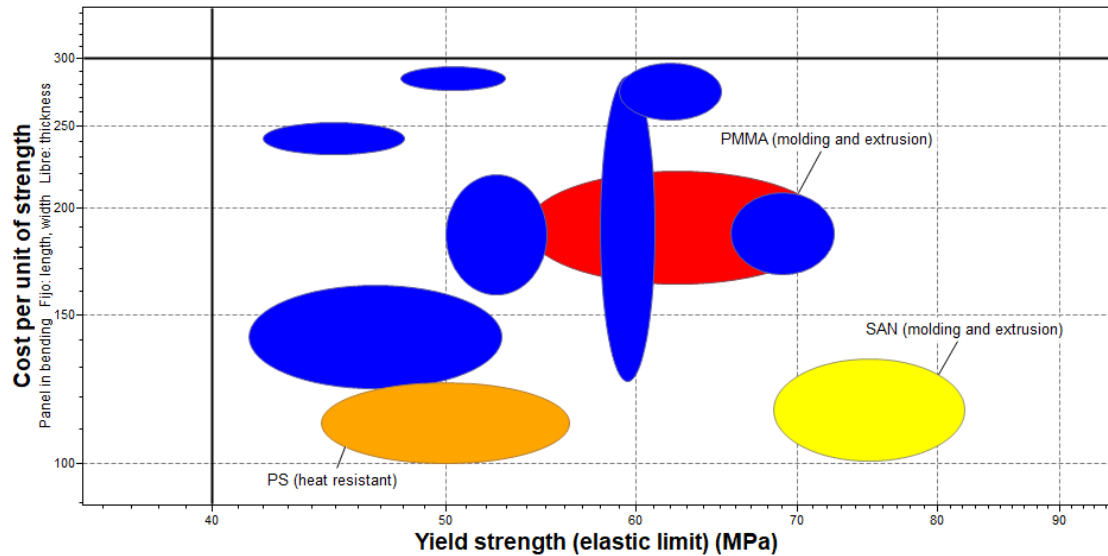
Carga cíclica [símbolos](#)

**Ajustes del eje**

**Título del eje:** Cost per unit of strength

Logarítmica     Lineal  
 Escala automática     Conjunto

Il·lustració 70. Inserció de dades en el CES Edupack



Il·lustració 71. Gràfica de materials: Cost per unitat de resistència contra límit de fluència

Els tres materials més destacables dels obtinguts són els següents tres:

Taula 28. Materials candidats per a la zona de proves

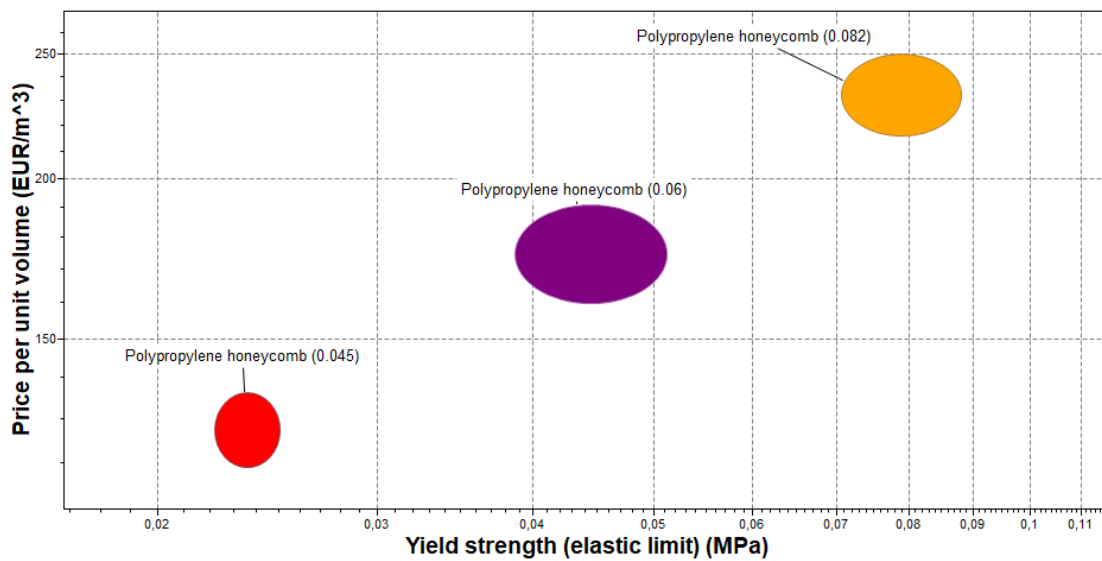
	Límit a fluència (MPa)	Mòdul elàstic (GPa)	Transparència	Preu per quilo (€/kg)
PMMA (emotlament i extrusió)	54 – 72	2'24 – 3'24	Qualitat òptica	1'53 – 1'63
PS (resistent a la calor)	44'4 – 56'2	3'1 -3'34	Bona	0'93 – 1'15
SAN (emotlament i extrusió)	68'4 – 82'1	3'28 -3'86	Bona	1'07 – 1'09

En aquest cas, el SAN ofereix la millor relació preu enfront de resistència, i el poliestiré és el més barat; no obstant això, és el metacrilat el més adequat per a aquestes peces. Té un límit a fluència prou bo, i un mòdul elàstic moderat enfront de la resta, encara que és fins a un 50% més car. El que ho fa el millor, no obstant això, és la seua qualitat òptica de transparència. És fonamental que la zona de proves permeta veure nítidament el que succeeix a l'interior, i el PMMA ofereix una millor visió respecte al SAN i al PS. La menor rigidesa enfront del poliestiré reforçat de la resta de peces haurà de compensar-se amb un major gruix, però al no haver-hi grans càrregues, no serà necessari sobredimensionar-lo.

### 3.5.3. Bresca

La velocitat en la cambra d'establiment és baixa, inferior a 15 km/h en el cas més desfavorable, per la qual cosa no és necessari emprar materials d'alta resistència. El programa *EduPack* té dins de la seua base de dades un apartat específic per a aquestes bresques, *honeycombs* en llengua anglesa.

1. Limitació a bresques (*honeycombs*).
2. Gràfica comparativa del preu respecte al límit de fluència.
3. Limitació a termoplàstics.



Il·lustració 72. Gràfica de materials: Cost per volum contra límit de fluència

En la següent taula es poden veure els tres resultats obtinguts.

Taula 29. Grandàries de bresques candidats

	Grandària de cel·la (mm)	Densitat aparent	Resistència a compressió (MPa)	Rigidesa específica (MN·m/kg)	Preu per quilo (€/kg)
Bresca de polipropilè	8	0'082	2 – 3'39	0'02	2'71 – 2'98
	10	0'06	1 – 1'21	0'01	
	12	0'045	0'38 – 0'42	0'005	

Es tracta del mateix material, polipropilè, però varia la grandària de la cel·la i les seues característiques mecàniques. La grandària de cel·la calculat en l'apartat 3.3.1 és de 10 mm, però repetint els càlculs per a 8 i 12 mm i una relació de longitud de 7, el coeficient de pèrdues *K* continua prop de l'objectiu d'1 (1'1 i 0'93 respectivament), per la qual cosa són grandàries totalment acceptables. No obstant això, una grandària de cel·la menor té un millor efecte de reducció de la vorticitat del flux i, a més, la rigidesa específica augmenta. Per tant, la variant ideal és la de grandària de cel·la de 8 mm.

### 3.6. Selecció de components

Hi ha una sèrie de peces del túnel que no poden ser dissenyades, sinó que han d'adquirir-se seguint dimensions i geometries estandarditzades. En aquest grup es troben els elements d'unió (caragols, rosques, volanderes...), les pantalles, i els perfils i altres components del bastidor o bancada. A més, com es va comentar anteriorment, el disseny del ventilador queda fora de l'àmbit d'aquest treball, així que també ha de triar-se un comercial.

#### 3.6.1. Pantalles

Per a les pantalles, és necessari aconseguir un teixit amb fils molt fins, i cel·les molt xicotetes. Intentar entrecreuar manualment tants fils d'una grandària tan xicoteta és una tasca inviable de manera manual, per la qual cosa és convenient obtindre un teixit ja fet, que es pugui enganxar tibad a un marc de plàstic mitjançant pressió: una malla de tamís és un candidat perfecte.

Les propietats que ha de complir són les següents: un diàmetre de fil pròxim a les 3 o 4 dècimes de mil·límetre, i un ample de cel·la d'uns 3 mil·límetres. Comercialment, els tamisos d'aquesta grandària solen ser d'acer, per tant, no té sentit realitzar una cerca mitjançant el CES, ja que el material ve determinat pels propis fabricadors.



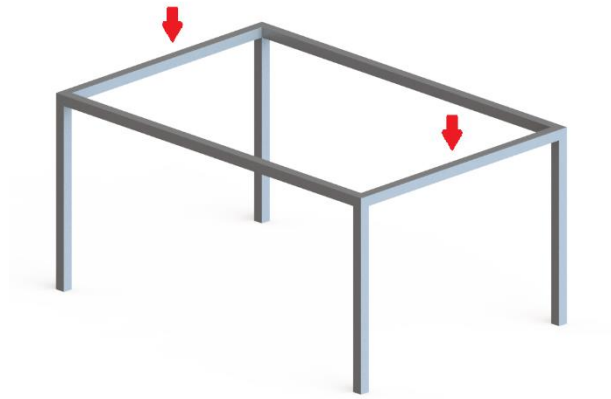
*Il·lustració 73. Detall de la malla seleccionada per a les pantalles de turbulència*

### 3.6.2. Bastidor

Per a realitzar el bastidor, és usual emprar una sèrie de perfils d'alumini comercials. El seu principal avantatge és la senzillesa, la versatilitat que ofereixen, la facilitat de muntatge, i la relació qualitat-preu.

#### Estructura

El bastidor es compon de dues estructures: una de 6 barres per als suports B i C, i una altra del mateix tipus però amb longituds diferents per al ventilador (Suport D).

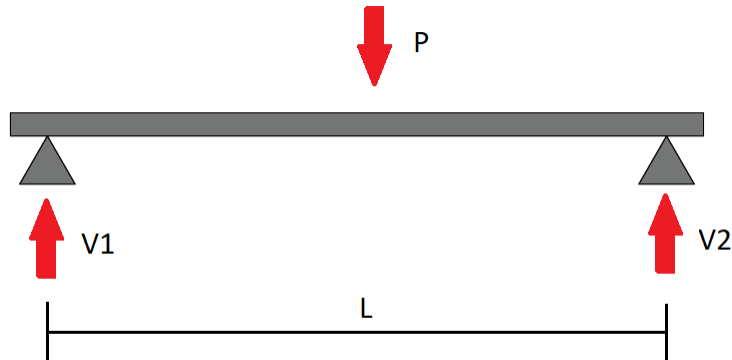


*Il·lustració 74. Esquema del disseny previ del bastidor*

## Dimensionament de perfils

### Estructura 1

La bancada es compon de 6 perfils que treballen d'enfront de diferents esforços. El cas més desfavorable són les barres en què secunden els suportes B i C (una barra per a cada suport), ja que treballen a flexió. Per a fer un càlcul senzill, s'assemblarà aquesta situació a una biga bisuportada amb una càrrega puntual en el centre, com a mostra la imatge següent:



*Il·lustració 75. Modelització com a biga bisuportada de la barra del bastidor per al suport B*

El pes s'aproximarà considerant la distribució realitzada en la taula 24 del punt 3.4.1: Es consideraran els 5 kg de càrrega, els 58 de la zona de test, i la meitat del difusor i el con, 52 i 28 kg respectivament. Es considera que es reparteixen equitativament entre totes dues barres, per la qual cosa cadascuna suportarà la meitat d'aquesta suma:

$$P = \frac{5 + 58 + 0'5 \times (52 + 28)}{2} \times 9'8 = 505 \text{ N}$$

Per a aquesta mena de càrrega, fàcilment trobada en qualsevol promptuari, les reaccions són:

$$V1 = V2 = \frac{P}{2} = 252'5 \text{ N}$$

La secció més desfavorable és la de la col·locació de la càrrega, que està sotmesa a un moment:

$$M = V1 \times \frac{L}{2} = \frac{PL}{4}$$

(28)

Tenint en compte que la longitud L és d'1 m, el valor serà,

$$M = \frac{505 \times 1000}{4} = 126250 \text{ Nm}$$

I dins d'aquesta secció, el punt més desfavorable és el que es troba més allunyat de la fibra neutra; en emprar-se perfils simètrics, es tracta de la superfície superior i la inferior (per facilitat, es prendrà la superior; teòricament ambdues pateixen el mateix esforç). La fórmula emprada per a conèixer la tensió és la següent:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{M}{I} i = \frac{M}{W}$$

(29)

on,

$\sigma$  = Límit elàstic (MPa)

n = Factor de seguretat

I = Moment d'inèrcia (mm<sup>4</sup>)

i = Distància a la fibra neutra (mm)

W = Moment resistent (mm<sup>3</sup>)


El límit elàstic per a l'aliatge d'alumini de les barres és de 195 MPa, i el factor de seguretat és de 4. Substituint, s'obté:

$$W = \frac{M \times n}{\sigma} = \frac{126250 \times 4}{195} = 2590 \text{ mm}^3$$

$$W \geq 2'59 \text{ cm}^3$$

De la llista de perfils disponibles, s'ha de buscar aquell que quede directament per damunt d'aquest valor. El perfil seleccionat de l'empresa Rexroth és el següent:

### Datos técnicos: perfiles

Perfil	Ranura	Superficie del perfil	Momento de inercia		Momento de resistencia		
		A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	
40x40L		10	5,6	9,1	9,1	4,5	4,5

Il·lustració 76. Dades del perfil 40x40L de Bosch Rexroth

Les dues potes que transmeten el pes al sòl suportaran una força de 346'5 N, per a comprovar que poden aguantar s'ha d'emprar la següent fórmula:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{N}{A}$$

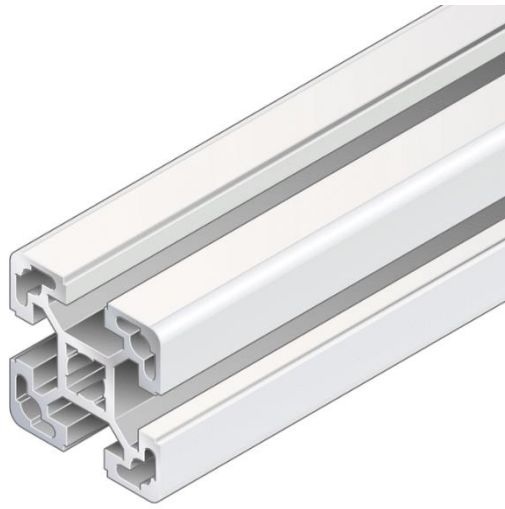
(30)



Sabent que la tensió límit i el coeficient de seguretat són els mateixos que en el cas anterior, l'àrea mínima ha de ser:

$$A = \frac{N \times n}{\sigma} = \frac{252'5 \times 4}{195} = 5'2 \text{ mm}^2$$
$$A \geq 0'052 \text{ cm}^2$$

El perfil triat té una àrea de 5'6 cm<sup>2</sup>, per la qual cosa compleix perfectament a compressió.



*Il·lustració 77. Perfil 40x40L de Bosch Rexroth*

## Estructura 2

En aquest cas, s'emprarà el mateix tipus d'estructura, però amb diferents grandàries. Per tant, el procediment serà el mateix, només que canviant les dades. El pes suportat  $P$  serà la suma del pes del ventilador (150 kg) i la trompeta, a més de la meitat del difusor. Per tant:

$$P = \frac{150 + 13 + 0'5 \times 52}{2} \times 9'8 = 926 \text{ N}$$

La longitud  $L$  es manté en 1 m, per la qual cosa la reacció en cada pota és,

$$V1 = V2 = \frac{P}{2} = 463 \text{ N}$$

El moment a la meitat de la biga és:

$$M = \frac{926 \times 1000}{4} = 231500 \text{ Nm}$$

El mòdul resistent mínim és,

$$W = \frac{M \times n}{\sigma} = \frac{231500 \times 4}{195} = 4749 \text{ mm}^3$$

$$W \geq 4'75 \text{ cm}^3$$


I l'àrea mínima per a les potes,

$$A = \frac{N \times n}{\sigma} = \frac{463 \times 4}{195} = 9'5 \text{ mm}^2$$

$$A \geq 0'095 \text{ cm}^2$$

El perfil seleccionat és el següent, que compleix tant amb el moment resistent com amb l'àrea mínims:

### Datos técnicos: perfiles

Perfil	Ranura	Superficie del perfil	Momento de inercia		Momento de resistencia		
		A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	
45x45L		10	6,0	11,7	11,7	5,2	5,2

Il·lustració 78. Dades del perfil 45x45L de Bosch Rexroth

### 3.6.3. Elements d'unió

La unió de les diferents peces es realitza mitjançant caragols. Per a facilitar el muntatge, tots els allotjaments en les peces són per a caragols de mètrica 12, de manera que no hi ha zones específiques amb diferents diàmetres. La longitud dels mateixos si que varia; la unió que major longitud requereix és de 90 mm en l'ancoratge del suport B amb el con i la zona de proves (4 caragols en total), mentre que la resta de gruixos no arriba als 50 mm (133 caragols).

A més, és necessari adquirir rosques i volanderes de mètrica 12, que seran iguals per als dos tipus de caragols. En total són 137 de cadascuna.



*Il·lustració 79. Elements d'unió: caragols, rosques i volanderes*

### 3.6.4. Ventilador

El punt de funcionament més exigent després del disseny definitiu de la Fase 3 és de:

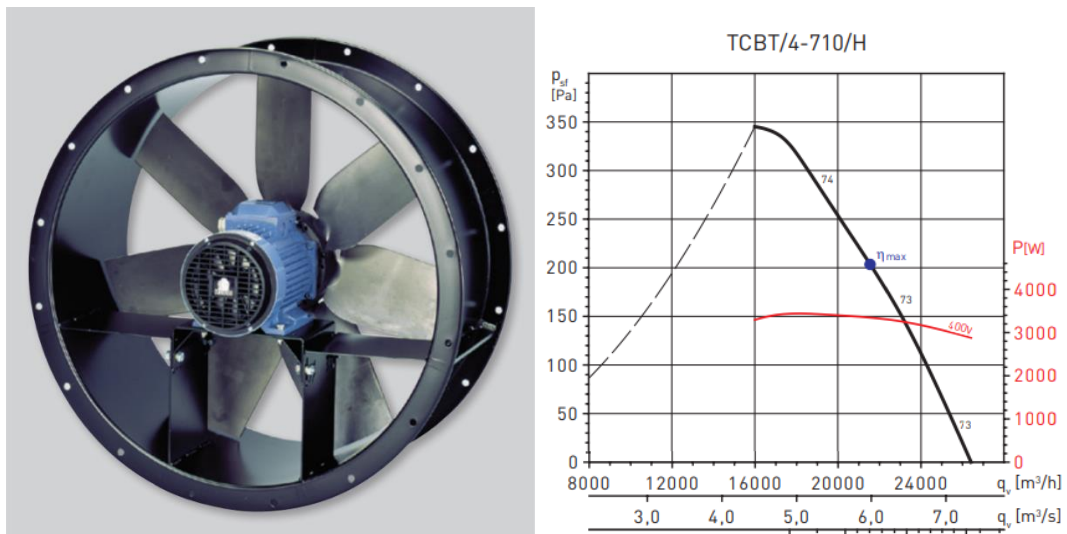
$$Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = 205 \text{ Pa}$$

El ventilador es buscarà en la marca *Soler i Palau*, que facilita les corbes dels ventiladors, a més dels preus i altres paràmetres. Els ventiladors solen rondar una eficiència màxima del 50%, per la qual cosa la potència del motor serà d'aproximadament:

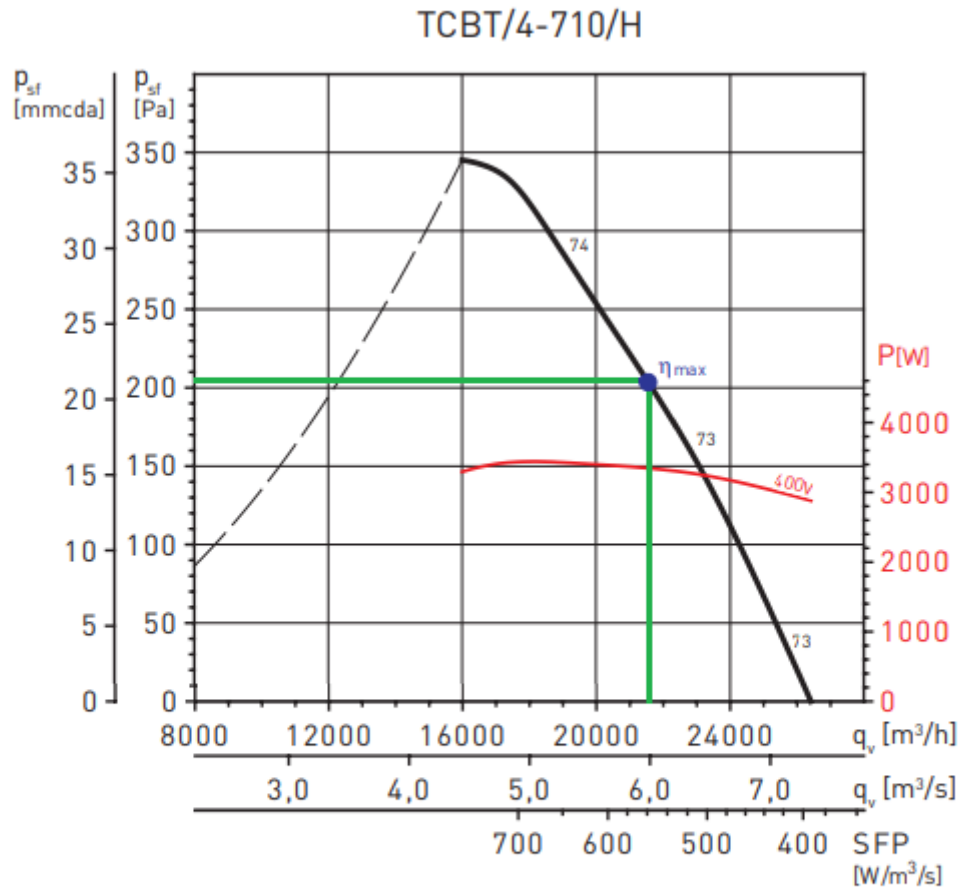
$$P_m = \frac{Q \Delta p}{\eta} = \frac{6 \times 205}{0'5} = 2'46 \text{ kW}$$

S'ha triat la sèrie TCBT, ja que té una bona relació qualitat-preu en comparació amb altres sèries. Concretament s'ha triat el model TCBT/4-710/H, que és la que compleix amb el punt de funcionament màxim establert. Per a adaptar-se a altres punts, serà necessari emprar un variador de freqüència. Seria idoni poder disposar d'un ventilador amb l'angle d'atac de les pales ajustable, però no hi ha cap disponible en aquesta empresa, i en unes altres el preu puja massa: la variació de velocitat serà suficient.



Il·lustració 80. Ventilador TCBT/4-710/H i corba característica

El punt de treball màxim sobre la corba del ventilador es pot veure en la següent gràfica:



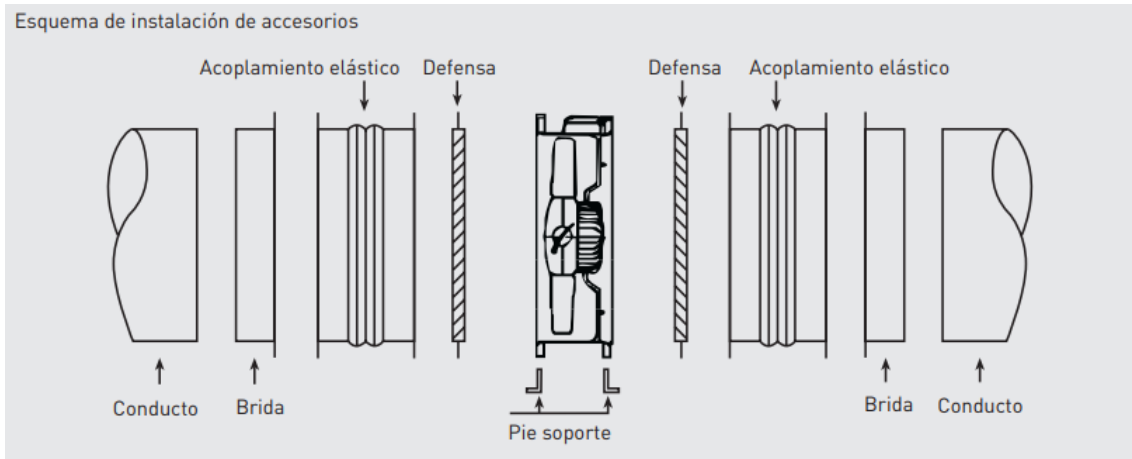
MC	EC	VSD	SR	$\eta$ [%]	N	[kW]	[ $m^3/h$ ]	[Pa]	[RPM]
D	Total	No	1	61,4	64,4	3,346	21563	341	1451

*Il·lustració 81. Punt de funcionament del ventilador*

Com s'aprecia en la imatge, el punt de treball màxim, tenint en compte les dades oferides per la simulació amb obstacle mitjà de la Fase 3 del disseny interior, compleix perfectament amb aquest ventilador, a més de coincidir amb el punt de màxim rendiment.

### 3.6.5. Complementos del ventilador

El fabricant del ventilador triat ofereix una sèrie de components per a afegir al ventilador, els quals estan llistats a continuació:



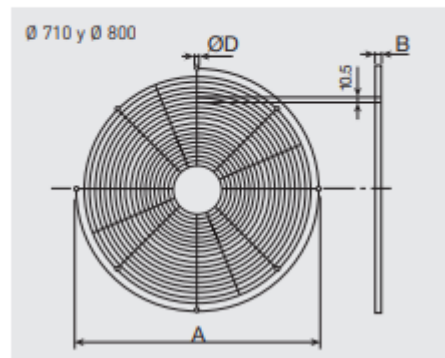
Il·lustració 82. Esquema de l'ordre de col·locació dels diversos accessoris del ventilador

### Defenses

#### DEF-T

Defensas de protección para prevenir contactos con las hélices de los ventiladores.

Modelo	A	B	ØD	Nº de agujeros
Defensas DEF-T ASPIRACIÓN (lado hélice)				
DEF-710 T ASPIRACIÓN	770	5	12	8
Defensas DEF-T DESCARGA (lado motor)				
DEF-710 H-T DESCARGA	770	5	12	8



Il·lustració 83. Defenses del ventilador

Acoblaments

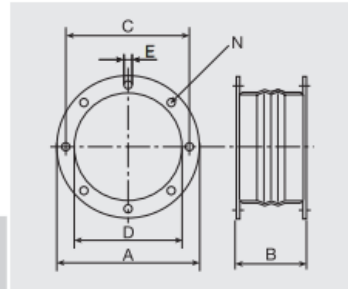
ACCESORIOS DE MONTAJE  
Acoplamiento, bridas, elementos de sujeción



**ACOP.BRIDA**

Acoplamiento elástico, para ventiladores helicoidales tubulares COMPACT y TTT. Incluyen lona elástica + 2 bridas (ver imagen).

Modelo	Ø A	B	Ø C	Ø D	Ø E	N Nº de taladros
ACOP.BRIDA-710	806	185	770	710	12	16



*Il·lustració 84. Acoblament per a bridas*

Brides



*Il·lustració 85. Brida*

Peu

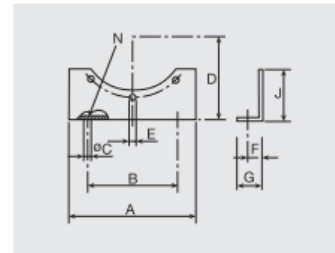
ACCESORIOS DE MONTAJE  
Pies



**PIE**

Juego de 2 pies soporte para fijar ventiladores helicoidales tubulares.

Modelo	A	B	Ø C	D	Ø E	F	G	J	N
PIE-700/710	560	480	12,5	433	12,5	22	45	135	4



Il·lustració 86. Suport del ventilador (Suport D)

Embocadures

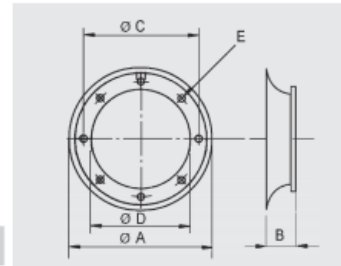
ACCESORIOS DE MONTAJE  
Defensas



**EMB-T**

Embocaduras-defensas de protección para evitar turbulencias y entrada de objetos en la aspiración y prevenir de cualquier contacto de personas con la hélice del ventilador.  
Para aplicar a ventiladores tubulares con flujo B (Sentido del aire Hélice-Motor) o con camisa larga y flujo A (Sentido del aire Motor-Hélice).

Modelo	Ø A	B	Ø C	Ø D	E	Peso (kg)
EMB-710T	824	250	770	710	16x12	14,3

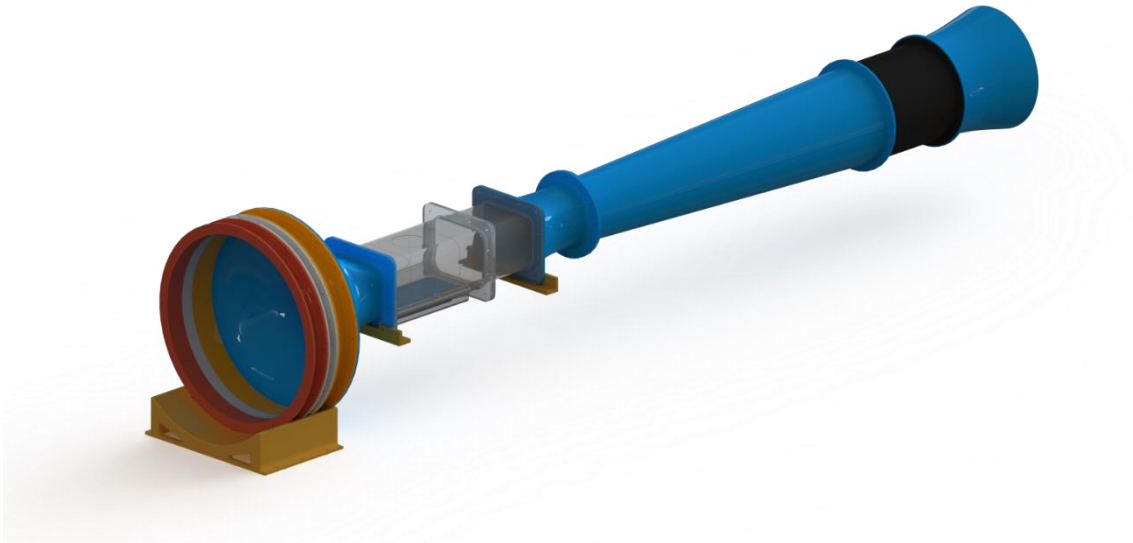


Il·lustració 87. Embocadures



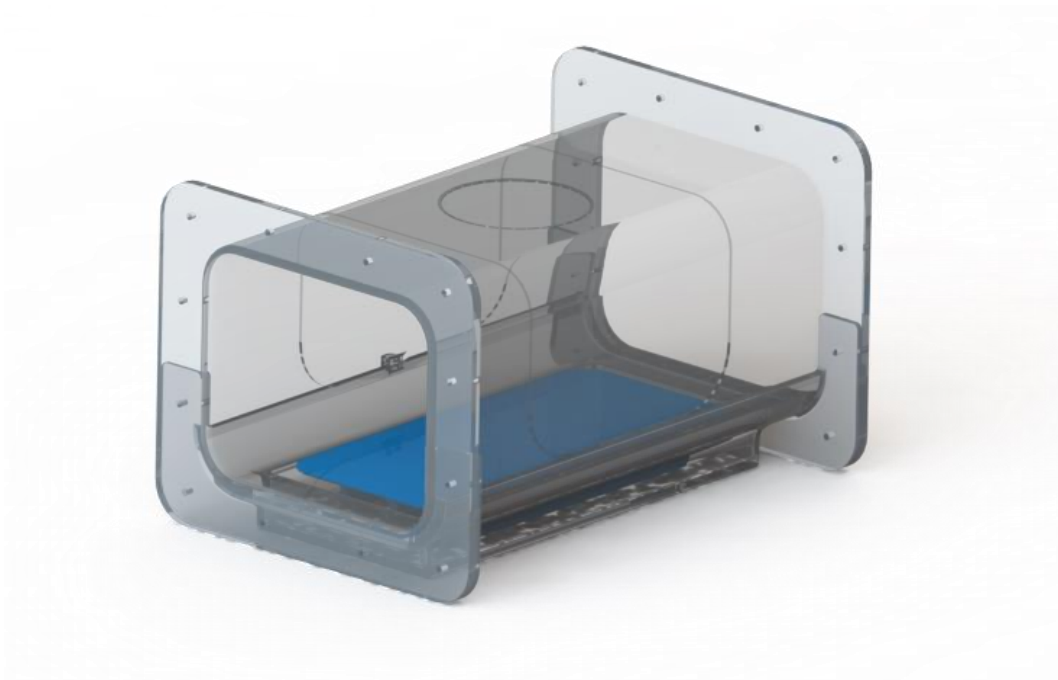
### 3.7. Disseny de peces

El disseny definitiu del túnel de vent és el següent:



*Il·lustració 88. Vista isomètrica del disseny definitiu del túnel de vent*

En la següent imatge es pot veure detalladament com és la zona de proves:



*Il·lustració 89. Vista isomètrica de detall de la zona de proves del disseny definitiu del túnel de vent*

### 3.7.1. Cambra d'establiment



*Il·lustració 90. Marcs de la cambra d'establiment. D'esquerra a dreta: Marc de la bresca, marc separador, i marc per a pantalles*

La cambra d'establiment consta de diversos anells de diferent gruix. L'anell de color roig correspon al primer de tots, i la seua funció és allotjar la bresca. La de color blanc, per part seua, té la funció d'allotjar a les pantalles de turbulència. Per a poder realitzar una correcta separació entre les pantalles i la bresca, està el tercer anell, de color taronja en la imatge, que permet mantindre la separació adequada.

Només és necessari un anell per a la bresca, mentre que tres anells de tipus separador i de pantalles serà suficient. Per a assegurar una bona unió entre totes elles, tenen en totes dues vores una pestanya que allotja 12 forats per a rosques de mètrica 12. A més, aquesta pestanya permet també a l'estructura augmentar la inèrcia de l'estructura, així que es manté la seua forma correctament.

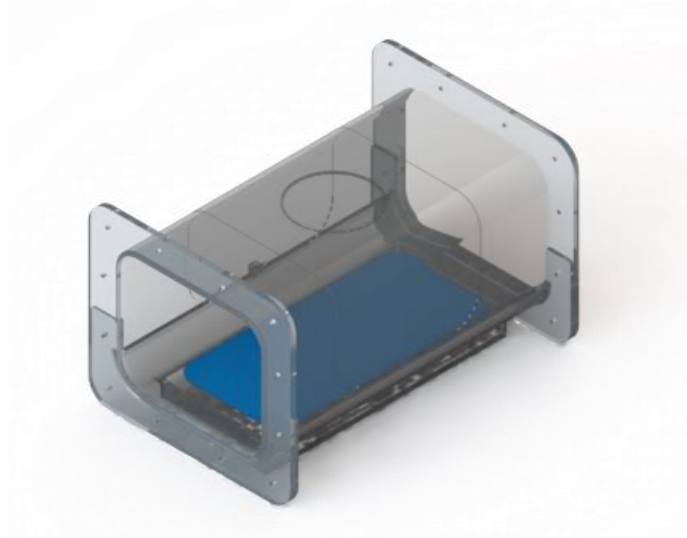
### 3.7.2. Con de contracció



*Il·lustració 91. Con de contracció*

El con de contracció s'acobra als anells de la cambra d'establiment amb el mateix sistema de 12 forats, mentre que a l'altre costat s'agafa a la zona de proves per altres tants caragols, però la secció és rectangular. A més, els dos forats de les cantonades inferiors serviran per a la seua unió amb el suport B.

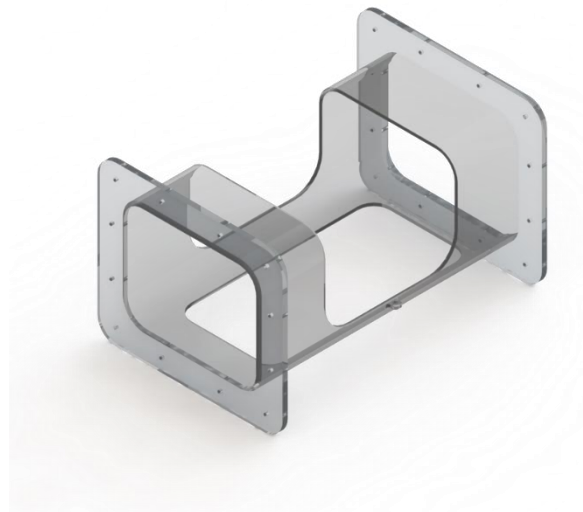
### 3.7.3. Zona de proves llarga



*Il·lustració 92. Zona de proves*

La zona de proves llarga està composta de 5 peces en total, que permeten tindre un bon accés a l'interior del túnel. Els components es mostren detalladament a continuació.

#### Peça A



*Il·lustració 93. Peça A de la zona de proves*

Es tracta de la part estructural i resistent de la zona de proves. A tots dos extrems té 12 forats per a amarrar-se al con de contracció, d'una banda, i per l'altre a la zona de proves curta, o bé directament a la transició. Té accés tant per dalt, per a poder col·locar i manejar qualsevol model amb facilitat, com per baix, per a allotjar instrumentació o qualsevol element auxiliar necessari per a dur a terme els assajos.

## Peça B



*Il·lustració 94. Peça B de la zona de proves*

Aquesta peça cobreix la part superior de la peça A. Es recolza sobre la vora inferior, i s'alinea de manera magnètica a través d'un imant situat en una pestanya que hi ha també en la zona inferior d'un dels costats; la peça A allotja una altra pestanya amb un imant que ajusta en el lloc correcte. També disposa d'una entrada xicoteta superior, en cas de voler accedir més ràpidament a la zona de proves.

## Peça C



*Il·lustració 95. Peça C de la zona de proves*

La peça C és la peça que transmet el pes de les maquetes i de la instrumentació al sòl. Per a això, es fa costat directament al suport B, i al C en cas d'estar desmuntada la zona de proves curta. A més, s'amarra a la peça A mitjançant 6 rosques a cada costat, per a això la peça disposa d'altres tants forats.

### Peça D



*Il·lustració 96. Peça D de la zona de proves*

Aquesta peça és la tapa de la peça B. Té una vora al voltant del seu contorn per a poder assentar-se i tancar la zona de proves. Així doncs, només necessita el seu propi pes per a quedar en el seu lloc; a més, la xicoteta depressió que es genera en la zona de proves ajuda al fet que no es moga, sense que entre aire de l'exterior.

### Peça E



*Il·lustració 97. Peça E de la zona de proves*

La peça E es correspon amb el sòl de la zona de proves, i transmet el pes de les maquetes a la peça C. Depenent de la mena d'assaig es poden emprar diferents tipus: per a realitzar proves de vehicles, és convenient emprar una cinta que adequï la velocitat del sòl a la de l'aire. Per tant, és necessari que aquesta part siga intercanviable.

Aquest disseny en concret serveix simplement com a suport, sense funcions addicionals, amb cinc potes que descansen sobre la peça C.

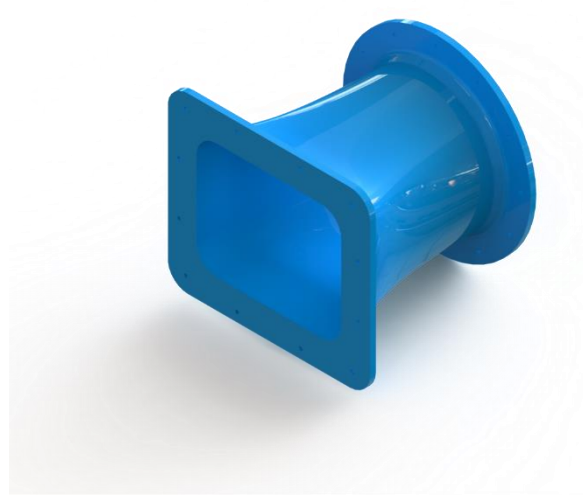
### 3.7.4. Zona de proves curta



*Il·lustració 98. Zona de proves curta*

Aquesta peça té el mateix disseny que la zona de proves inicial, però amb la meitat de longitud. La seua funció és allargar la pròpia zona de proves, ja que alguns models poden generar massa turbulències, i és necessari més espai perquè els vòrtexs creats es dissipin i perquè les línies de flux es tornen a alinear, i així assegurar el bon funcionament del difusor. Per tant, aquesta peça no és necessària col·locar-la en tots els assajos, només en aquells que siga imprescindible.

### 3.7.5. Transició de zona de proves a difusor



*Il·lustració 99. Transició de la zona de proves al difusor*

La transició al difusor, igual que el con de contracció, té 12 ancoratges a cada costat, un amb secció circular, i l'altre amb secció rectangular. Aquesta última també servirà per que el difusor es pugui ancorar al suport C.

### 3.7.6. Difusor



*Il·lustració 100. Difusor*

El difusor té un ancoratge a la transició de 12 forats, mentre que l'extrem ample té només 8 forats, encara que també per a rosques de mètrica 12. Això es deu al fet que el ventilador està fabricat amb aquest número en concret; al no poder canviar-ho, cal adaptar el propi difusor.



### 3.7.7. Trompeta



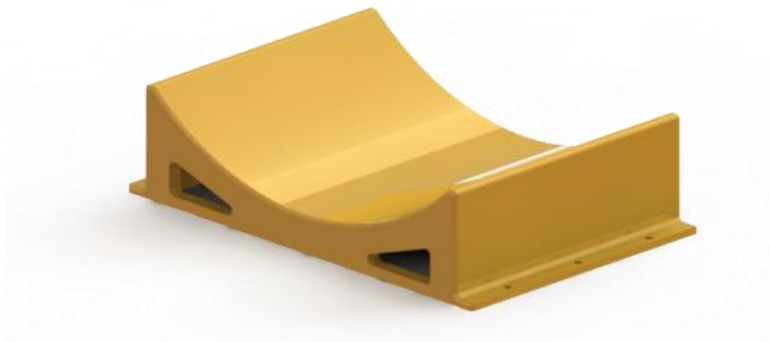
*Il·lustració 101. Trompeta*

La trompeta només té un sortint en el seu extrem més xicotet, que 8 forats per a rosques de mètrica 12 de nou. En canvi, l'altre extrem no ha de agarrar-se a res, per la qual cosa no necessita cap forat.

### 3.7.8. Suports

#### Suport A

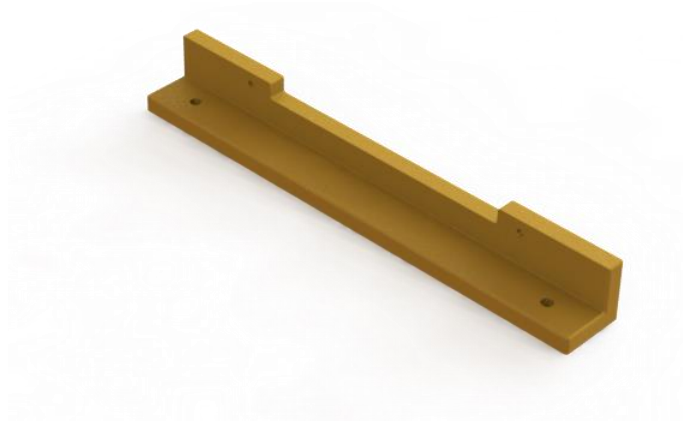
El suport A només té una funció de suport de la cambra d'establiment, per la qual cosa no s'ancora a cap anell. Es fa costat directament al sòl, no necessitant tampoc cap ancoratge; de totes maneres, inclou sis forats repartits en dues pestanyes situades a cada costat, en cas de voler amarrar-ho a una estructura. Amb la forma de bol que té la part de suport, s'aconsegueix repartir bé el pes. A més, el disseny evita que les rosques que uneixen les diferents peces només tinguin la funció d'unió, però sense suportar cap càrrega.



*Il·lustració 102. Suport A*

#### Suports B i C

Aquests dos suports són dues peces iguals: consten d'un perfil en forma de "L", que s'enganxa al con, a la zona de proves o a la transició al difusor, mitjançant dues rosques de mètrica 12, i al bastidor mitjançant altres dues rosques de la mateixa grandària.



*Il·lustració 103. Suports B i C*

### 3.8. Càlcul de resistència del túnel de vent

En aquest apartat es realitzarà un càlcul resistent del túnel al complet mitjançant l'eina *Static Structural* d'ANSYS, com en el punt 3.4.2, no obstant això, aquest es tracta del càlcul definitiu, amb els materials i els dissenys finals, sobre la base dels punts 3.5 i 3.6.

#### Definició de condicions de contorn

Les condicions que ha de complir el túnel de vent per a considerar-lo vàlid, sota una càrrega de 5 kg en la zona de proves, són dues: ha d'haver un coeficient de seguretat mínim de 10, i les deformacions han de ser inferiors a 1 mm.

Les condicions introduïdes en el programa informàtic són les següents:

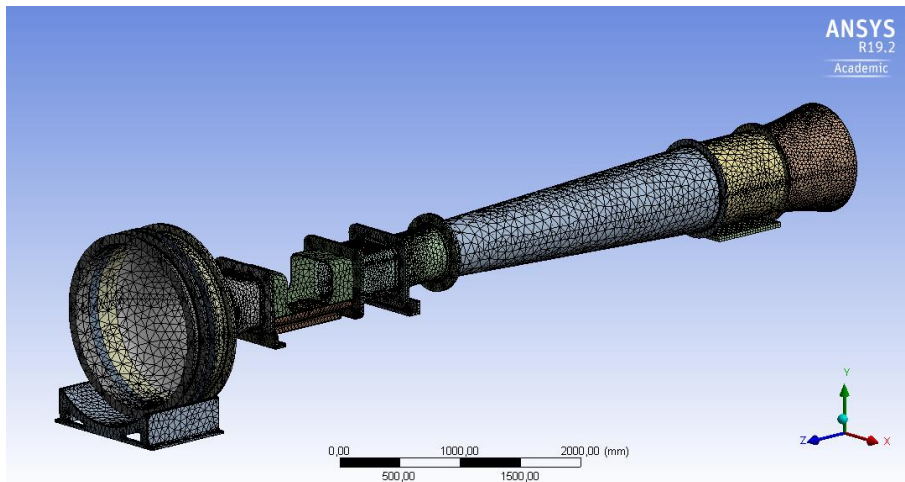
- Connexions: Es consideren tots els cossos com vinculats entre si (*bonded*).
- Materials: Metacrilat per a la zona de proves, acer estructural per a la carcassa del ventilador, i poliestiré per a la resta.
- Càrregues: Les càrregues col·locades corresponen amb la bresca en el primer cercol de la cambra d'establiment, una càrrega arbitrària de 5 kg en la zona de proves, el pes del ventilador, i la introducció de la gravetat per a tindre en compte el pes de cada peça.

És necessari realitzar una sèrie d'observacions quant al modelatge per a la simulació:

- No s'analitzarà la resistència del ventilador, perquè és un disseny comercial ja provat. No obstant això, és necessària la introducció de la carcassa en el model per a poder simular correctament els esforços en la trompeta i en el difusor, així com la reacció en el suport. Aquest suport estarà simplificat com una làmina, per a simplement obtenir les reaccions: el suport el comercialitza el propi fabricant.
- Per a poder obtenir una càrrega del ventilador correcta (150 kg), és necessari restar-li la massa que el propi programa introduïska per ser la carcassa d'acer (el model no inclou ni les aspes ni el motor). Coneixent la densitat de l'acer,  $7'85 \text{ kg/dm}^3$ , i el volum de la carcassa modelada,  $11'4 \text{ dm}^3$  (dades del programa CAD), s'obté una massa de 90 kg; fins als 150 kg, serà necessari introduir una càrrega externa de 60 kg, és a dir, uns 600 N.
- Les dues comportes superiors de la zona de proves llarga no tenen funció estructural, ja que simplement s'acoblen a la part inferior magnèticament per a tancar el conducte; per tant, no s'han de modelar en la simulació.

Taula 30. Càrregues col·locades per a la simulació del càlcul de resistència

Càrrega	Força A - Bresca	Força B – Zona de proves	Força C- Ventilador
Valor	200 N	50 N	600 N



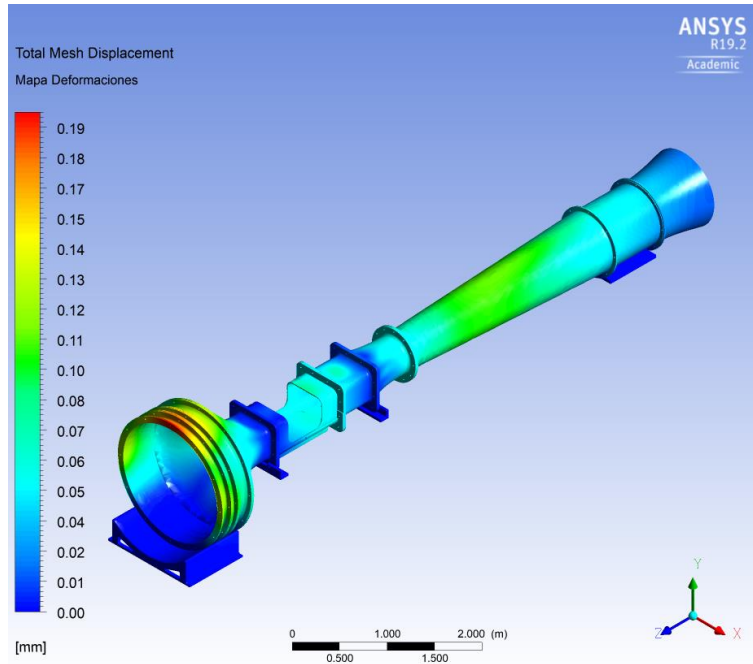
*Il·lustració 104. Emmallat per a l'anàlisi estructural estàtica per mètodes finits*

En aquesta imatge es pot veure l'emmallat realitzat. Com s'ha comentat, no s'ha inclòs les dues peces que tapen la zona d'assajos llarga, ja que no té funció estructural.

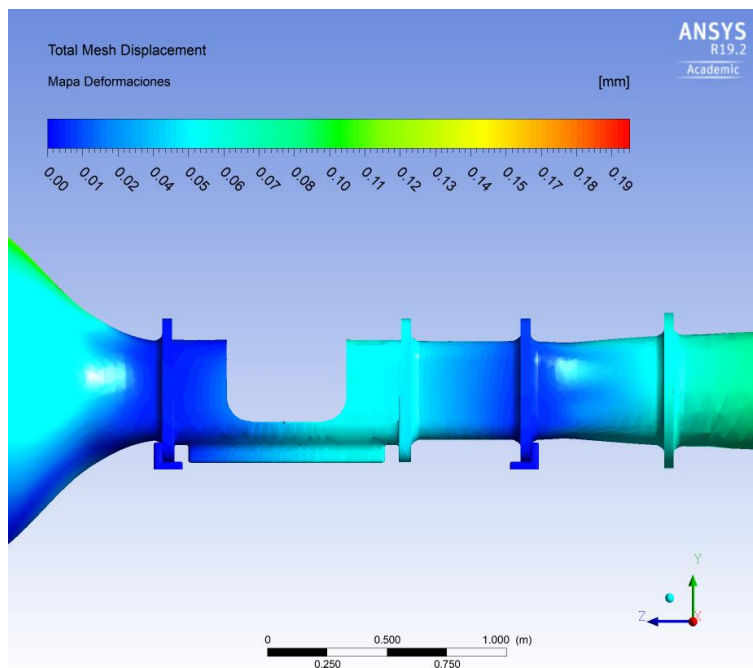
## Resultats

- Deformacions

Les deformacions màximes en tota la construcció són de tot just unes dècimes de mil·límetre en alguna zona. Per tant, en continuïtat amb el vist en el punt 3.5.2, l'estructura presenta una rigidesa correcta, complint amb el límit d'1 mm.



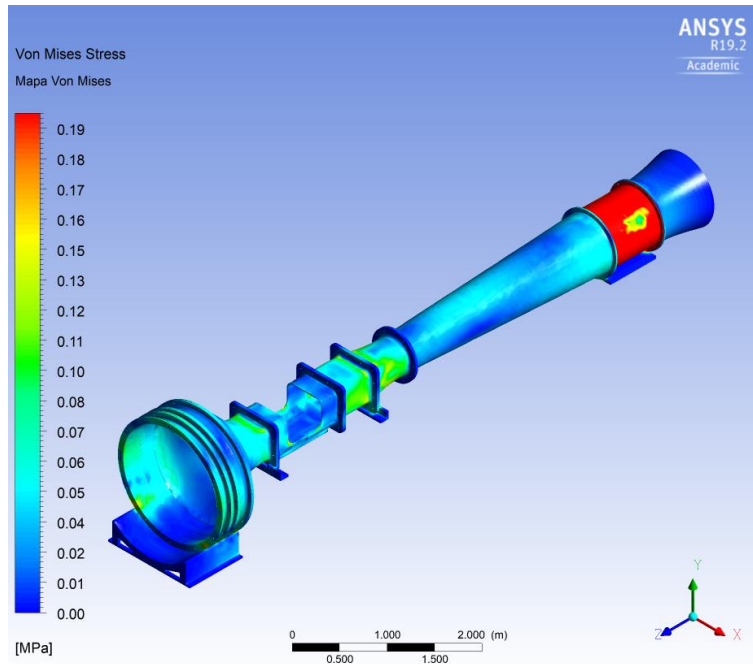
Il·lustració 105. Deformacions



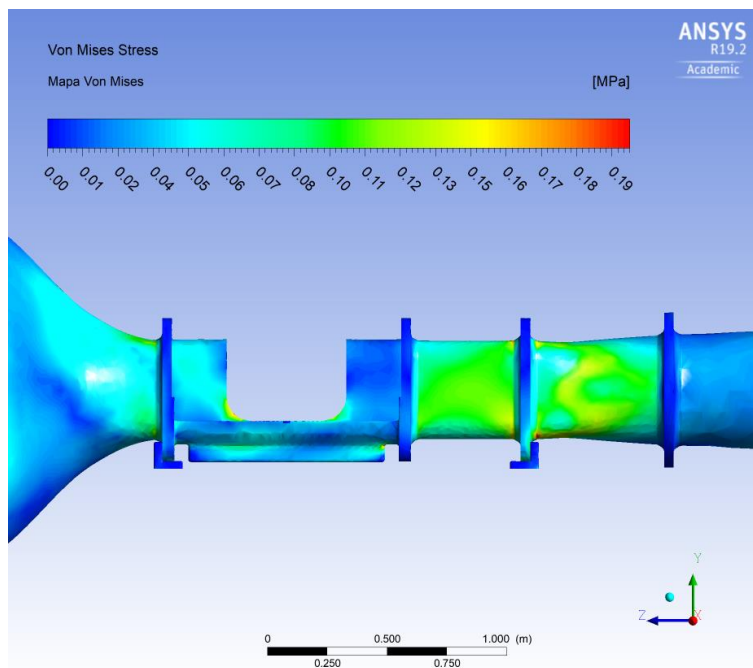
Il·lustració 106. Deformacions. Vista lateral de la zona de proves

- Tensions (Von Mises)

Les tensions màximes en tot el model no arriben en el cas màxim a unes dècimes de MPa. Tenint en compte que el material plàstic té un límit a la fatiga de diverses desenes de MPa, es pot afirmar que el model compleix perfectament. Cal dir que la zona del ventilador no té una aplicació real, ja que és el fabricant l'encarregat de fer que el component resisteixi el seu propi pes.



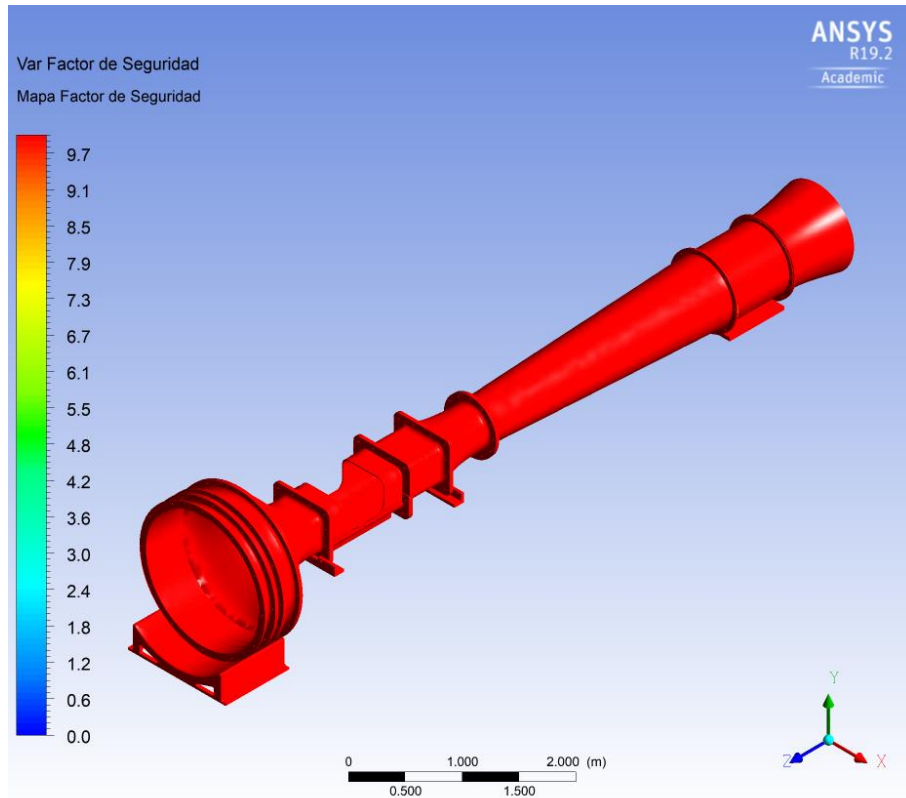
Il·lustració 107. Tensió equivalent de Von Mises



Il·lustració 108. Tensió equivalent de Von Mises. Vista lateral de la zona de proves

- Factor de seguretat

En línia amb l'apartat anterior, tot el túnel compleix amb el factor de seguretat de 10 establert per a tot el túnel, com es pot veure en la següent imatge:



Il·lustració 109. Factor de seguretat

- Reaccions en els suports

En la següent taula es recullen les reaccions en cadascun dels quatre suports.

Taula 31. Reaccions en I dels quatre suports

Suport	A	B	C	D	Suma
Reacció en I (N)	1410	490	693	2034	4627
Percentatge	30%	11%	15%	44%	100%

Clarament, la zona més pesada és la del ventilador, seguida per la de la cambra d'establiment. Els suports B i C es reparteixen la zona de proves prou bé, sense patir massa estrés.

### 3.9. Fabricació

De totes les peces del túnel, es pot fer una gran classificació atenent a si són geometries massisses o buides:



- Massisses: Peces B, C, D i E de la zona de proves llarga, i els suports.
- Buides: Cambra d'establiment, con de contracció, peça A de la zona de proves llarga, zona de proves curta, transició zona de proves-difusor, difusor i trompeta.

A més, hi ha dos tipus de materials:

- PMMA: Totes dues zones de proves.
- PS al 30% de fibra de vidre: Resta de peces.

Per a buscar el procés més adequat, igual que els materials, es realitzarà una cerca mitjançant el programa *CES Edupack*. L'objectiu és buscar un únic mètode de fabricació, per a facilitar i centralitzar aquest procés per a totes les peces, evitant complicacions. Les etapes de selecció introduïdes són les següents:

1. Limitació als dos materials triats: PMMA i PS al 30% de fibra de vidre.

Enlace de registro	Registros incluidos
 MaterialUniverse: \ Polymers: plastics, elastomers \ Plastics \ Thermoplastics \ PMMA (Polymethylmethacrylate/acrylic) \ Unfilled \ Molding and extrusion	25 <input type="button" value="Mostrar"/>
 MaterialUniverse: \ Polymers: plastics, elastomers \ Plastics \ Thermoplastics \ PS (Polystyrene) \ Glass filled \ 30% glass fiber	20 <input type="button" value="Mostrar"/>


Il·lustració 110. Etapa 1 de la selecció de materials

2. Límit de massa i de forma: 10 a 40 kg, i peces 3D tant massisses com buides.

Solid 3-D	<input checked="" type="checkbox"/>		Mínimo		Máximo	
Hollow 3-D	<input checked="" type="checkbox"/>	Mass range	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="40"/>		kg

Il·lustració 111. Etapa 2 de la selecció de materials

3. Limitació a processos d'emmotlament.

Enlace de registro	Registros incluidos
 ProcessUniverse: \ Shaping \ Molding	16 <input type="button" value="Mostrar"/>

Il·lustració 112. Etapa 3 de la selecció de materials

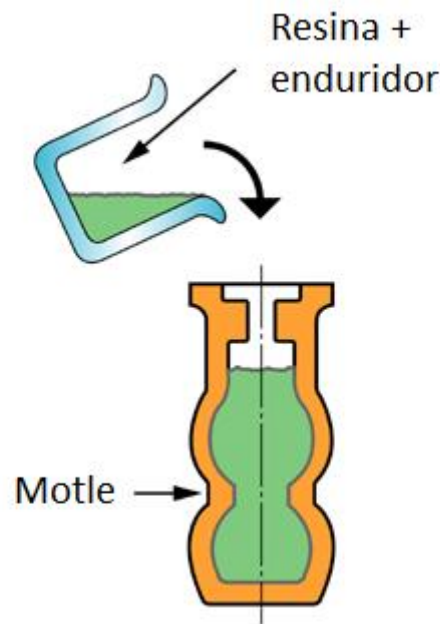


Les opcions que retorna el programa són dos: injecció, i fosa de plàstics. En la següent taula es resumeixen les característiques de tots dos processos:

Taula 32. Mètodes de fabricació candidats

Propietat	Tolerància (mm)	Rang de grossària (mm)	Rang de massa (kg)
Injecció	0'1 – 1	0'4 – 6'3	0'01 – 25
Fosa	0'8 – 2	6'25 – 600	0'1 – 700

Com es pot veure, la tolerància és millor en el cas de la injecció, ja que és un procés clarament més precís. No obstant això, la grandària de les peces és molt gran, i en casos com el difusor o el con de contracció, no és possible crear un motle de tal grandària. A més, no compleix amb l'espessor de les peces (pròxim als 10 mm), i tampoc el de massa (no arriba als 40 kg); en tots aquests casos, la fosa sí que compleix. A més, permet una qualitat òptica dels materials transparents superior a la de la injecció. Per tant, el procés pel qual es realitzaran totes les peces és la fosa de plàstics.



Il·lustració 113. Gràfic esquemàtic del procés d'emmotlament de polímers

Aquest tipus de procés utilitza motles de baix cost, i consisteix en l'emmotlament de la peça a pressió atmosfèrica. El plàstic s'introdueix en forma líquida dins del motle, i es polimeritza dins d'aquest, per a adquirir la forma desitjada. És un mètode senzill, versàtil, i que permet la realització de peces de gran grandària.

El motle emprat pot ser de diversos materials, des de metalls fins a plàstics. Aquest procés s'ha de subcontractar a una empresa externa pel que, depenent de les seues facilitats, empraran un material o un altre.

En el cas de les peces buides, es necessita que el motle tinga dues parts: una part femella que definisca la geometria exterior, i un mascle que genere la interior. Una vegada realitzat el motle i unit, només queda la injecció del polímer, fins a emplenar tota la cavitat. En ser seccions molt estretes per a la seua viscositat, és convenient emprar una sèrie de respiradors per a facilitar l'evacuació de l'aire, i que així el plàstic emplene tota la peça. Després d'això, es deixa curar, se separa del motle, i es remata eliminant possibles rebaves o imperfeccions.

Per a poder realitzar els diferents forats que hi ha en les peces, és convenient emprar un altre mètode més senzill: un foradat. D'aquesta manera, se simplifica el procés d'emmotllament, i s'aconsegueixen geometries més precises. Aquest procés de foradament es pot realitzar de manera manual en un taller de la pròpia facultat amb un trepant, per la qual cosa no es considerarà per al cost en la secció de pressupostos.

### 3.10. Pressupost

Aquest projecte versa sobre un túnel de vent únic, per al seu ús en la universitat, no per a la seua comercialització; això vol dir que només és necessari tindre en compte el cost de fabricació, de material i de consum elèctric del ventilador, però no el de muntatge. A continuació, es mostren els costos i preus desglossats per categories:

#### 3.10.1. Preu de peces

En aquest apartat s'inclou el preu de totes les peces comercials que s'han d'adquirir a empreses externes.

Taula 33. Preu de peces

Conjunt	Peça	Quantitat	Preu unitari	Preu total
Bastidor	Perfil 40x40L (1m)	6	18'04 €	108'24 €
	Perfil 40x40L (3m)	1	60'41 €	60'41 €
	Perfil 45x45L	8	25'26 €	202'08 €
	Esquadres interiors	16	6'71 €	107'36 €
	Blocs ranurats	8	3'244 €	25'95 €
	Placa base 40x40	4	17'48 €	69'92 €
	Placa base 45x45	4	23'46 €	93'84 €
Elements d'unió	Caragols M12x120	4	2'162 €	8'65 €
	Caragols M12x70	133	0'976 €	129'81 €
	Rosques M12	137	0'1678 €	22'99 €
	Volanderes M12	137	0'1142 €	15'65 €
Cambra d'establiment	Bresca	1x5 kg	84 €/kg	420'00 €
	Pantalla (malla)	2x1'54 m <sup>2</sup>	15'12 €/m <sup>2</sup>	46'57 €
Ventilador i accessoris	Ventilador	1	1651'51 €	1.651'51 €
	Defenses	2	73'20 €	146'40 €
	Acoblaments	2	346'38 €	692'76 €
	Brides	2	107'07 €	214'14 €
	Peu	2	52'63 €	105'26 €
	Embocadures	2	268,49 €	536'98 €
			TOTAL	4.658'51 €

### 3.10.2. Cost de fabricació

#### Material

Taula 34. Preu dels materials

Material	Massa (kg)	Preu (kg/m <sup>3</sup> )	Cost
PMMA	64	1'6	102'40 €
PS – 30% Fibra de Vidre	344	1'75	602'00 €
		TOTAL	704'40 €

#### Procés de fabricació

En aquest apartat s'inclouen els costos estimats de realització de les peces en un taller extern a la universitat. S'inclouen tant el cost de fabricació com el del material. Per a això, s'ha emprat l'eina *Costing* del programa *Solidworks*, que ofereix un valor orientatiu. No obstant això, en cas de dur a terme el projecte, els preus poden canviar en funció de l'empresa, per la qual cosa no són valors definitius.

Taula 35. Cost dels processos de fabricació de les peces

Conjunt	Peça	Quantitat	Cost de fabricació
Cambra d'establiment	Marc per a bresca	1	250 €
	Marc per a pantalla	2	150 €
	Marc separador	2	150 €
Con de contracció		1	270 €
Zona de proves	Peça A	1	250 €
	Peça B	1	230 €
	Peça C	1	240 €
	Peça D	1	50 €
	Peça E	1	225 €
Zona de proves curta		1	250 €
Transició		1	240 €
Difusor		1	250 €
Trompeta		1	230 €
Suports	Suport A	1	370 €
	Suporte B/C	2	130 €
		TOTAL	3.285 €

### 3.10.3. Consum elèctric

El consum elèctric màxim del ventilador es produeix amb una potència de 3'4 kW, tal com s'extrau del punt 3.6.4. En la següent taula s'adjunten una sèrie de costos per hora de funcionament per a diverses potències, tenint en compte que el preu del quilowatt hora és d'uns 26 cèntims en l'hora més cara.

*Taula 36. Cost d'operació per consum elèctric*

Potència	Cost per hora
0'5 kW	13 cts
1 kW	26 cts
2 kW	52 cts
3 kW	78 cts
3'4 kW	88 cts

Aquests valors no són precisos, ja que depenen de la tarifa contractada i del moment del dia o de l'any. No obstant això, sí que serveixen per a mostrar que el cost de funcionament és irrisori en comparació amb el cost de fabricació: un assaig que dure 10 minuts, en el cas més desfavorable, a penes suposarà uns pocs cèntims.

### 3.10.4. Resum

*Taula 37. Resum de costos*

Tipus de cost	Cost individual	Cost total
Peces	4.658'51 €	7943'51 €
Fabricació	3.285'00 €	

## 4. Conclusions

Al llarg d'aquest treball, s'ha dissenyat un túnel de vent funcional, de grandària i cost reduïts, per a realització de mesuraments aerodinàmics. S'ha començat amb una definició de la geometria interior, provant l'aerodinàmica mitjançant l'eina de CFD *Ansys Fluent*, i també s'han fet uns càlculs previs termodinàmics i de resistència. Posteriorment, s'ha realitzat una selecció de materials i de components, i s'han dissenyat totes les peces necessàries. S'ha comprovat que resisteixen estructuralment totes elles, i s'ha especificat el mètode de fabricació. Finalment, s'ha dut a terme un estudi econòmic per a conèixer el cost de dur a terme aquest projecte.

D'altra banda, els objectius establits en el punt 2 s'han aconseguit: la geometria és la d'un túnel tipus NPL, de muntatge senzill, i de fàcil accessibilitat. La velocitat del vent objectiu s'aconsegueix amb el ventilador triat, i es poden provar maquetes de vehicles de fins a 1:20. Quant al cost, pròxim als 8.000 €, pot ser finançat pel departament d'enginyeria mecànica i de materials. No obstant això, en futures millores del disseny del túnel, seria convenient reduir la complexitat de les peces, per a reduir tot el possible aquest preu.

## Bibliografia

- [1] Anderson, J. D. (1995). *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. McGraw-Hill.
- [2] Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics* (Sixth edition). McGraw Hill Education.
- [3] Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope, A., & Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing* (3rd ed). Wiley.
- [4] Bradshaw, P., & Pankhurst, R. C. (1964). *The design of low-speed wind tunnels*. Progress in Aerospace Sciences, 5, 1-69. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(64\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0376-0421(64)90003-X)
- [5] *Build your own wind tunnel*. (s. f.). Recuperat 20 de juliol de 2021, de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/build.html>
- [6] Duell, E. G., Kharazi, A., Muller, S., Ebeling, W., & Mercker, E. (2010). *The BMW AVZ wind tunnel center*. 2010-01-0118. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0118>
- [7] Hermanos Wright. (2021). En Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hermanos\\_Wright&oldid=135978277](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hermanos_Wright&oldid=135978277)
- [8] Idelčik, I. E. (2008). *Handbook of hydraulic resistance* (3. ed., 6. Jaico impression). Jaico Publ. House.
- [9] Mataix, C. (2004). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (2ª ed. amp. y puesta al día, rev. redactada en el SI). Oxford Univ. Press; AlfaOmega.
- [10] Mehta, R. D. (1979). *The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers*. Progress in Aerospace Sciences, 18, 59-120. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(77\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0376-0421(77)90003-3)
- [11] Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979). *Design rules for small low speed wind tunnels*. The Aeronautical Journal, 83(827), 443-453. <https://doi.org/10.1017/S0001924000031985>
- [12] Newey, A. (2019). *Cómo hacer un coche*. Planeta.
- [13] Osma, M. F. (2019a, Novembre 14). *El túnel de viento en la Fórmula 1*. Aerodinámica F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-tunel-de-viento-en-la-formula-1/>
- [14] Osma, M. F. (2019b, Desembre 31). *Pruebas aerodinámicas en pista*. Aerodinámica F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/12/pruebas-aerodinamicas-en-pista/>
- [15] Prandtl, L. (1933, Octubre). *Attaining a steady air stream in wind tunnels* [Report]. UNT Digital Library. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc63512/>
- [16] Robertson, J. M., & Fraser, H. R. (1960). *Separation prediction for conical diffusers*. Journal of Basic Engineering, 82(1), 201-207. <https://doi.org/10.1115/1.3662524>
- [17] Schubauer, G. B., Spangenberg, W. G., & Klebanoff, P. S. (1950, Gener). *Aerodynamic characteristics of damping screens* [Report]. UNT Digital Library. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc55303/>

[18] Túnel de viento. (2021). En Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel\\_de\\_viento&oldid=134224955](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BAnel_de_viento&oldid=134224955)

[19] *Types of wind tunnels*. (s. f.). Recuperat 20 de juliol de 2021, de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>

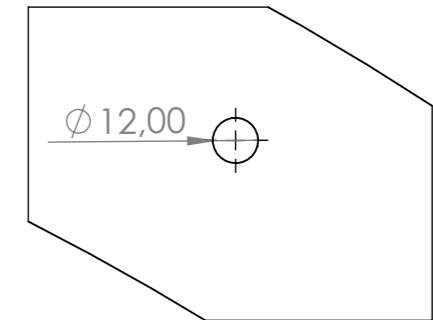
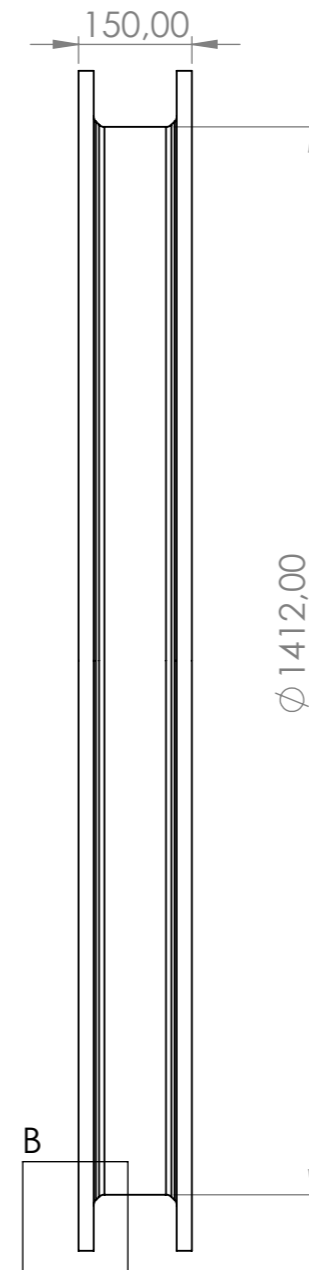
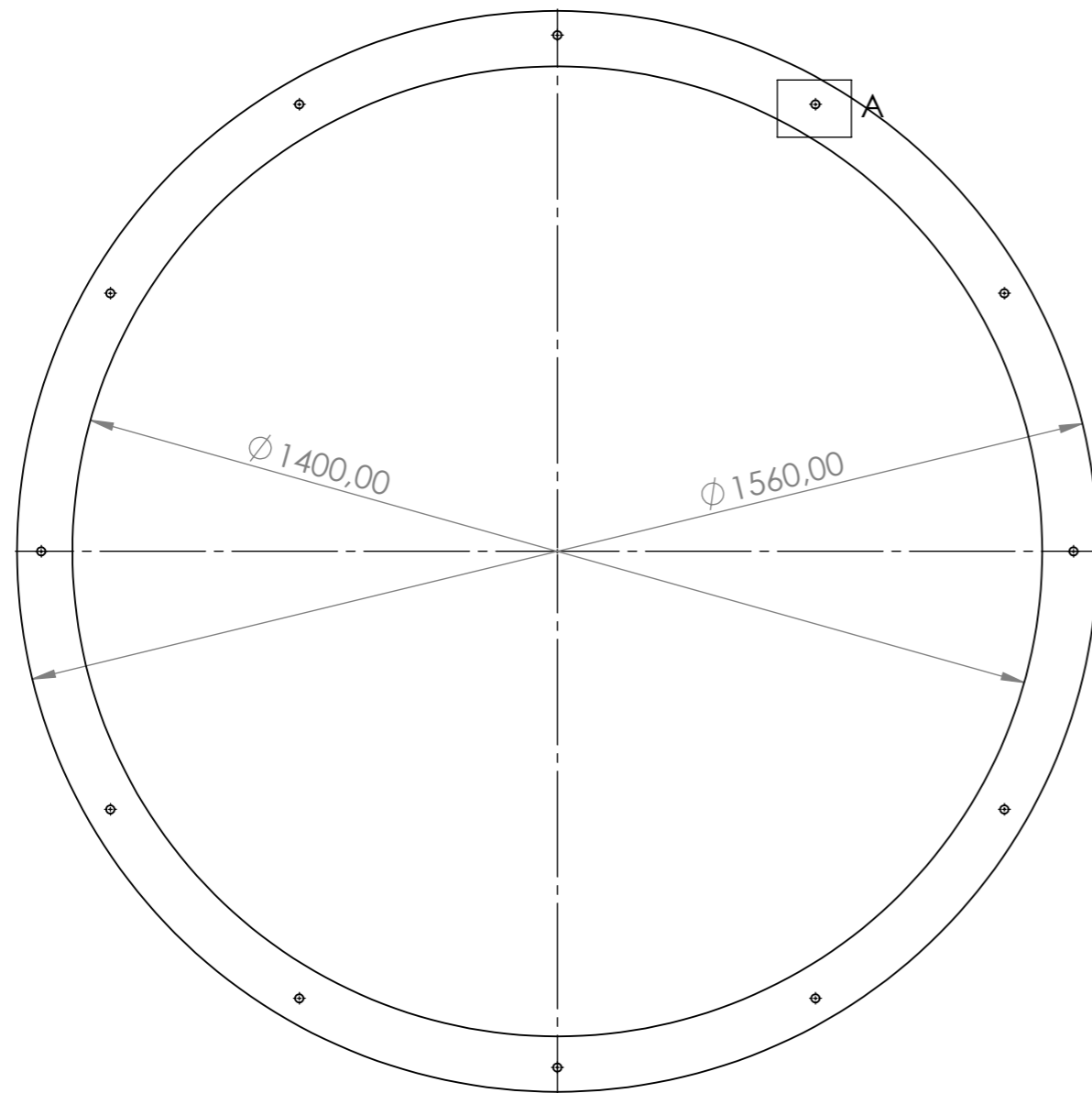
[20] *Wind tunnel*. (s. f.). Recuperat 20 de juliol de 2021, de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunnel1.html>

[21] *Wind tunnel testing*. (s. f.). Recuperat 20 de juliol de 2021, de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntest.html>

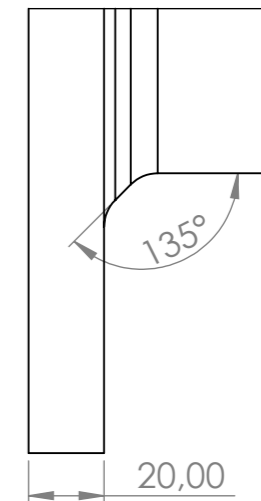


# **ANNEXOS**

# Plànols





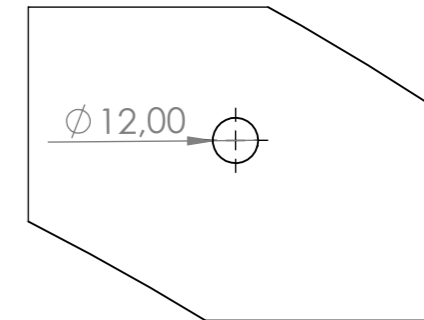
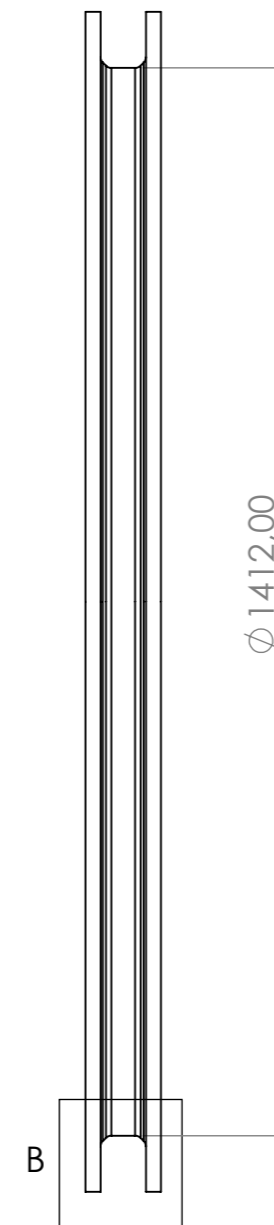
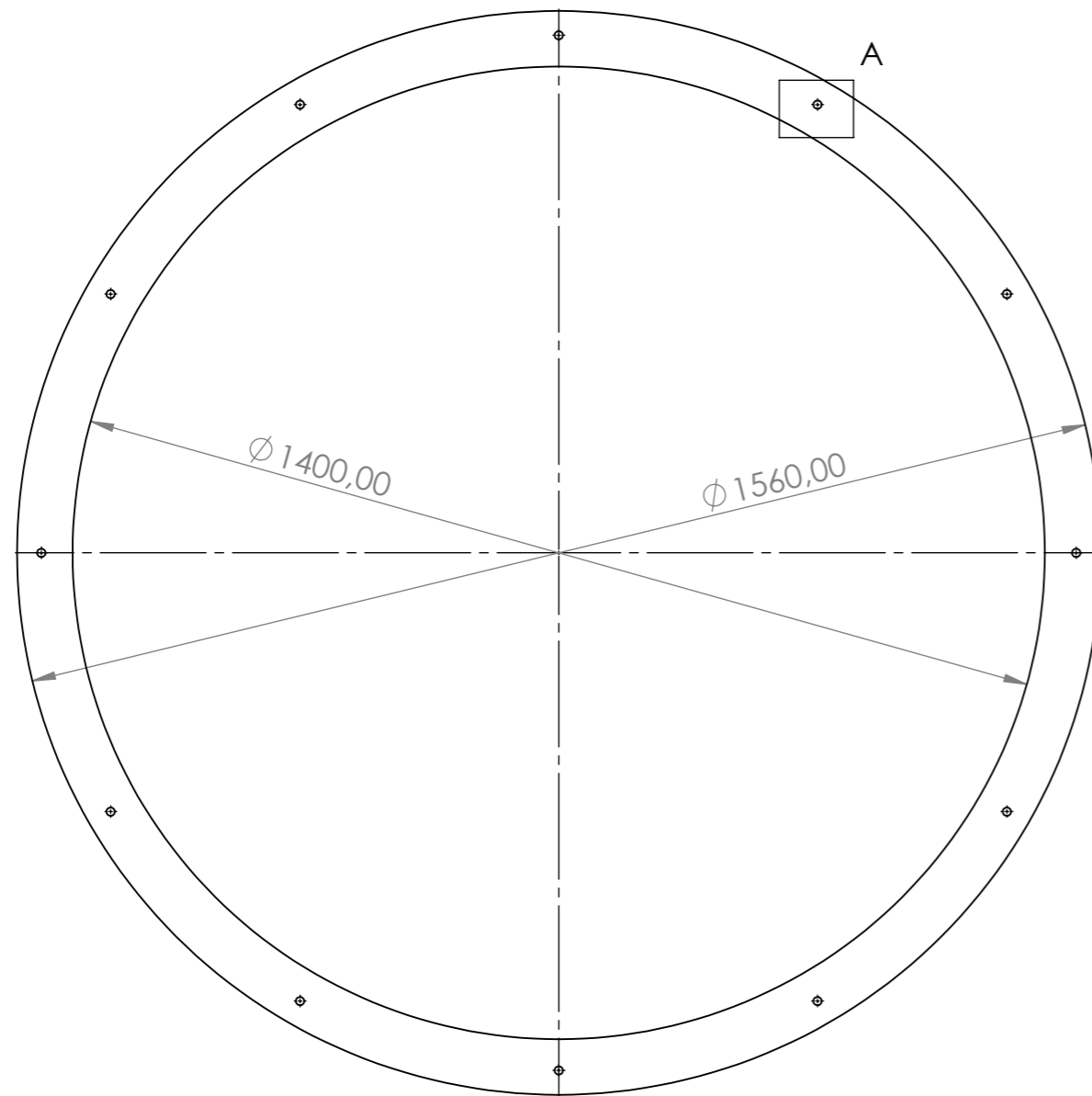
DETALL A  
ESCALA 1 : 2



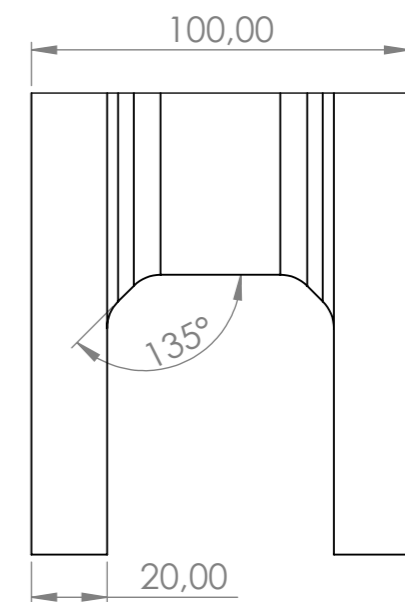
DETALL B  
ESCALA 1 : 2

Tots els arrodoniments de R10

Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES		
		Nom:	Cambra d'establiment: Marc de la bresca		
Material:	PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	<b>Plànol 1</b>		A3
Totes les cotes en mm menys les indicades					E 1:10



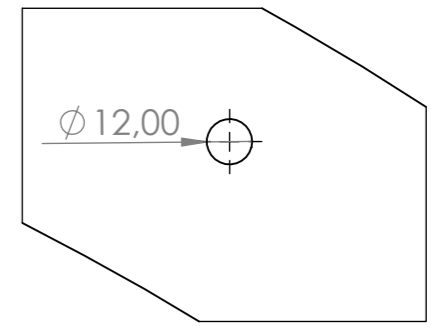
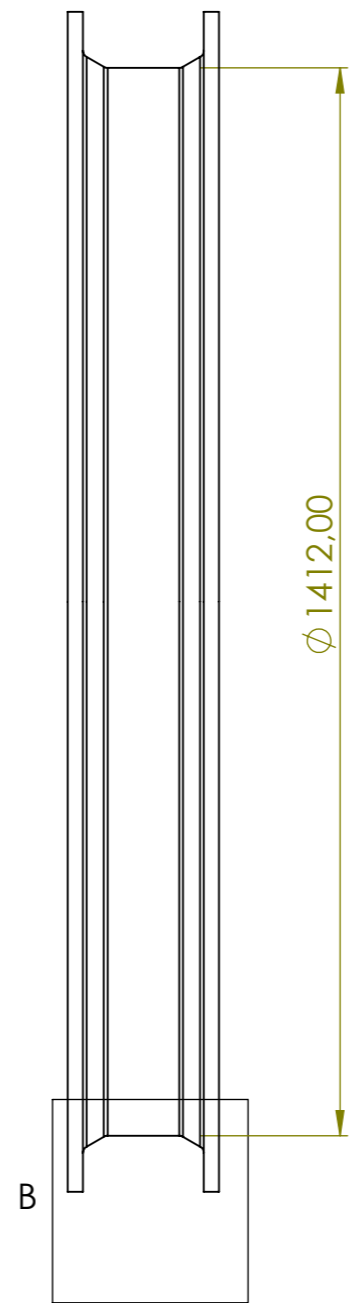
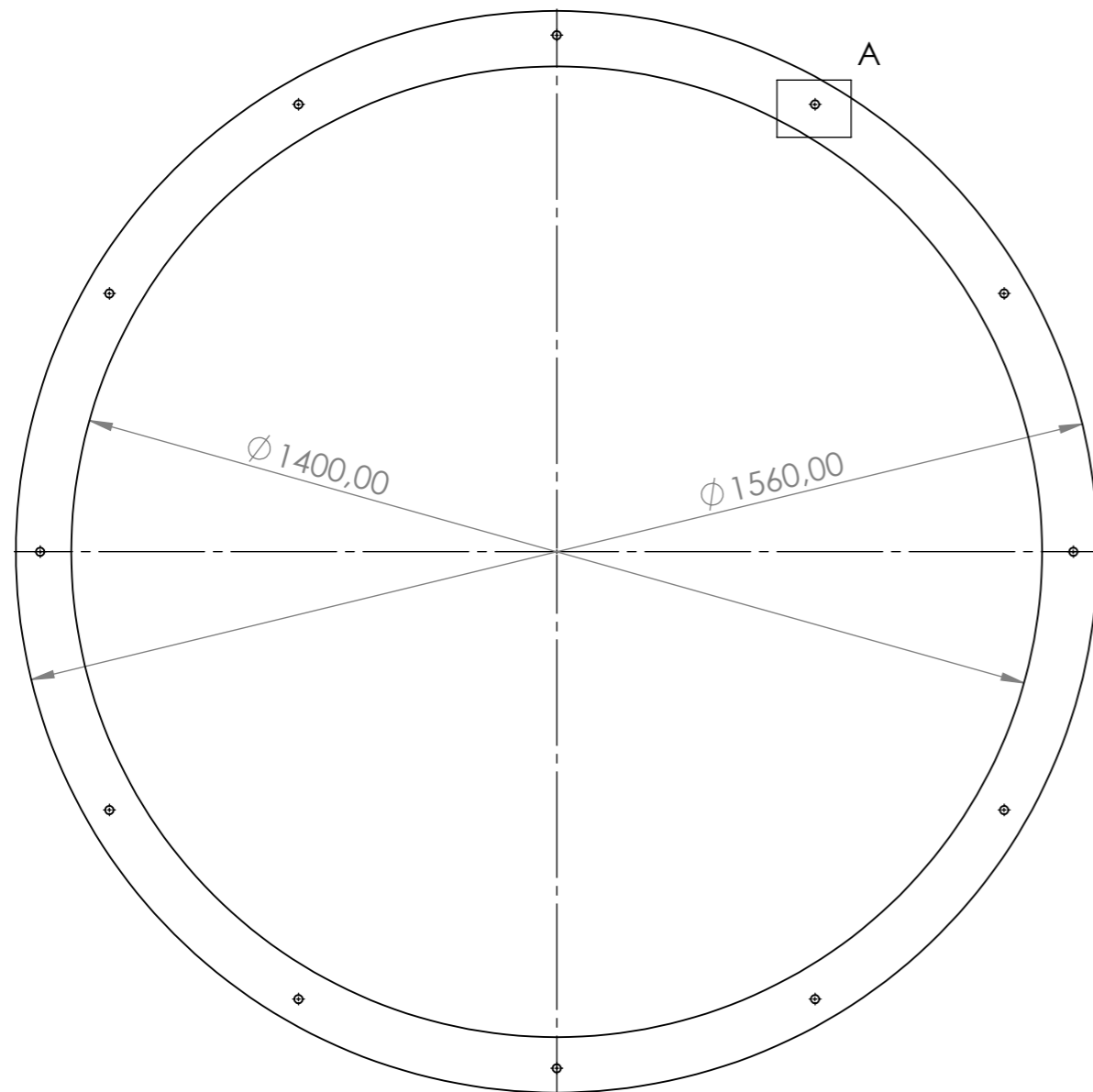
DETALL A  
ESCALA 1 : 2



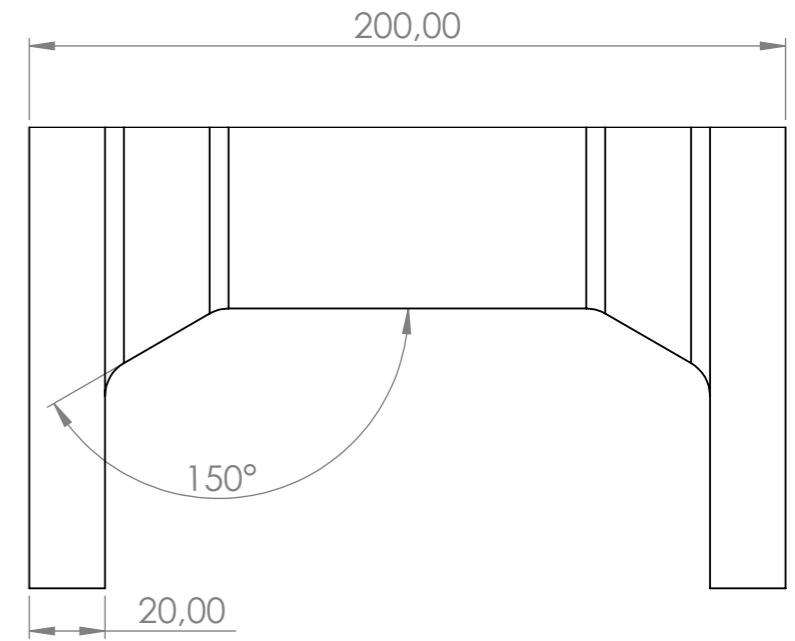
DETALL B  
ESCALA 1 : 2

Tots els arrodoniments són R10

Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES		
		Nom:	Cambra d'establiment: Marc per a pantalles		
Material:	PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	<h1>Plànol 2</h1>		
Totes les cotes en mm menys les indicades					
			E 1:10		



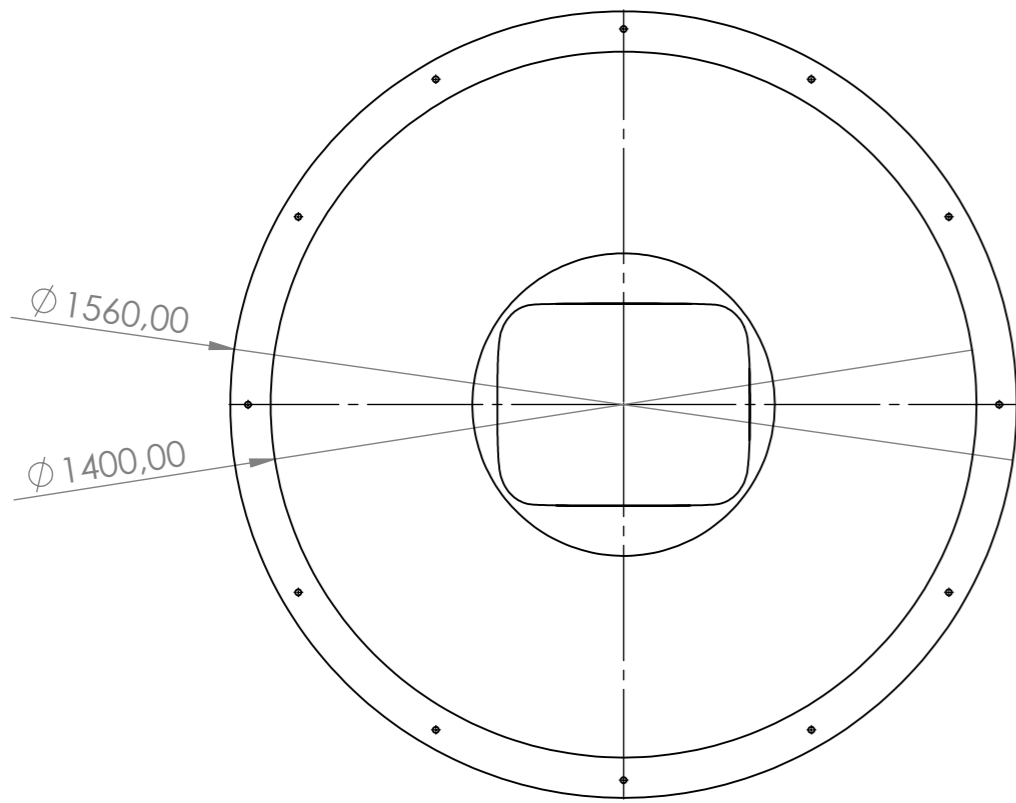
DETALL A  
ESCALA 1 : 2



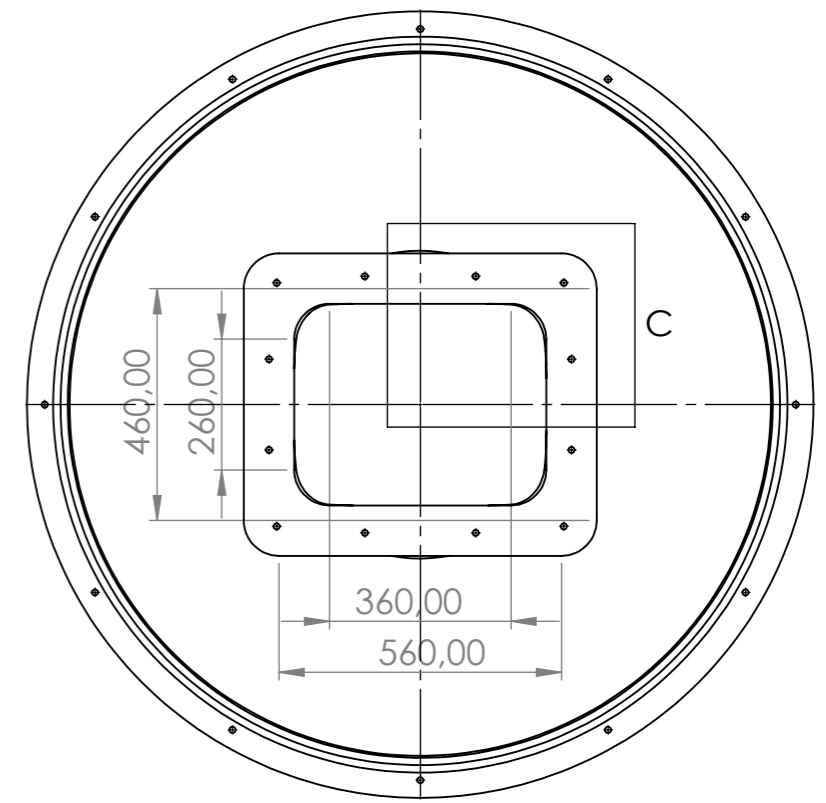
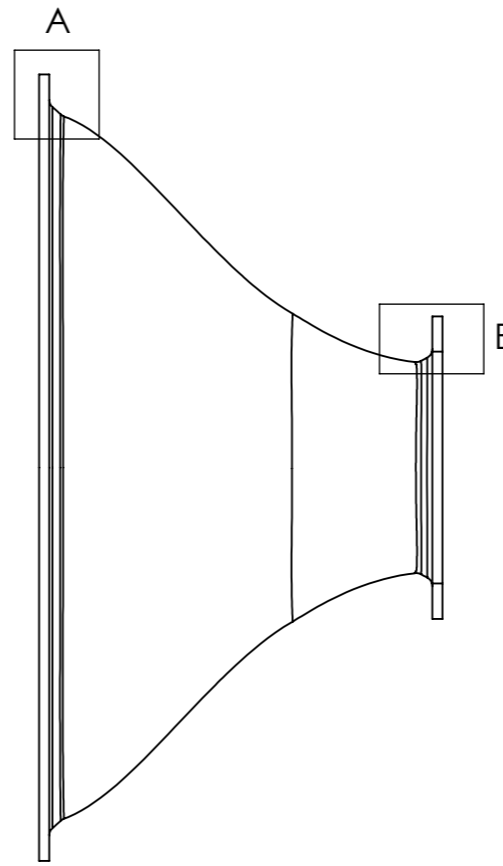
DETALL B  
ESCALA 1 : 2

Tots els arrodoniments són R10

Sistema:		Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES
		Nom:	Cambra d'establiment: Marc separador
Material:	PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	A3
Totes les cotes en mm menys les indicades		<h1>Plànol 3</h1>	
		E 1:10	

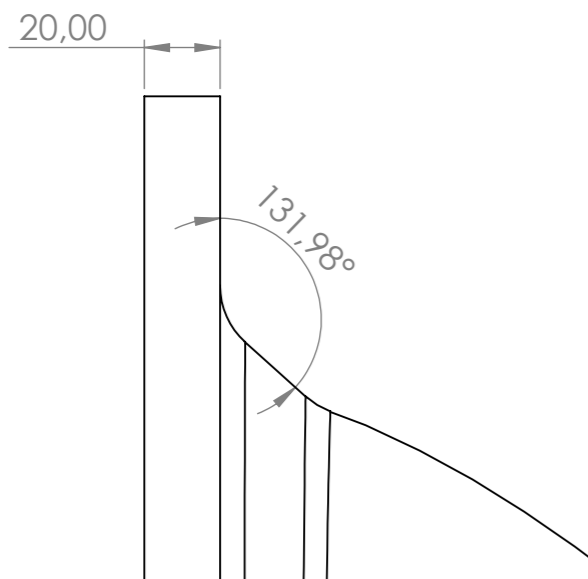
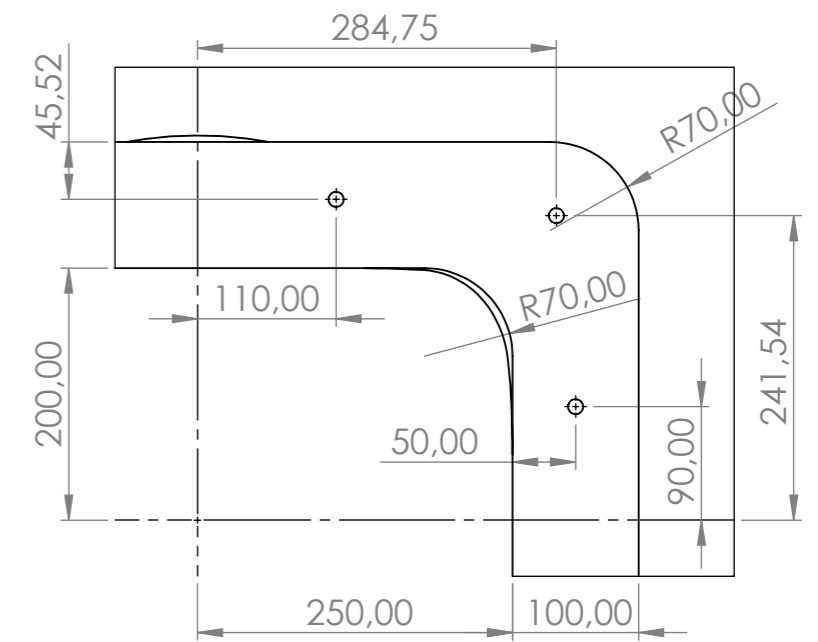


Tots els forats són passants de R12

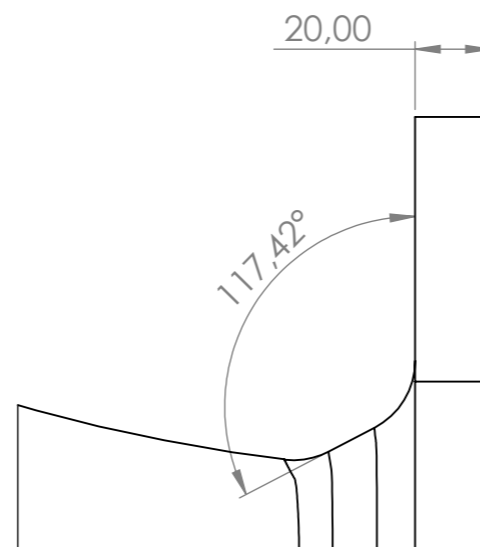


DETALL C  
ESCALA 1 : 6

Tots els forats són passants de R12




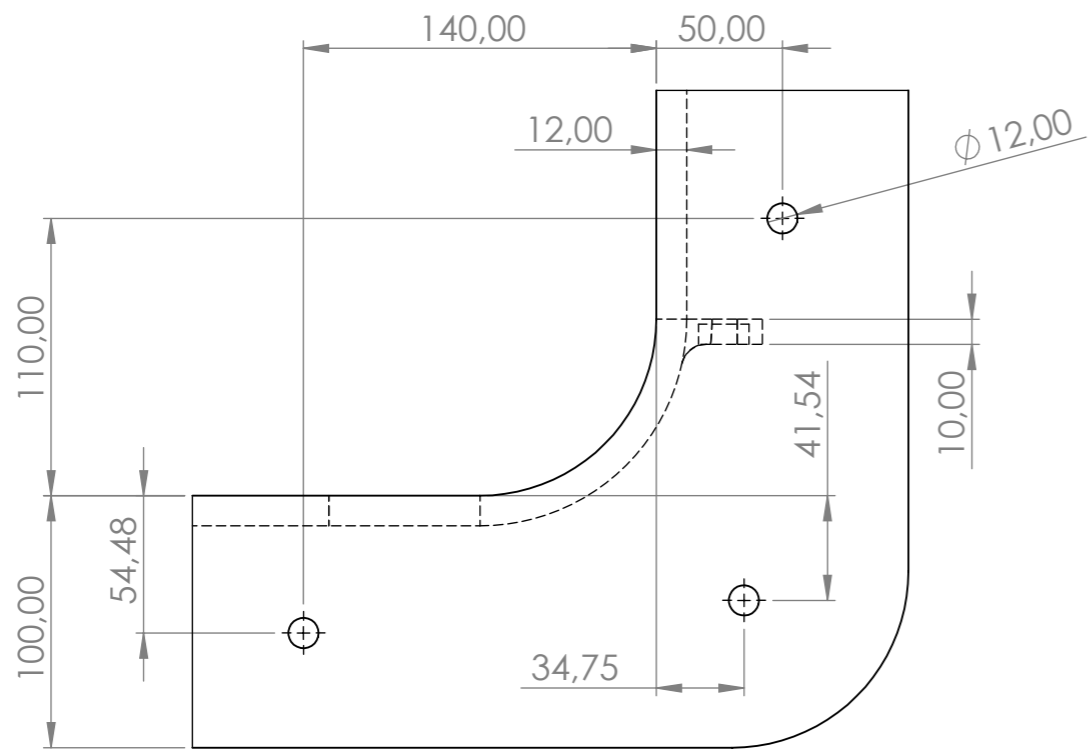
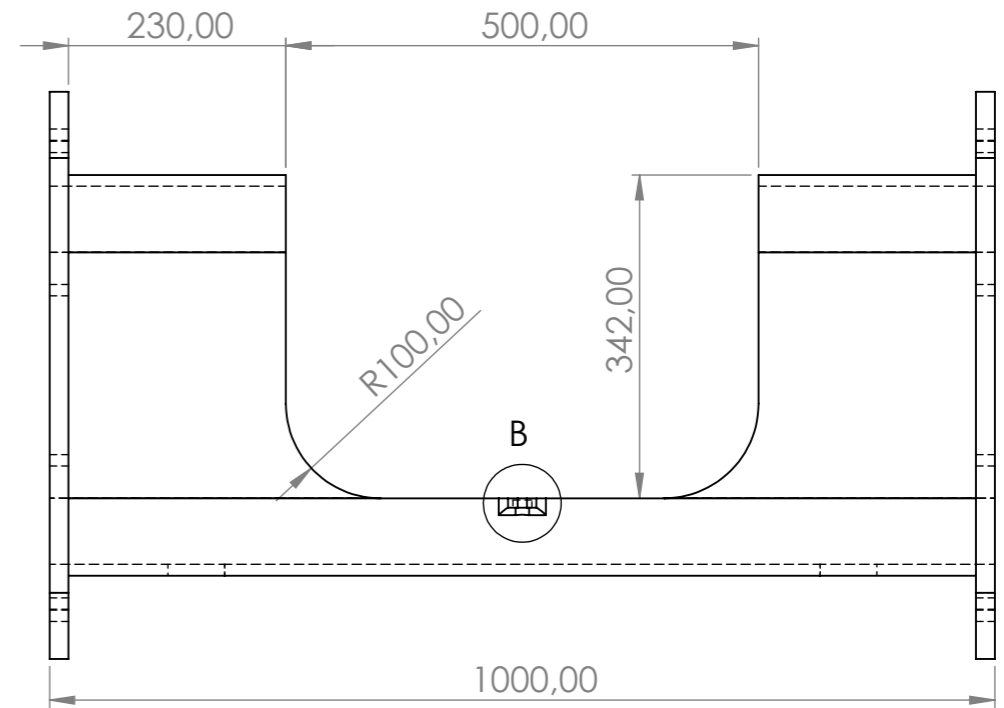
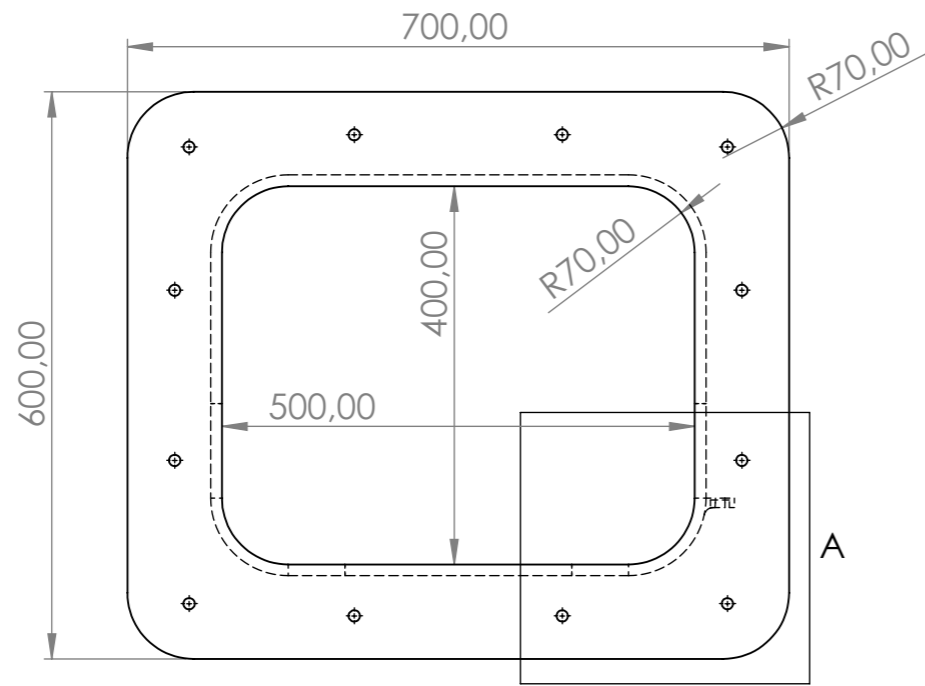
DETALL A  
ESCALA 1 : 2



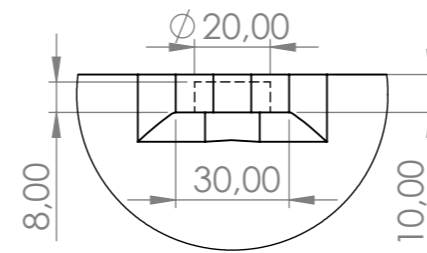
DETALL B  
ESCALA 1 : 2

Tots els arrodoniments en els detalls A i B són R10

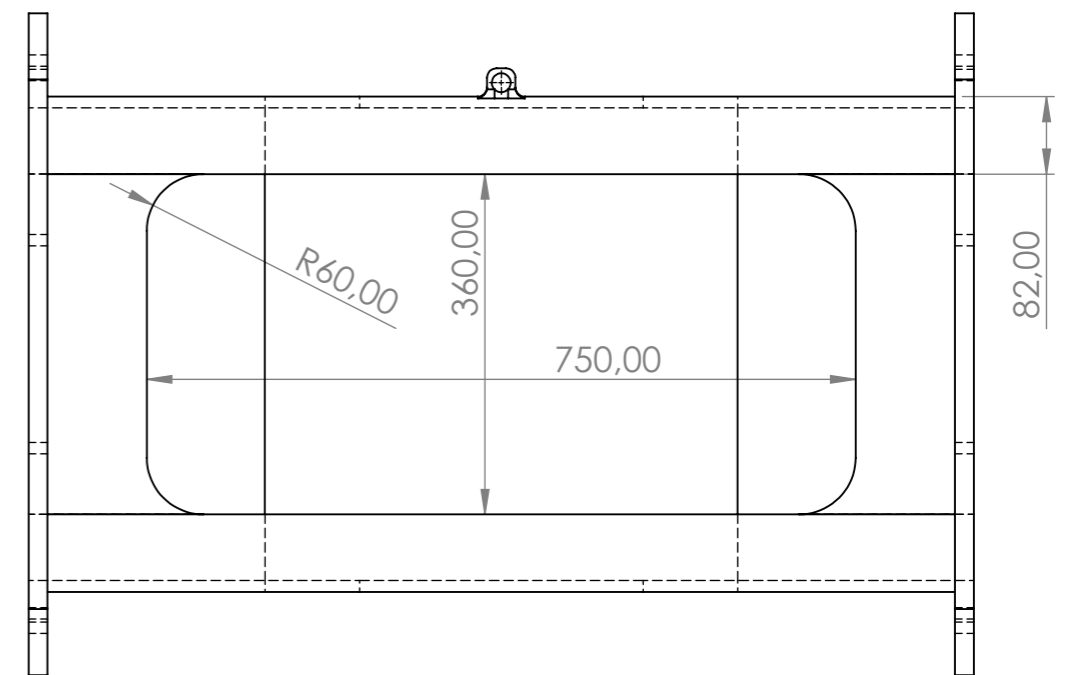
Sistema:	Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Nom: Con de contracció	
Material: PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	A3
Totes les cotes en mm menys les indicades	Plànol 4	
		E 1:20



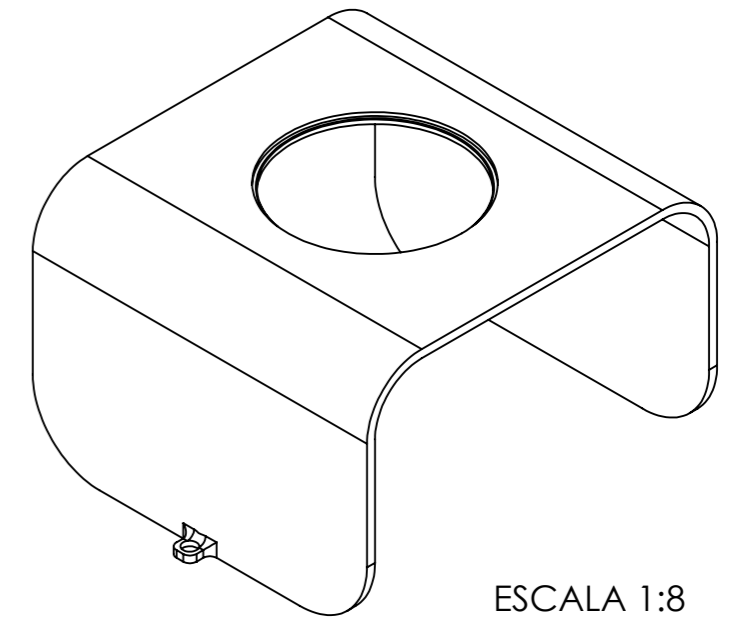
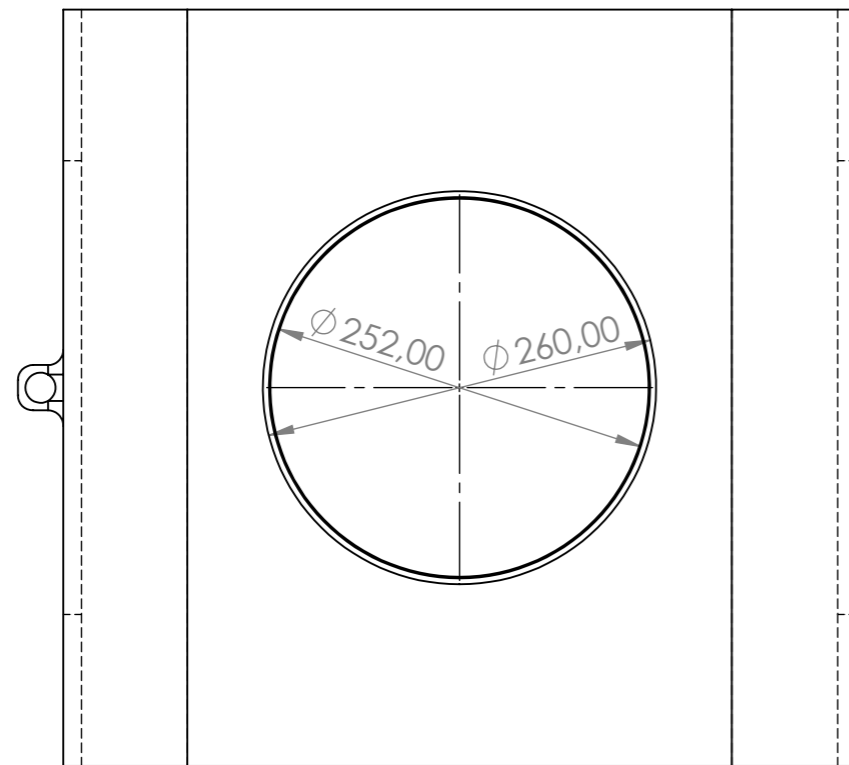
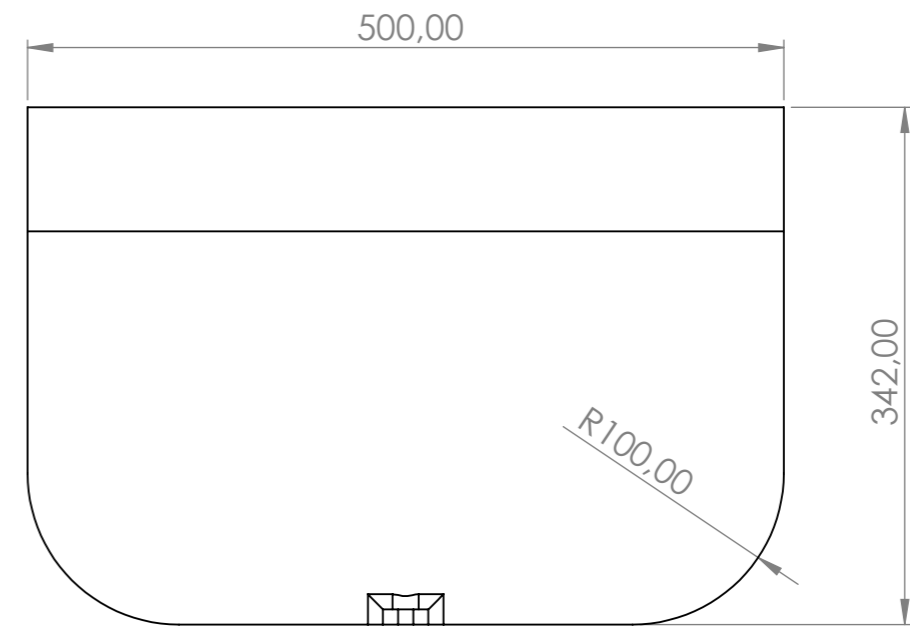
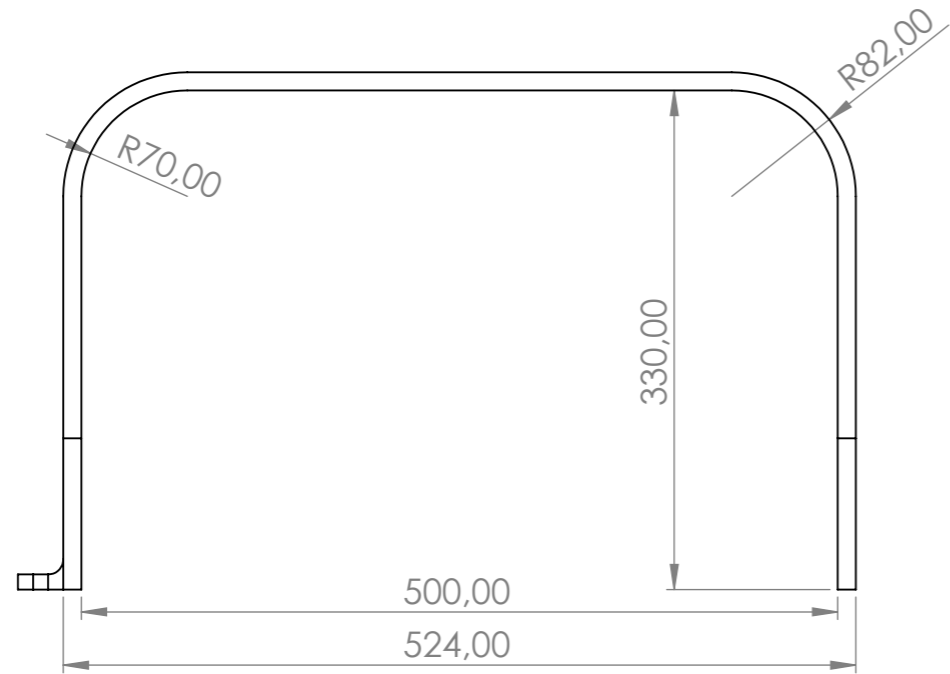
DETALL A  
ESCALA 1 : 3



DETALL B  
ESCALA 1 : 2

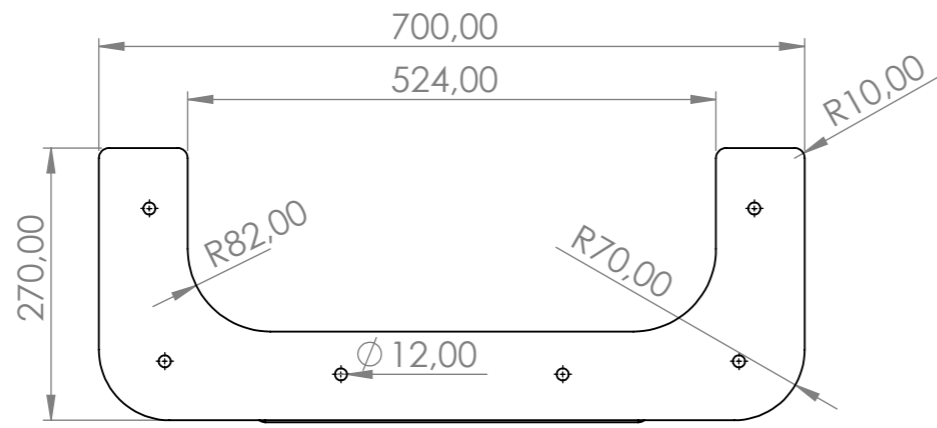


Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES		
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI		Nom:	Zona de Proves: Peça A		
Material:	PMMA	Núm. de dibuix:	Plànol 5A		A3
Totes les cotes en mm menys les indicades					E 1:8

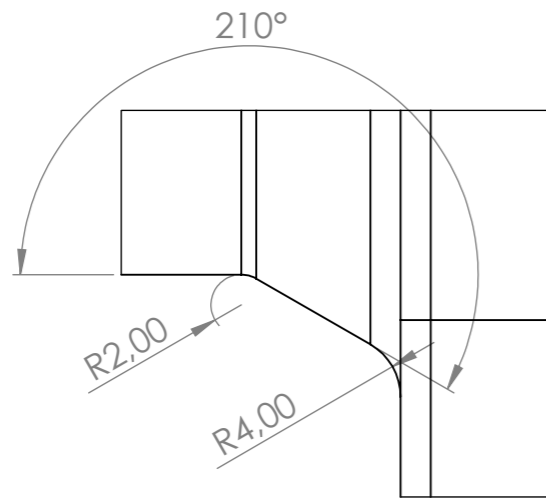


Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES		
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI		Nom:	Zona de Proves: Peça B		
Material:	PMMA	Núm. de dibuix:	Plànol 5B		A3
Totes les cotes en mm menys les indicades					E 1:5

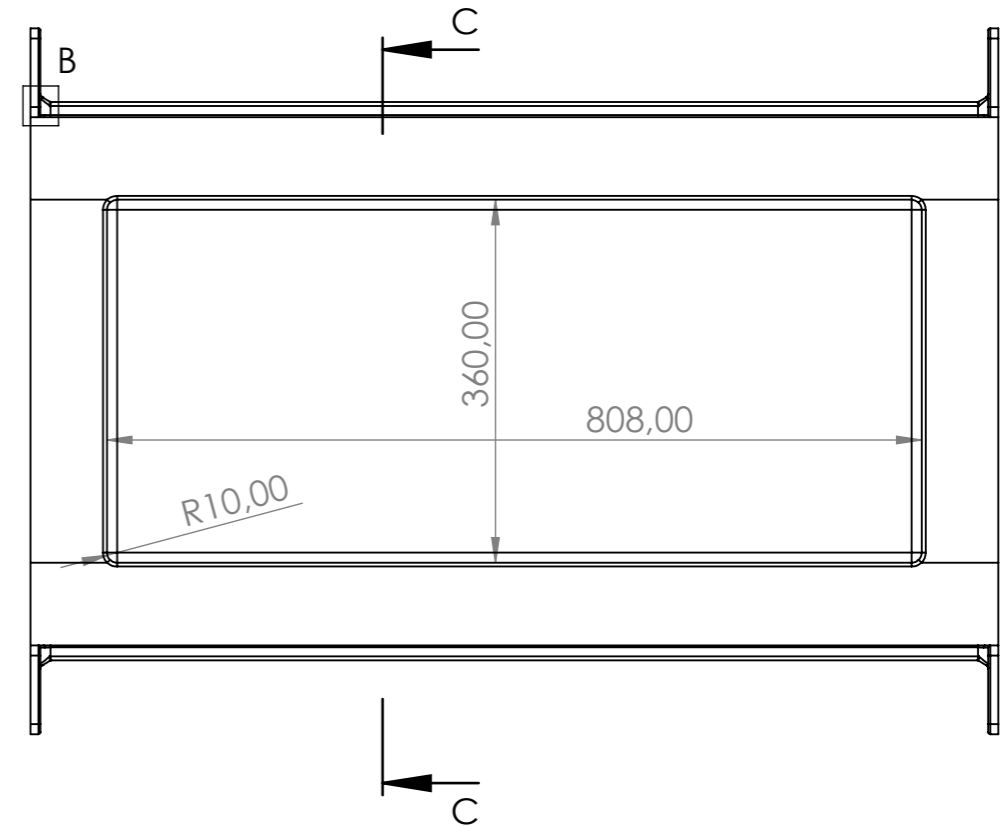
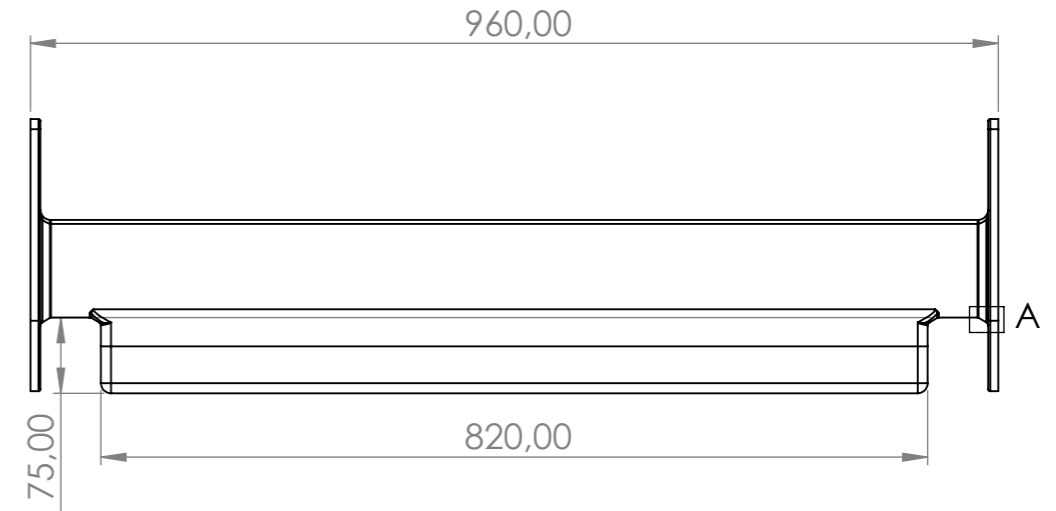
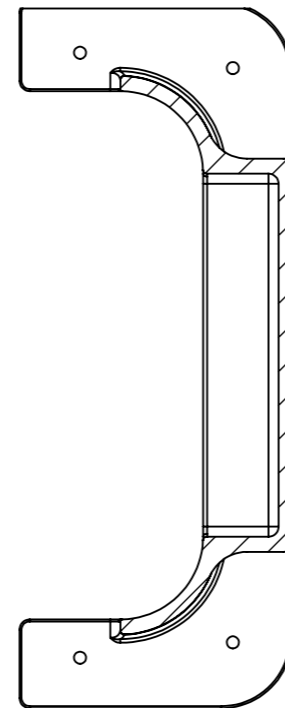




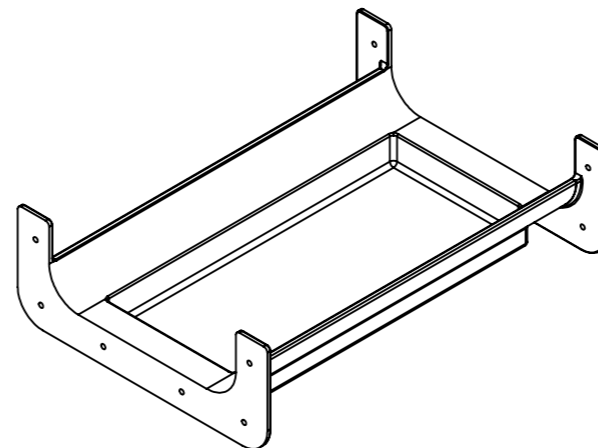
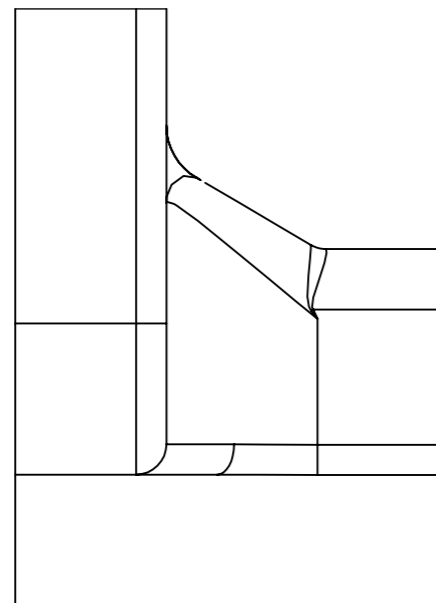
DETALL A  
ESCALA 2 : 1



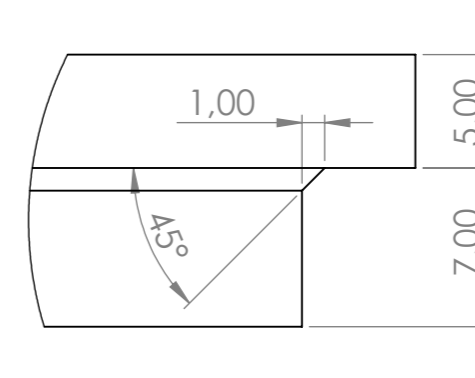
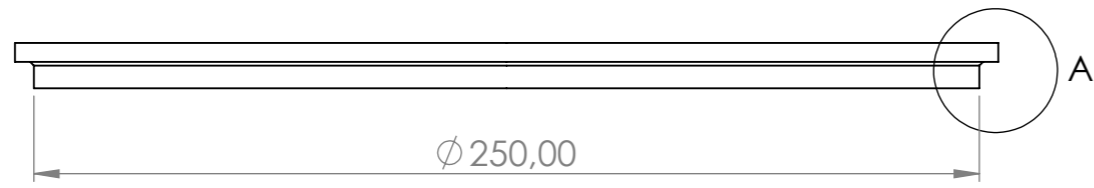
SECCIÓ C-C  
ESCALA 2 : 15



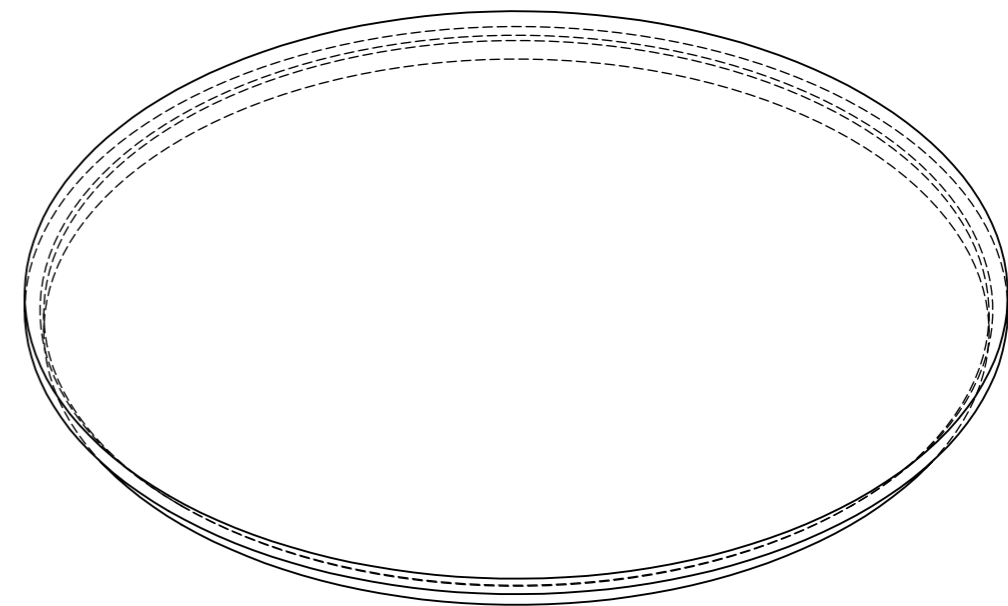
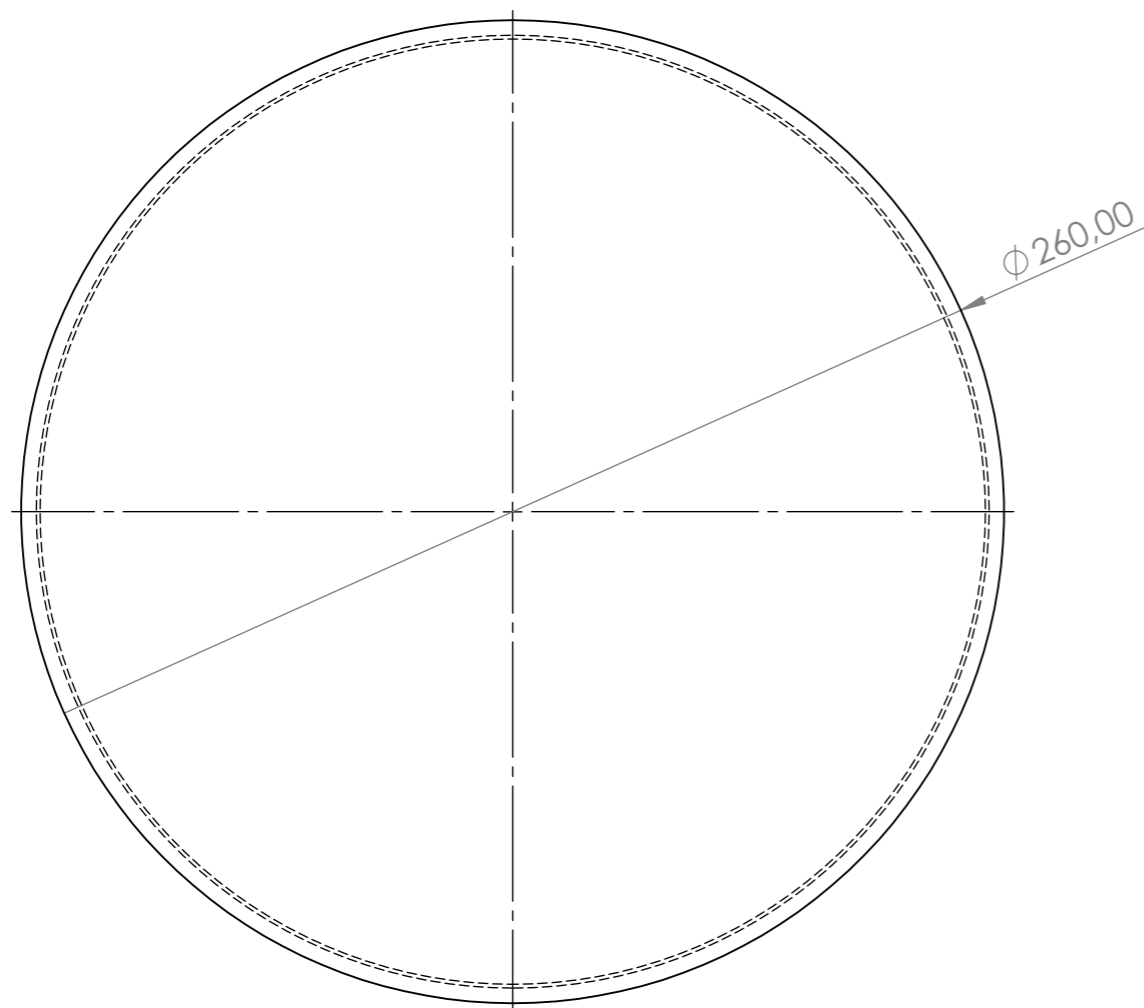
DETALL B  
ESCALA 2 : 1





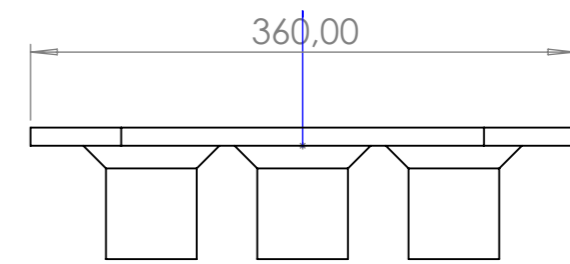
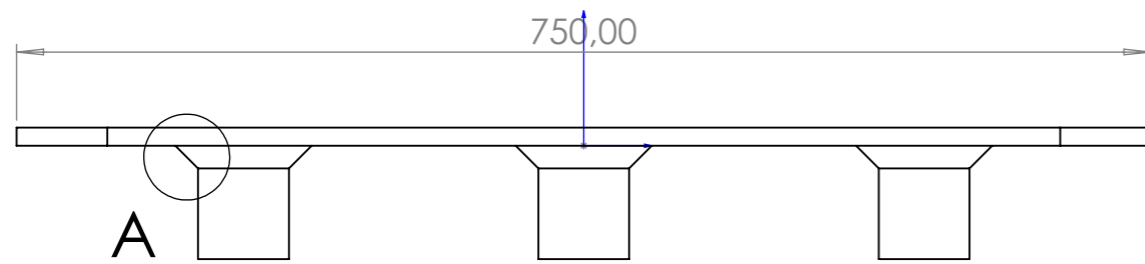
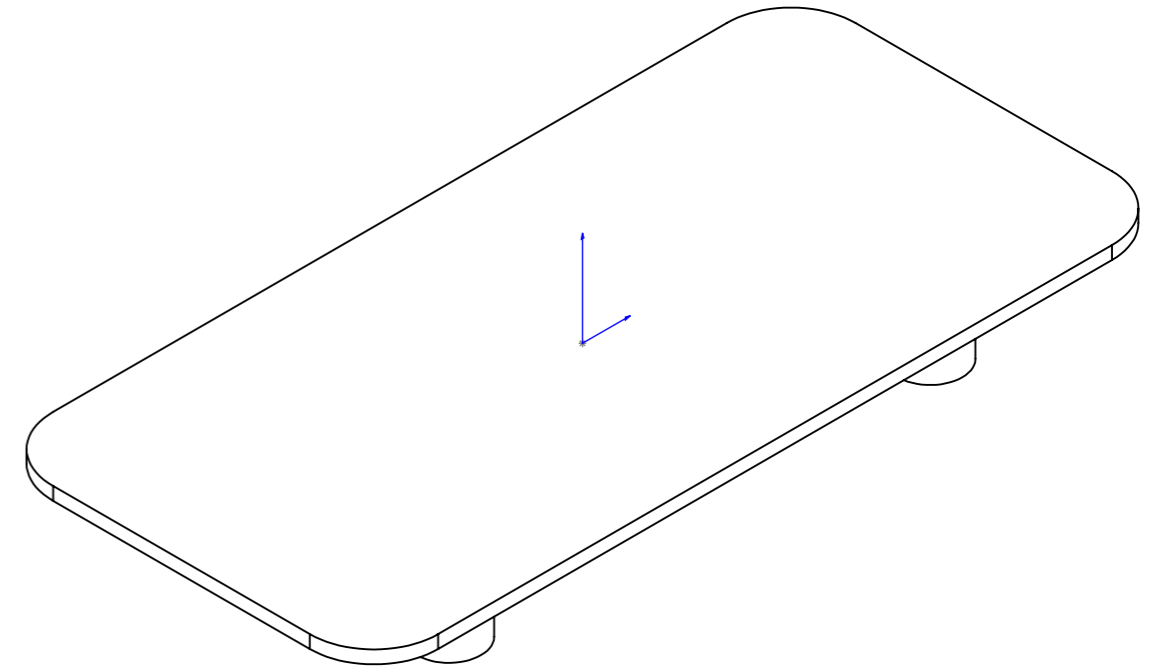
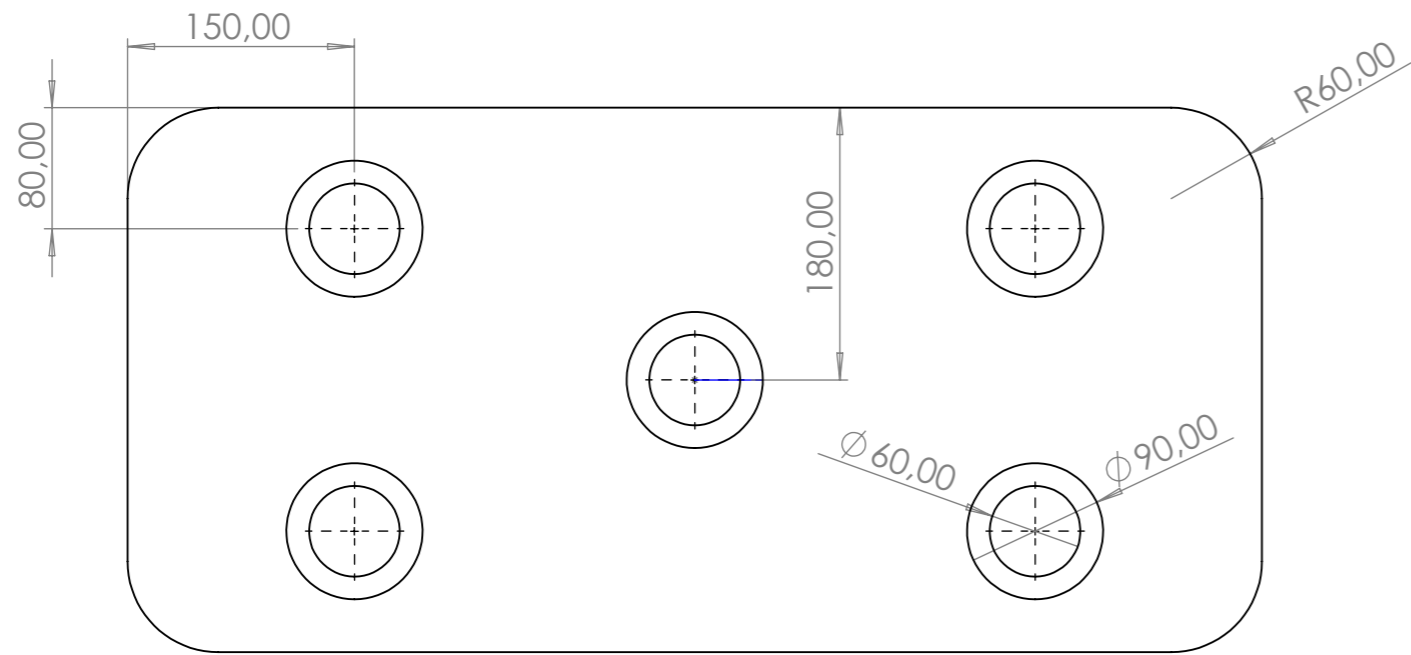
Sistema:	Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES	
Nom:	Zona de Proves: Peça C	
Material: PMMA	Núm. de dibuix:	A3
Totes les cotes en mm menys les indicades		Plànol 5C
		E 2:15



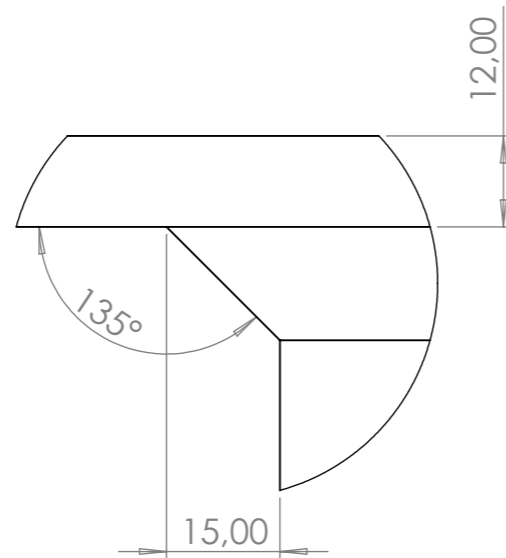
DETALL A  
ESCALA 3 : 1



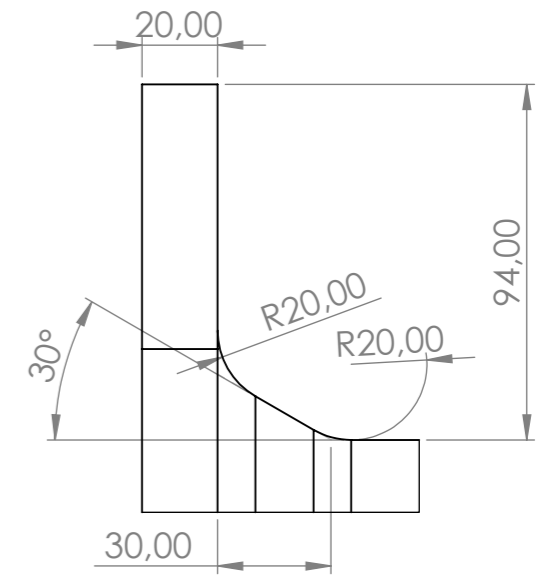
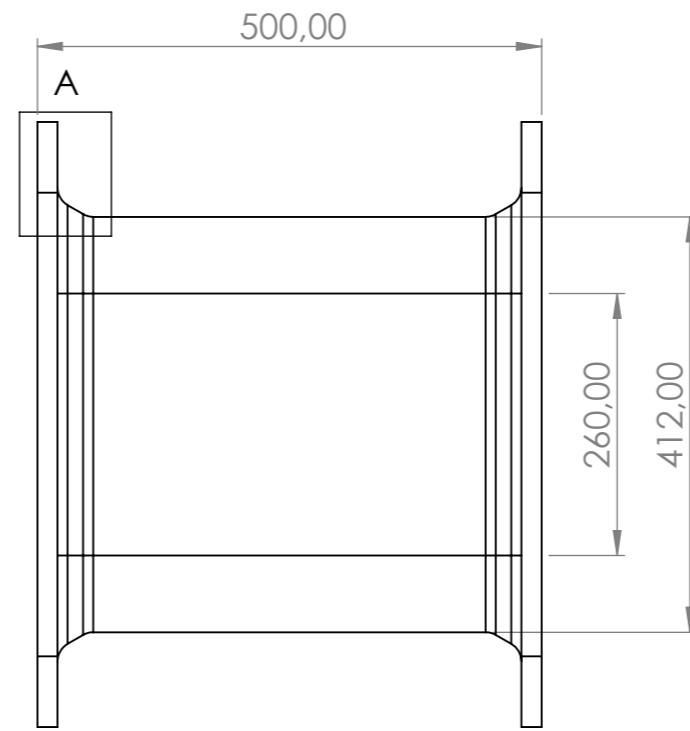
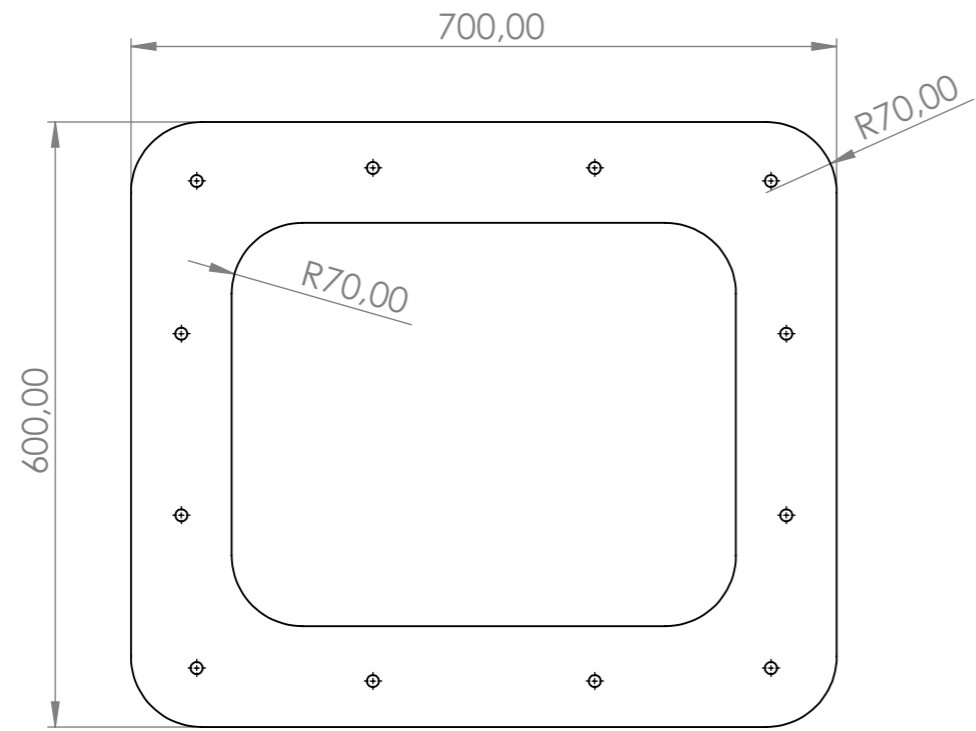
Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b> CAMPUS D'ALCOI		Treball TFG: DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MÈDICIONS AERODINÀMIQUES			
Material:		Nom:		Zona de Proves: Peça D	
PMMA		Núm. de dibuix:		A3	
Totes les cotes en mm menys les indicades		Plànol 5D			E 1:2



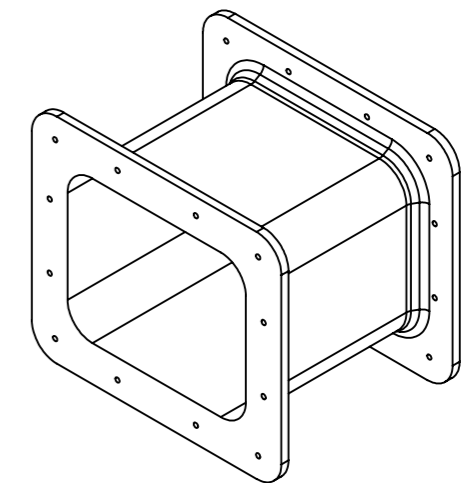
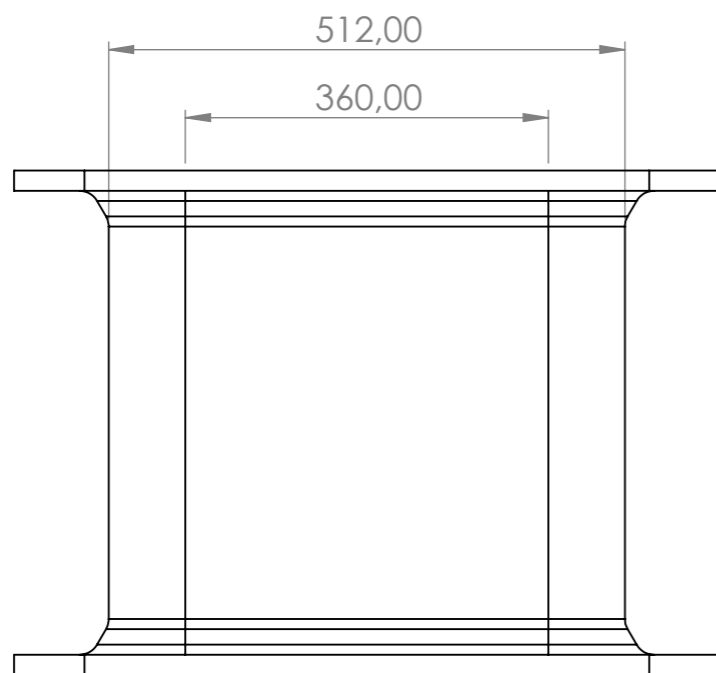
DETALL A  
ESCALA 1 : 1



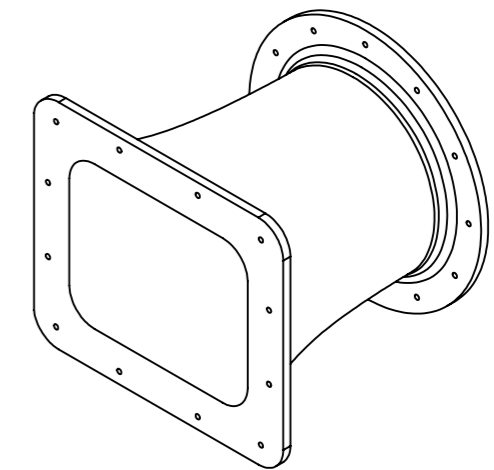
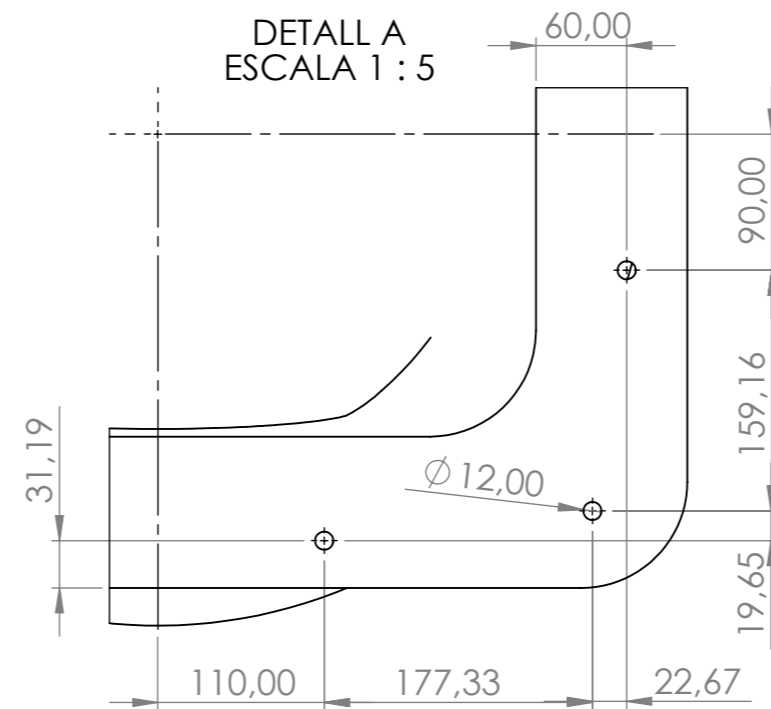
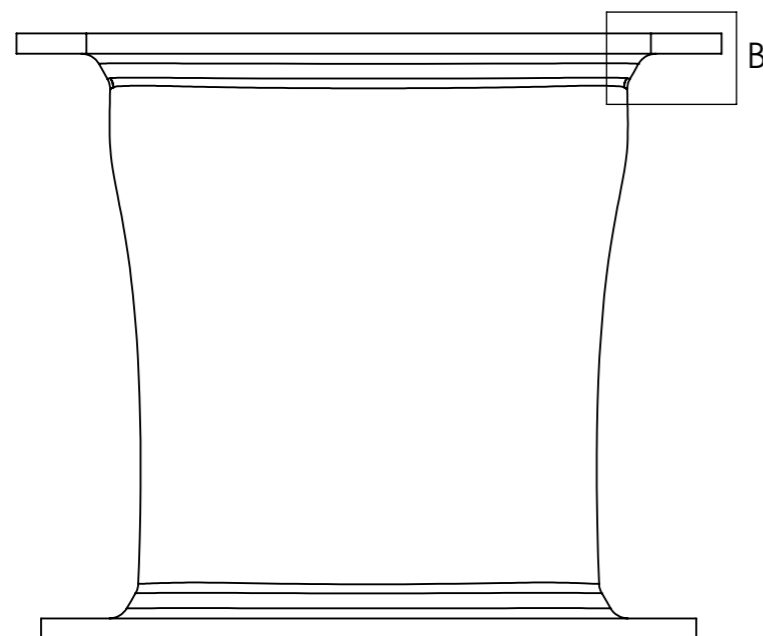
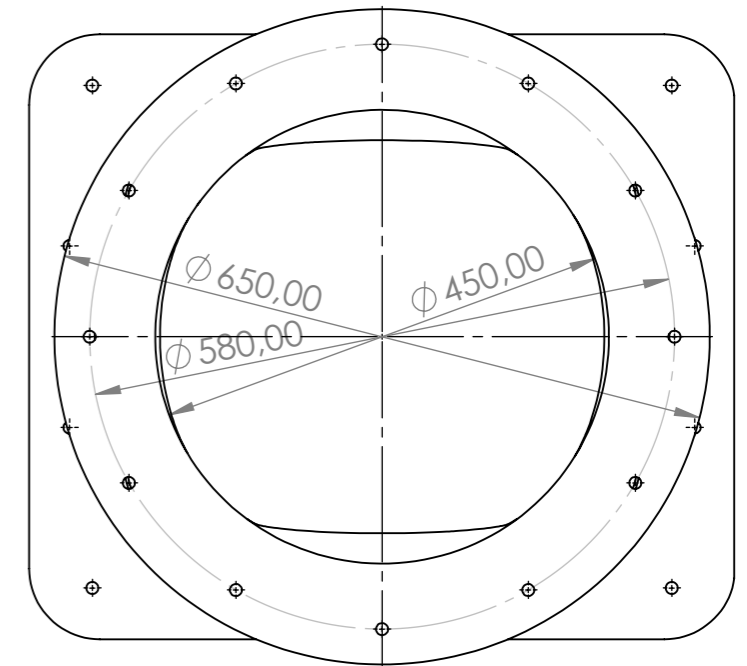
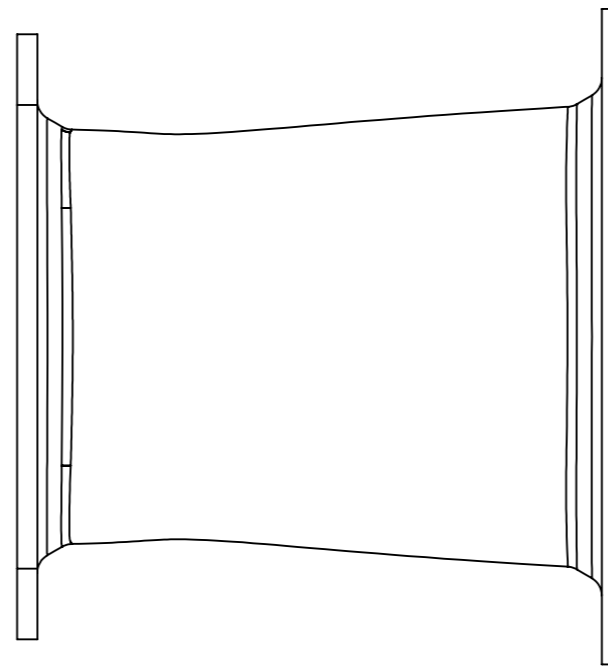
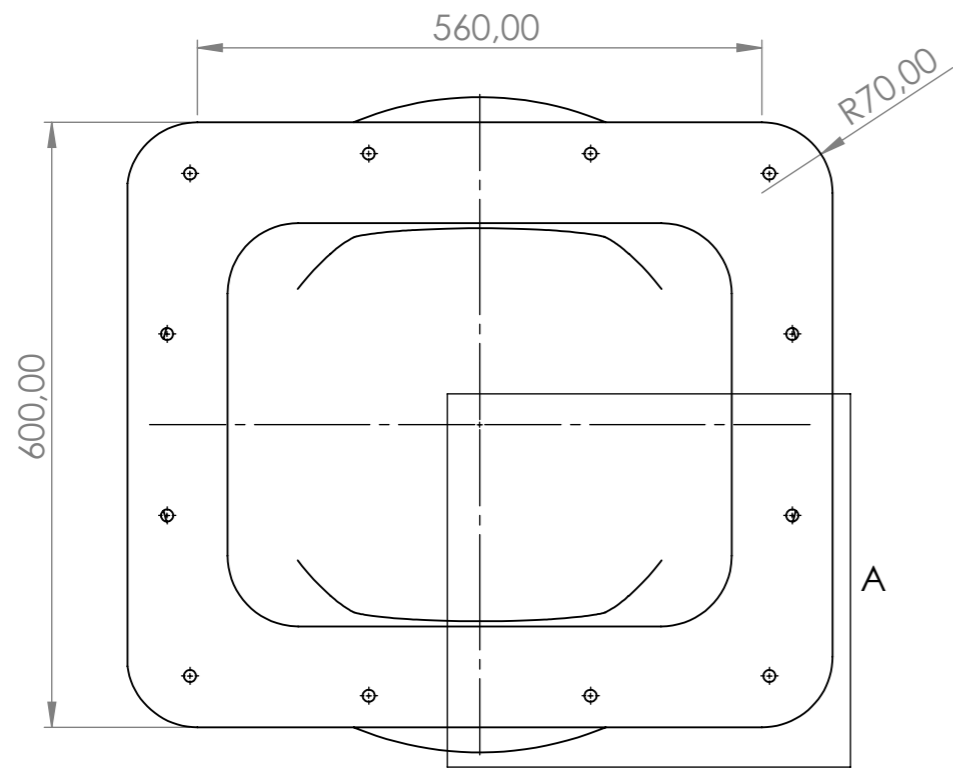
Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MÈDICIONS AERODINÀMIQUES		
		Nom:	Zona de proves: Pieza E		
Material:	PMMA	Núm. de dibuix:	Plànol 5E		A3
Totes les cotes en mm menys les indicades					E 1:5



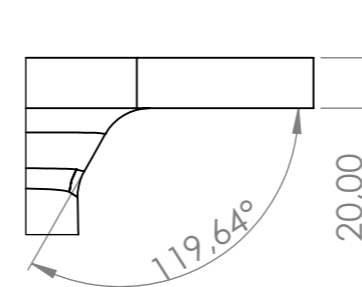
DETALL A  
ESCALA 1 : 2



Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES				
Nom:	Zona de proves curta				
Material:	PMMA	Núm. de dibuix:	Plànol 6		
Totes les cotes en mm menys les indicades					A3 E 2:15

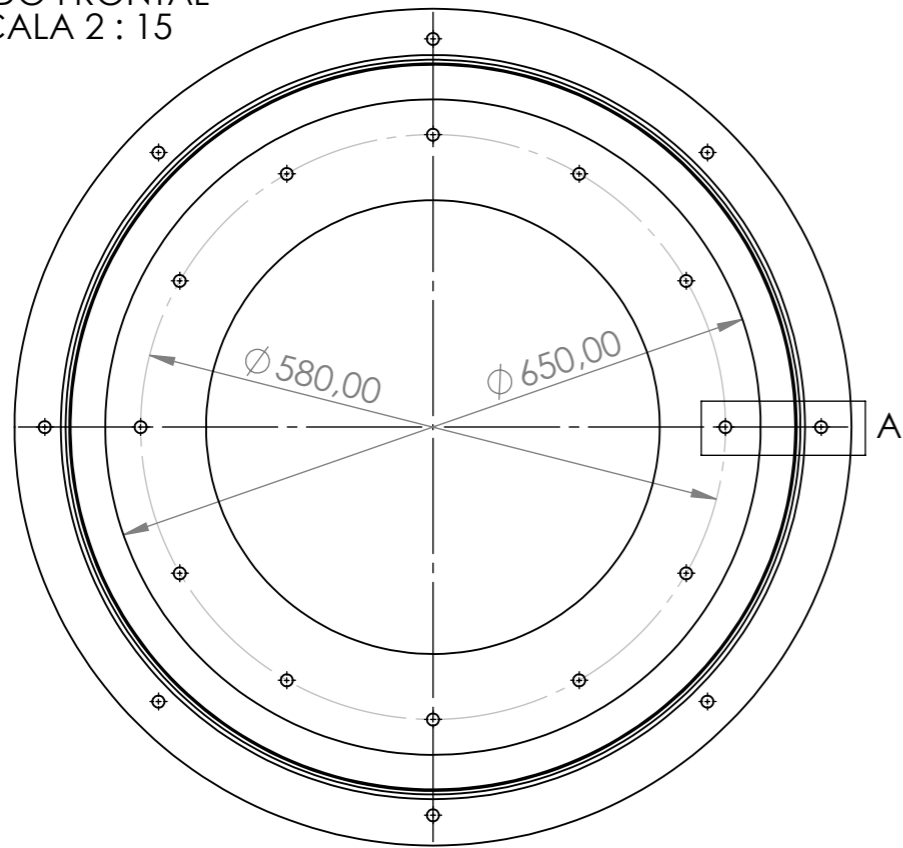


DETALL B  
ESCALA 1 : 3

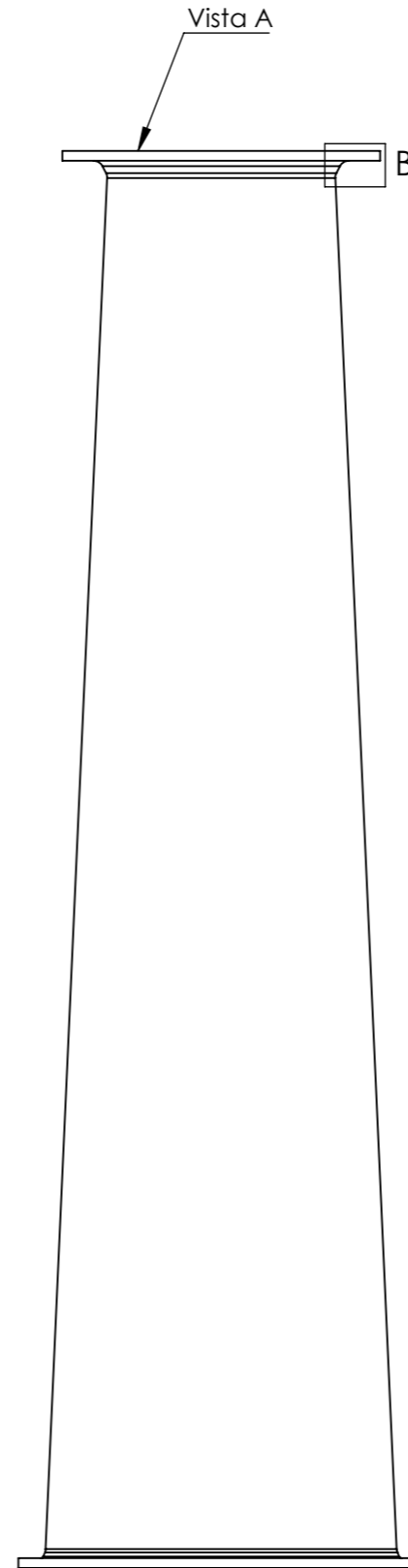
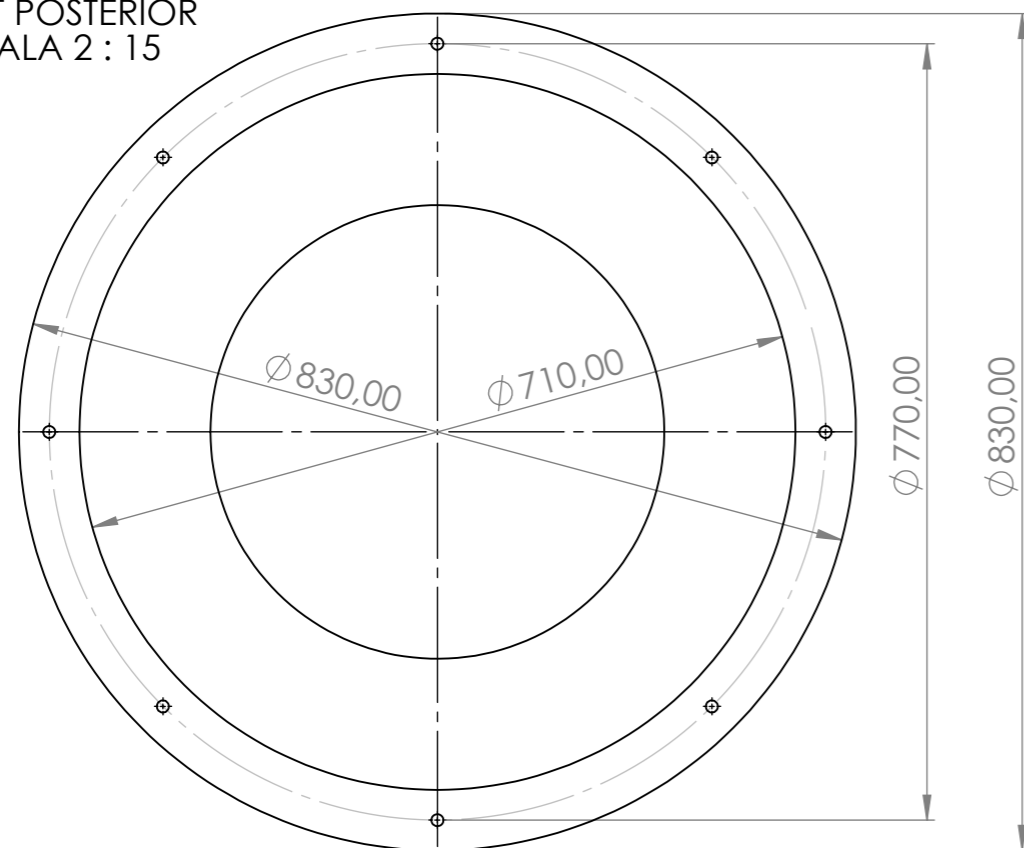


Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES				
Nom:	Transició de la Zona de Proves al Difusor				
Material:	PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	Plànol 7		
Totes les cotes en mm menys les indicades			A3		E 2:15

VISTA A  
ALZADO FRONTAL  
ESCALA 2 : 15

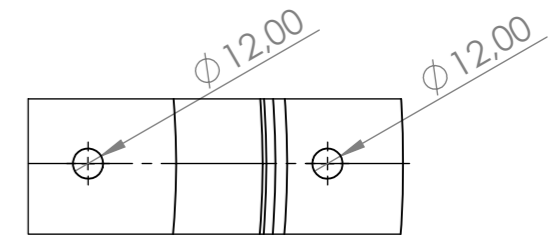


VISTA B  
ALÇAT POSTERIOR  
ESCALA 2 : 15

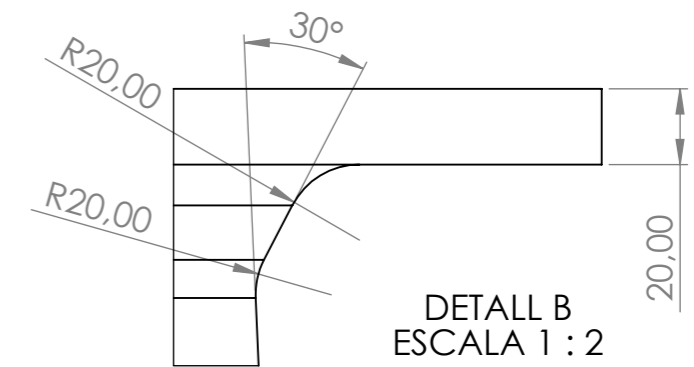


ESCALA 1 : 15

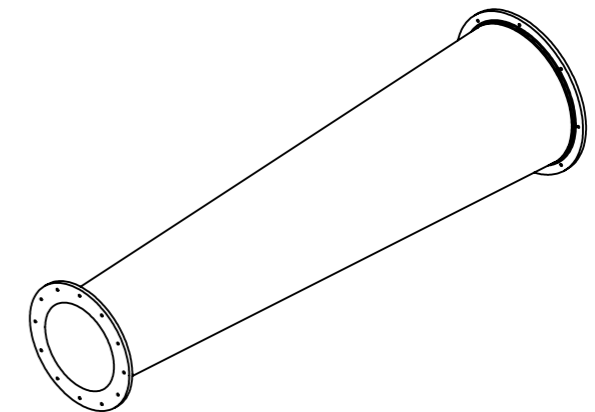
Vista B




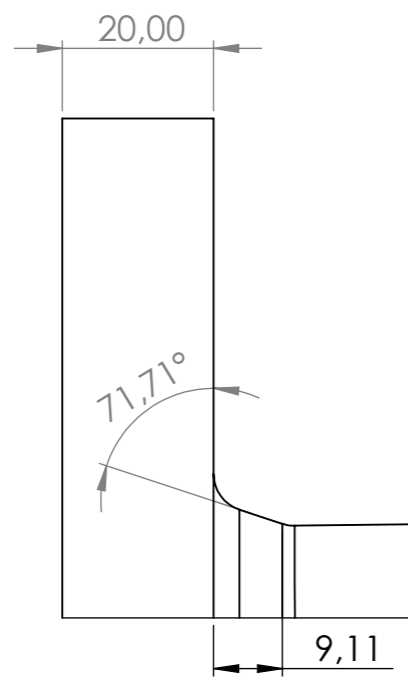
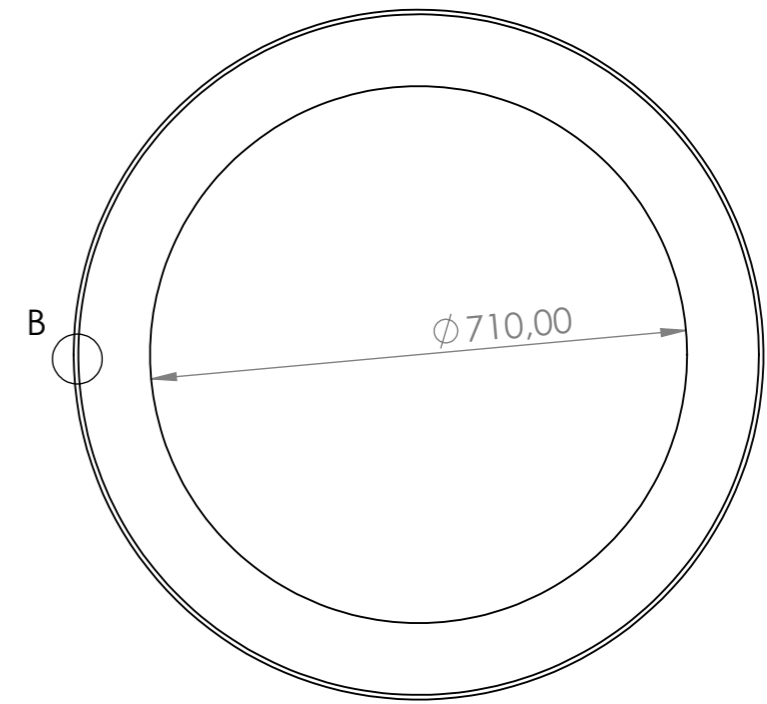
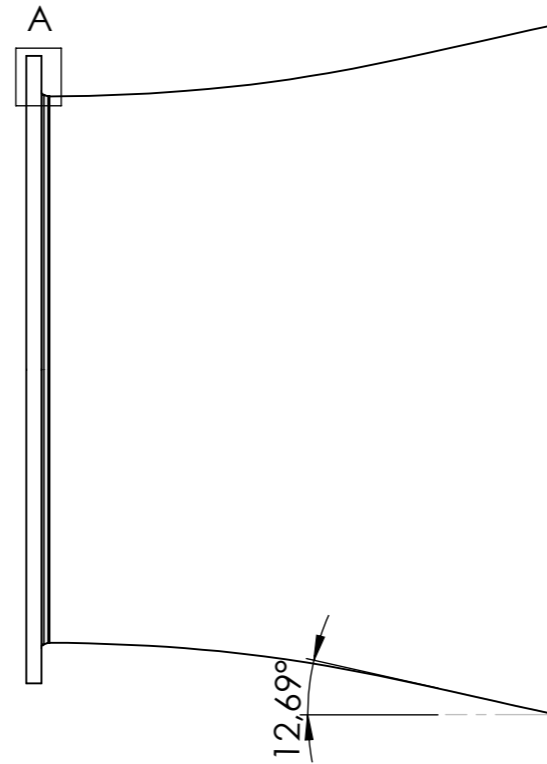
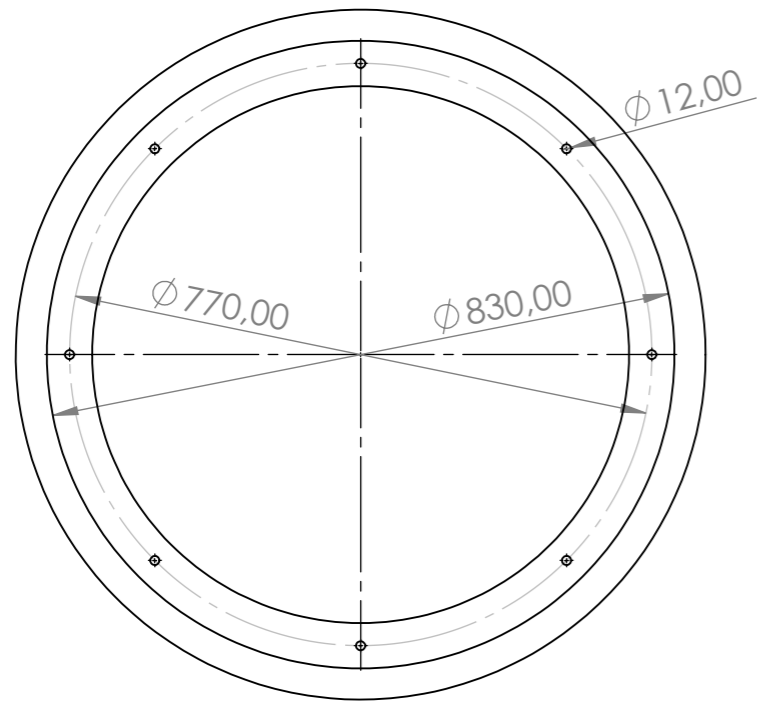
DETALL A  
ESCALA 1 : 3



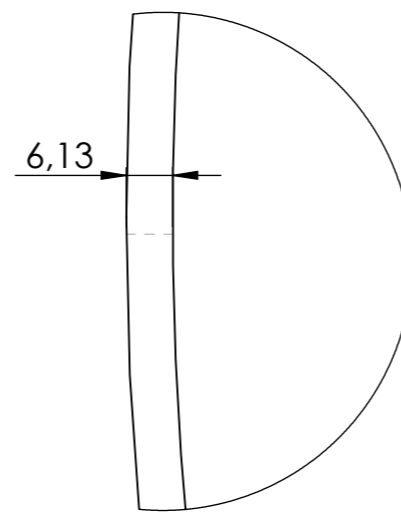
DETALL B  
ESCALA 1 : 2



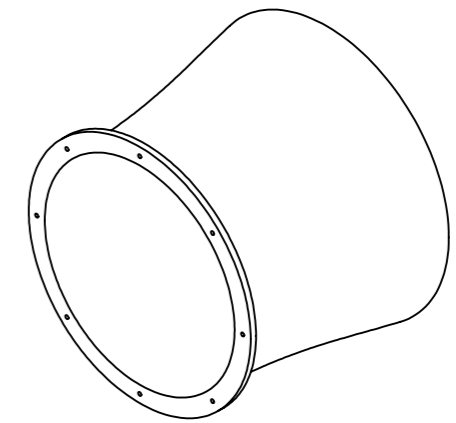
Sistema:	Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MÈDICIONS AERODINÀMIQUES	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Nom: Difusor	
Material: PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	A3
Totes les cotes en mm menys les indicades		Plànol 8
		E 2:15



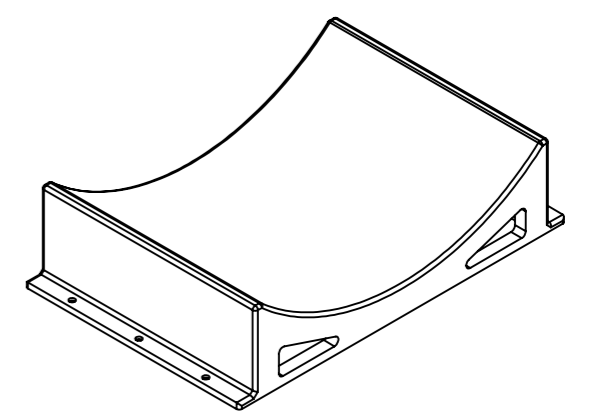
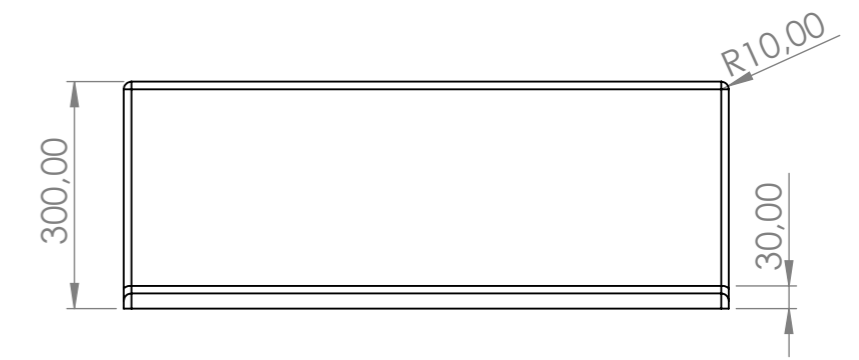
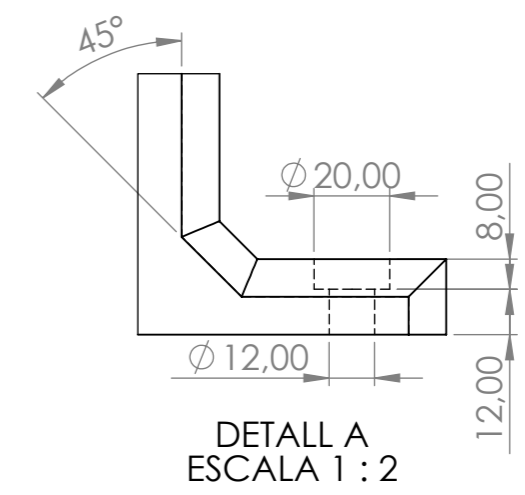
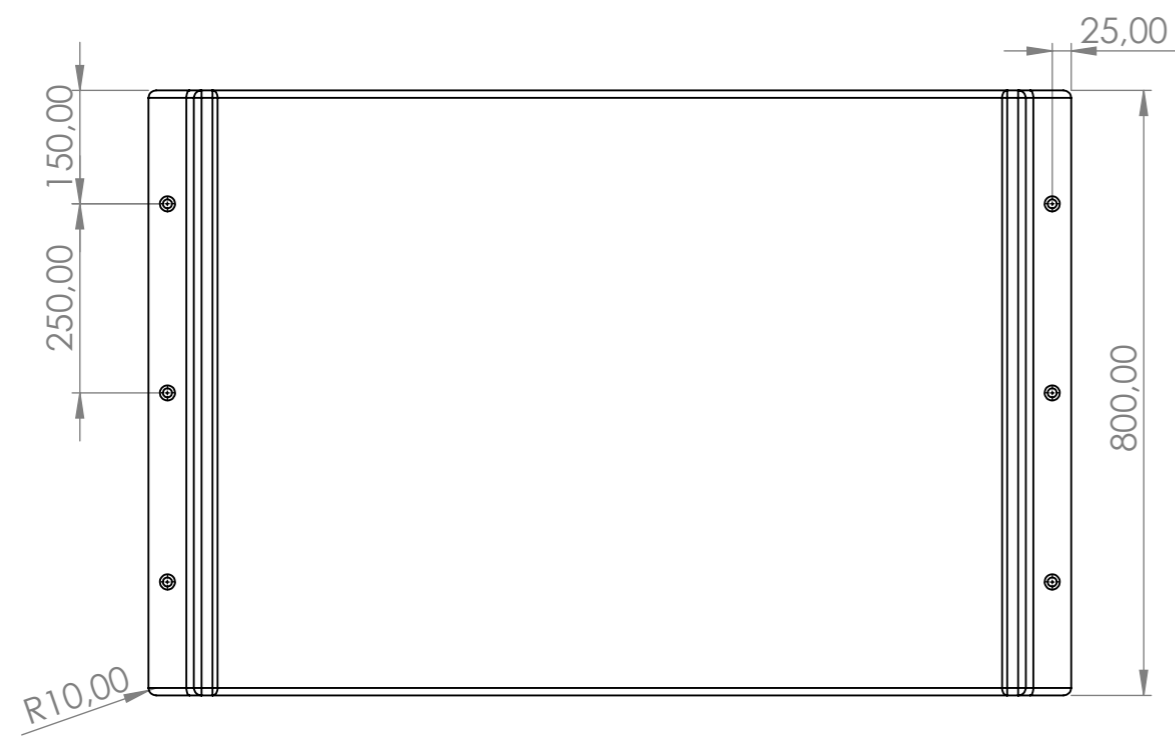
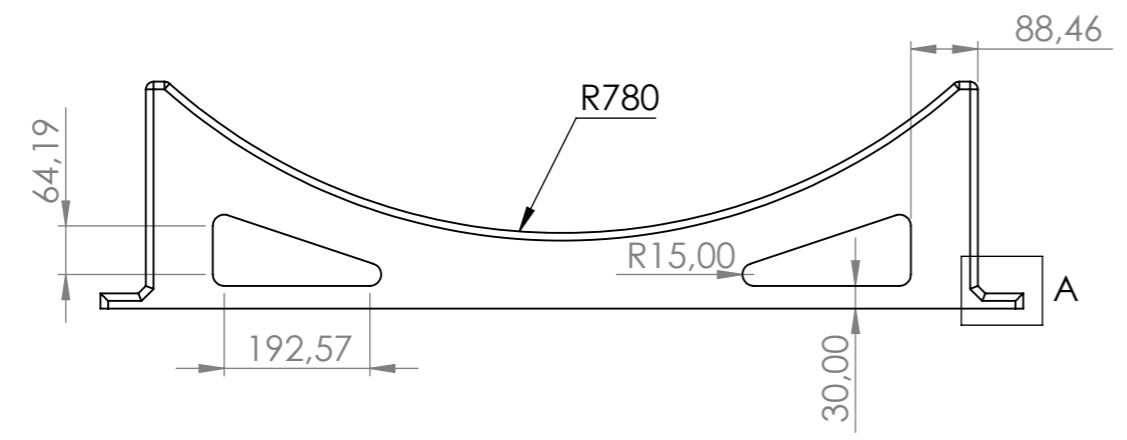
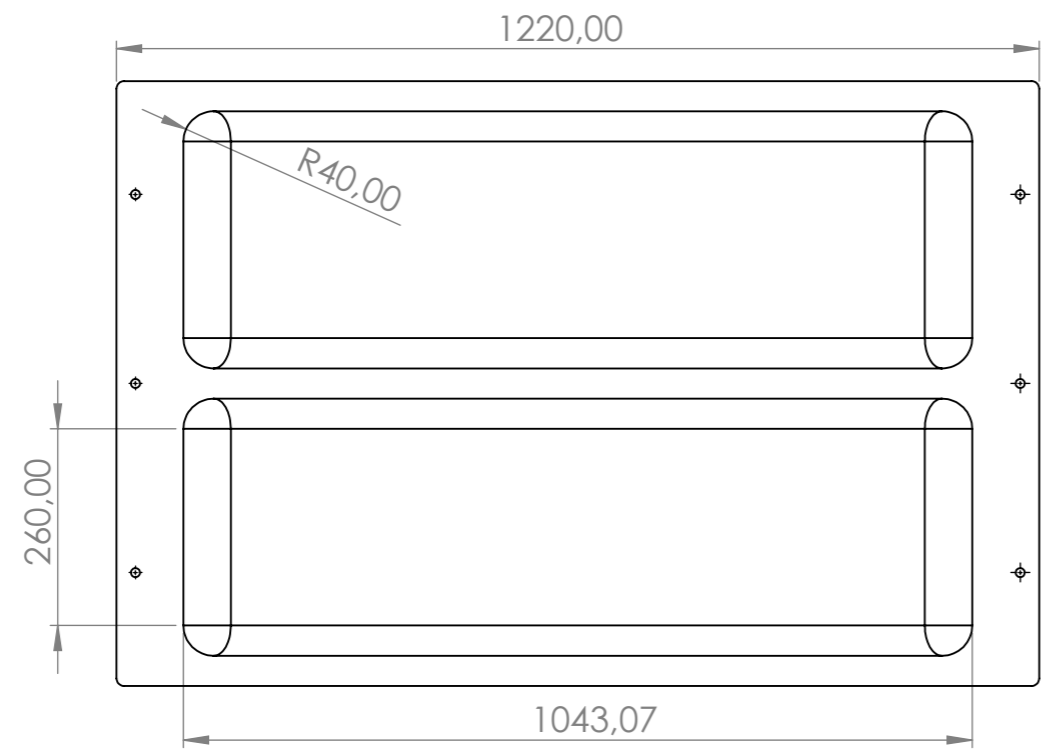
DETALL A  
ESCALA 1 : 1



DETALL B  
ESCALA 1 : 1



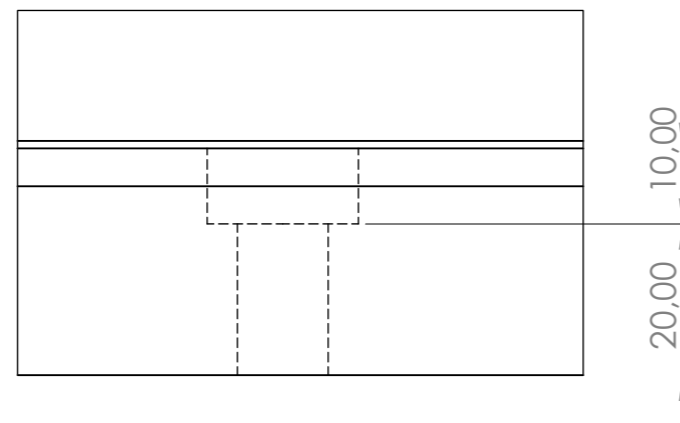
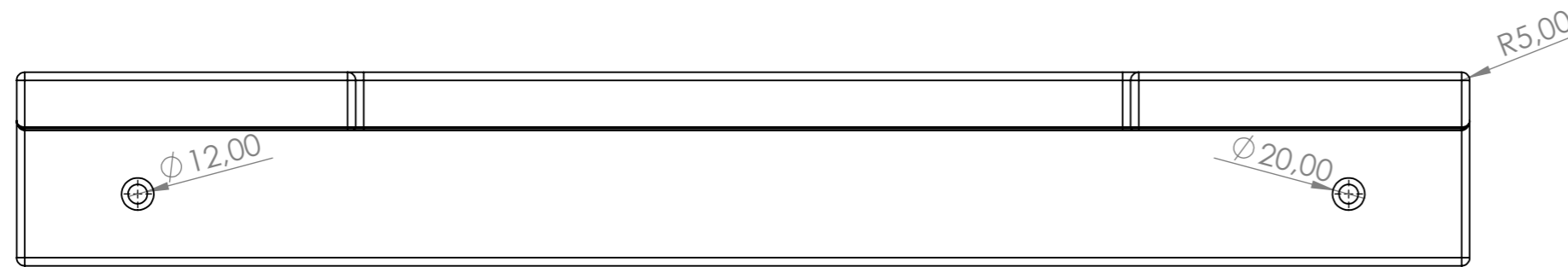
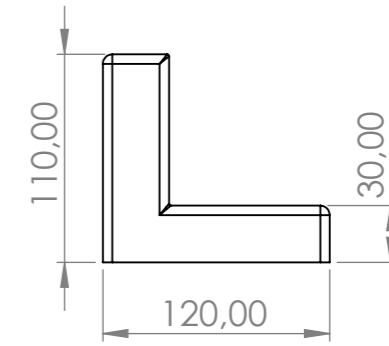
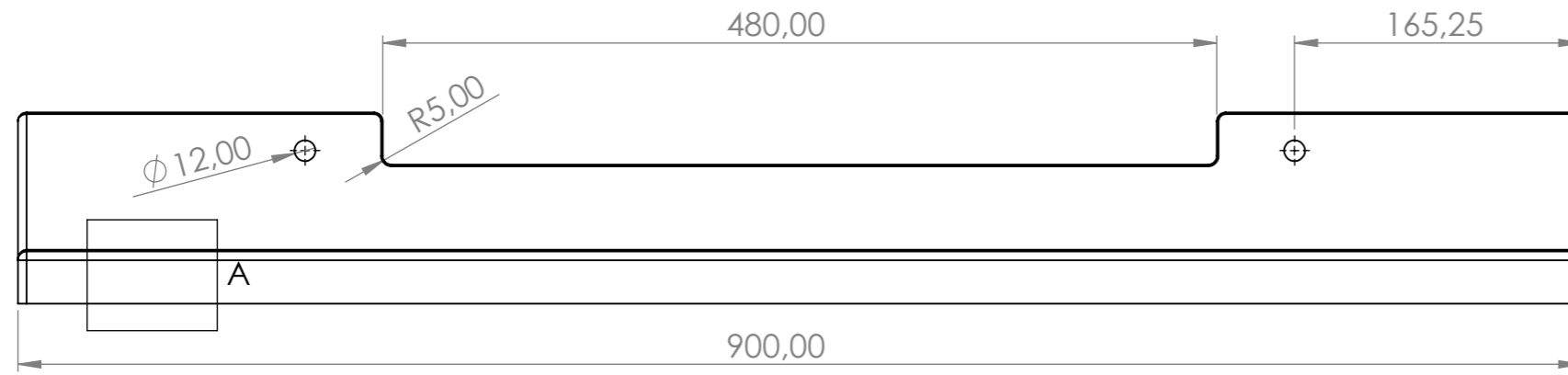
Sistema:		Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b> CAMPUS D'ALCOI		Treball TFG: DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES	
Material: PS - 30% Fibra de Vidre		Nom: Trompeta	
Totes les cotes en mm menys les indicades		Núm. de dibuix: Plànol 9	A3
			E 1:10



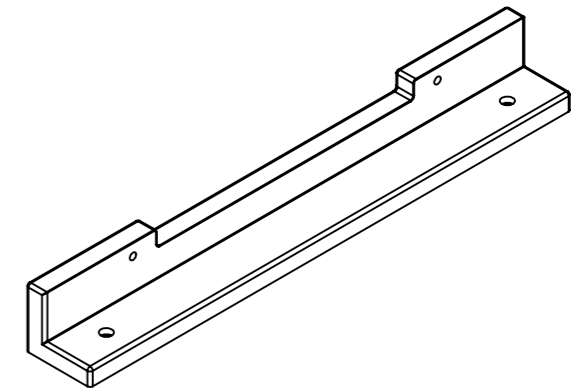
Sistema:	Autor: ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data: 30/7/2021
Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	Nom: Suport A	
Material: PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	A3
Totes les cotes en mm menys les indicades		E 1:10

Plànol 10





DETALL A  
ESCALA 1 : 1



Sistema:		Autor:	ALEJANDRO DE LA CALLE SALAS	Data:	30/7/2021
		Treball TFG:	DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT DE BAIXA VELOCITAT PER A MEDICIONS AERODINÀMIQUES		
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI		Nom:	Suport B/C		
Material:	PS - 30% Fibra de Vidre	Núm. de dibuix:	Plànol 11		A3
Totes les cotes en mm menys les indicades					E 1:4