

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**ACCIÓ DEL VENT SOBRE UNA ESTRUCTURA:  
ANÀLISI TEÒRIC I EXPERIMENTAL**

Departament de Mecànica de Fluids

Tesi presentada per a optar al grau de Doctor en Enginyeria

per: Enric Trillas Gay

Director de tesi: E. Egusquiza Estevez i E. Valencia Lonardo  
*Barcelona, novembre de 1997*

Aquesta tesi ha estat enregistrada  
amb el núm. 247

**Agraïments**

**Prefaci**

**Índex**

**Nomenclatura**

**Llistats de: esquemes, taules i figures**

## AGRAÏMENTS

En tot aquest llarg període de que ha constatat l'elaboració d'aquest treball de doctorat, han estat molts els ajuts i suports rebuts per molta gent. Per aquest motiu voldria expressar el meu sincer agraïment als meus directors, Dr. Eduard Egusquiza Estevez i Dr. Eugeni Valencia Leonardo per la seva ajuda i comentaris en les diferents fases d'aquest estudi, així com, per la seva generosa contribució a la meva formació.

Les gràcies també s'estenen als Drs. Gavaldà i Ferre pel seu ajut i col.laboració en les mesures realitzades en el túnel de vent de Tarragona, que pertany al Departament d'Enginyeria Química i Bioquímica de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona. Al professor Octavio López de Viñaspre del Departament de Mecànica de Fluids, Termodinàmica i Física de l'EUETIB i al propi Departament pel seu ajut en la utilització de l'estació de treball i del programa FIRE en la simulació.

Agraeixo també la guia, suggeriments i ànims rebuts durant el desenvolupament d'aquesta tesi per tots els membres d'aquest Departament, i concretament en Pere Surià i LLadó per la seva inestimable ajuda en la tasca d'efectuar les mesures i per la construcció de les maquetes assajades.

Finalment estenc els meus agraïments, pel suport rebut, a tots aquells que en fet possible el present treball, i demano públicament disculpes a aquells que m'he oblidat de mencionar.

## PREFACI

Aquest treball s'estructura a partir d'una sèrie de reflexions que es contextualitza a partir de la voluntat de sistematitzar l'estudi de l'acció del vent sobre un edifici o una estructura. Després de diferents períodes de temps i de fer un primer anàlisi bibliogràfic, es van centrar les hipòtesis d'aquesta tesi, que de una manera amplia versa sobre la determinació teòrica i experimental en un túnel aerodinàmic tancat, de les accions estàtiques i dinàmiques provocades pel vent sobre estructures esveltes, concretament sobre un edifici prismàtic de base octogonal. La part experimental s'han realitzat en el túnel de vent de cambra d'assaig i vena tancada que posseeix el Departament de Mecànica de Fluids en la seva Secció Departamental de Barcelona (Laboratori d'Aerodinàmica), i la part de simulació en el Departament de Mecànica de Fluids, Termotècnia i Física de la EUETIB.

Sempre he tractat d'establir les millors condicions, per tal de realitzar aquest estudi, dins de les possibilitats de que disposaba. En definitiva, ha estat la meva intenció que aquesta tesi doctoral ajudi a un gran nombre d'estudiosos, en quant a la millora de la sistemàtica d'estudi d'aquest fenomen.

El contingut d'aquest treball està referit a l'índex, mostrat a la següent pàgina

**ÍNDEX**

- i Agraïments
- ii Prefaci
- iii Índex
- iv Nomenclatura
- v Llistats de: esquemes, taules i figures

**Capítol I INTRODUCCIÓ**

**Capítol II ESTUDI TEÒRIC RÈGIM ESTACIONARI**

**Capítol III ESTUDI EXPERIMENTAL RÈGIM ESTACIONARI**

**Capítol IV RESULTATS RÈGIM ESTACIONARI**

**Capítol V ESTUDI TEÒRIC I EXPERIMENTAL RÈGIM NO ESTACIONARI**

**Capítol VI CONCLUSIONS**

**Capítol VII REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES**

**ANNEXOS**

**I INTRODUCCIÓ**

	Pàgina
1.1 ANTECEDENTS	1
1.2 RESSENYES HISTÒRIQUES. ESTAT ACTUAL	4
1.2.1 Aspectes històrics	4
1.2.2 Estat Actual	7
1.2.3 Taules i esquemes	10
1.3 OBJECTIUS	14
1.4 PLA DE TREBALL	17

**II ESTUDI TEÒRIC RÈGIM ESTACIONARI**

2.1 INTRODUCCIÓ	21
2.2 EQUACIONS FONAMENTALS	23
2.3 SIMULACIÓ NUMÈRICA	28
2.3.1 Conceptes bàsics	28
2.3.2 Equacions diferencials a la simulació numèrica	30
2.3.3 Model de turbulència	34
2.3.4 Modelització de l'equació de l'energia per a un flux turbulent	39
2.3.5 Condicions de contorn en les parets	42
2.3.6 Esquema de resolució	43
2.3.7 Descripció de l'esquema de treball del FIRE	44
2.4 FLUX POTENCIAL	52
2.4.1 Conceptes bàsics	52
2.4.2 Equacions	52
2.4.3 Teoria potencial amb discontinuïtats	56

**III ESTUDI EXPERIMENTAL RÈGIM ESTACIONARI**

	Pàgina
3.1 INTRODUCCIÓ	59
3.2 ANÀLISI DIMENSIONAL I SEMBLANÇA	60
3.3 ASSAIG EN TÚNELS DE VENT	62
3.3.1 Nombres adimensionals que intervenen en aquest fenomen	62
3.3.2 Impossibilitat de poder mantenir la igualtat de tots els nombres adimensionals	67
3.3.3 Escales més adequades d'utilització en proves en túnels de vent	70
3.4 DESCRIPCIÓ DEL BANC D'ASSAIG	72
3.4.1 Túnel de vent	72
3.4.2 Maquetes	75
3.5 DESCRIPCIÓ DELS ELEMENTS EXPERIMENTALS DE MESURA	82
3.5.1 Mesura de la velocitat	82
3.5.2 Mesura de la pressió	87
3.6 CALIBRATGES	89

**IV RESULTATS RÈGIM ESTACIONARI**

4.1 INTRODUCCIÓ	91
4.2 HIPÒTESIS DE PARTIDA I REGLES A TENIR EN COMPTE	92
4.3 RESULTATS MODEL MATEMÀTIC	94
4.3.1 Classificació del flux	95
4.3.2 Geometria del model matemàtic	96
4.3.3 Malla computacional	99
4.3.4 Condicions de contorn	106
4.3.5 Paràmetres computacionals	109
4.3.6 Increment de temps durant la simulació	120



---

	Pàgina
4.3.7 Procés de simulació numèrica	121
4.3.8 Resultats obtinguts	124
4.4 RESULTATS EXPERIMENTALS	150
4.4.1 Condicions de l'assaig	150
4.4.2 Mesures experimentals de pressió	151
4.4.3 Mesures experimentals de velocitat	160
4.5 ANÀLISIS DELS RESULTATS ENTRE EL MODEL MATEMÀTIC I L'EXPERIMENTAL	166
4.5.1 Velocitats	166
4.5.2 Pressions. Coeficients de pressió	170
 <b>V ESTUDI TEÒRIC I EXPERIMENTAL RÈGIM NO ESTACIONARI</b>	
5.1 INTRODUCCIÓ	177
5.2 TIPUS DE VIBRACIONS FLUIDODINÀMIQUES	178
5.2.1 Mecanismes d'excitació	180
5.2.2 Resposta Estructural	181
5.3 METODOLOGIA D'ESTUDI	182
5.3.1 Mètodes teòrics	182
5.3.2 Mètodes experimentals	183
5.4 MÈTODES TEÒRICS ESTADÍSTICS	185
5.5 MÈTODES EXPERIMENTALS	195
5.5.1 Instrumentació utilitzada	196
5.5.2 Proves realitzades	201

**VI CONCLUSIONS**

Pàgina  
227

**VII REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES**

231

**ANNEXOS**

Pàgina Annex

ANNEX 1:	Caracterització del flux d'aire en la cambra d'assaig	A.1
ANNEX 2:	Determinació del rang de velocitats que millor s'adapten al túnel de vent i a les maquetes utilitzades	A.19
ANNEX 3:	Calibratge de les sondes	A.31
ANNEX 4:	Resultats experimentals de les pressions i de les velocitats	A.37
ANNEX 5:	Diferents metodologies per a l'estudi d'un edifici real	A.51

## NOMENCLATURA

### A:

- ATC Anemòmetre de temperatura constant
- ACC Anemòmetre de corrent constant
- A Àrea
- $A_z$  Constant dependent de l'alçada z
- ASM Algebraic Stress Model

### B:

- $B_z$  Constant depenen de l'alçada z
- $B_r$  Factor de resposta

### C:

- $c_p$  Calor específic a pressió constant
- $c, C$  Velocitat
- $C_c$  Contracció
- $C_\infty$  Velocitat de la corrent lliure
- $C_r$  Component radial de la velocitat
- $C_\theta$  Component tangencial de la velocitat
- $C_D$  Coeficient de resistència a l'avanç per a una llargada finita
- $C_{D\infty}$  Coeficient de resistència a l'avanç per a una llargada infinita
- $C_L$  Coeficient de sustentació
- $c$  Component mitjana de la velocitat
- $c'$  Component de fluctuació de la velocitat
- $C_H$  Coeficient funció de l'alçada
- $C_{hcr}$  Velocitat crítica
- C.C.A. Constant-Current Anemometry
- C.T.A. Constant-Temperature Anemometry
- $C_c$  Coeficient de força lateral
- $C_*$  Velocitat de fricció
- CFD Computational Fluid Dynamics
- CC Condicions de Contorn
- $C_{cl}$  Coeficient Capa límit

### D:

- D Diàmetre d'un edifici
- d Diàmetre tubs

**E:**

- E Voltatge
- $E_u$  Nombre adimensional d'Euler

**F:**

- F Prisma regular de base octogonal en posició frontal enfront del vent
- F Força
- f Freqüència de vibració (de separació)
- $f_c$  Paràmetre de l'acceleració de Coriolis
- $f_s$  Freqüència de formació de vòrtex
- $f_0$  Freqüència natural
- Fr Nombre adimensional de Froude
- $F_T$  Funció transformada
- $F_v$  Distribució de Gumbel

**G:**

- g Acceleració de la gravetat
- $g_q$  Factor de pic (estadístic)
- Gt Velocitat de generació
- $g_u'$  Factor de pic
- $G^*$  Factor de càrrega màxima

**H:**

- H, h Alçada d'un edifici
- H.W.A. Hot-Wire Anemometry
- H.F.A. Hot-Film Anemometry
- HA Alçada dels tubs piezomètrics

**I:**

- i Intensitat de la turbulència

**K:**

- $K_{com}$  Coeficient de compressibilitat
- K Constant de Helmutz i Kirschhoff
- $K_c$  Coeficient d'esveltesa
- $K_p$  Coeficient de pressió
- $K_c$  Coeficient eòlic
- k Energia cinètica turbulenta

**L:**

- L Longitud
- L.D.A. Laser-Doppler Anemometry
- LES Large Eddy Simulation
- $l_t$  Escala de longitud turbulenta

**M:**

- M Massa
- M Nombre adimensional de Mach
- m Intensitat d'un emergent o d'un submergent
- mA Massa per unitat d'area

**O:**

- $O_s$  Obturació en superfície
- $O_v$  Obturació en volum

**P:**

- p Sobrecàrrega unitària
- $P_r$  Nombre adimensional de Prandtl
- P Pressió

**Q:**

- $Q_c$  Escalfor
- q Pressió dinàmica
- $\bar{q}$  Component mitjana de la pressió dinàmica
- $q'$  Component de fluctuació de la pressió dinàmica
- Q Càrrega
- $q_{hcr}$  Pressió crítica
- $\mathbf{q}$  Flux vectorial de calor

**R:**

- R Prisma regular de base octogonal en posició radial enfront del vent
- R Constant dels gasos
- $R_e$  Nombre adimensional de Reynolds
- $R_o$  Nombre adimensional de Rossby
- $R_w$  Resistència de funcionament del fil calent
- $R_q$  Resistència del sensor
- r Radi

- R.M.S. Root Mean Square
- $R_r$  Resposta de ressonància
- RSM Reynolds Stress Model
- $R_u$  Funció d'autocorrelació
- $R_{ug}$  Funció d'autocorrelació del desplaçament
- RNG Renormalization Group Model

**S:**

- S Superfície
- $S_{q^{i'q'j}}$  Funció de l'espectre creuat
- $S_v$  Funció de densitat espectral de potència
- $S_v$  Espectre de potència
- $S_t$  Nombre adimensional de Strouhal
- $S_u$  Superfície útil
- $S_\phi$  Font

**T:**

- T Temps; període
- $T_{q^{i'q'j}}$  Funció de correlació creuada

**U:**

- U Humitat
- $U(h)$  Velocitat del vent per a una alçada h
- $U_*$  Velocitat de fricció
- $U_e$  Velocitat efectiva de refredament
- $u_g$  Desplaçament

**V:**

- $V_u$  Volum útil
- $V_\tau$  Velocitat de fricció

**Y:**

- $y^+$  Distància normal a la paret adimensionalitzada

**Z:**

- z Cota
- $z_0$  Rugositat de referència

**LLETRES GREGAS**

- $\alpha$	Exponent funció del terreny
- $\alpha_o$	Exponent funció del terreny de referència
- $\beta$	Coefficient d'obstrucció
- $\pi$	Paràmetres de Buckingham
- $\sigma$	Tensió superficial
- $\sigma_q$	Càrrega (R.M.S.)
- $\sigma_k$	Nombre de turbulència de Prandtl
- $\rho$	Massa específica
- $\mu$	Viscositat dinàmica o absoluta
- $\mu_t$	Viscositat turbulenta
- $\mu_{eff}$	Viscositat efectiva
- $\nu$	Viscositat cinemàtica
- $\gamma$	Pes específic
- $\tau_u$	Esforç tallant
- $\tau$	Tensió
- $\Phi$	Funció potencial
- $\Psi$	Funció de corrent
- $\Theta$	Angle
- $\Theta_t$	Temperatura
- $\Phi$	Funció dissipació
- $\lambda$	Conductivitat tèrmica
- $\lambda_e$	Esveltesa d'un edifici
- $\delta$	Gruix de la capa límit
- $\Gamma$	Coefficient funció de l'alçada
- $\Gamma_\phi$	Coefficient d'intercanvi turbulent
- $k-\epsilon$	Model de turbulència
- $\Omega$	Freqüència màxima
- $\zeta$	Tant per u d'amortiguament

---

**LLISTAT D'ESQUEMES**

	Pàgina
1.1 Criteris de disseny	2
1.2 Objectius	16
1.3 Pla de treball	19
2.1 Procés a seguir	31
2.2 Blocs de treball del programa FIRE	46
3.1 Criteris de semblança	60
4.1 Geometria del model matemàtic	97
5.1 Tipus de vibracions fluidodinàmiques	179
5.2 Procediments a utilitzar	182
5.3 Metodologia experimental	201

**LLISTAT DE TAULES**

1.1 Ressenyes històriques	11
1.2 Ressenyes històriques	12
1.3 Ressenyes històriques	13
2.1 Coeficients del model k- $\epsilon$	39
2.2 Equacions i Coeficients del model k- $\epsilon$	41
2.3 Equacions per a un flux potencial bidimensional	53
2.4 Equacions per a un flux potencial axisimètric	55
3.1 Límits d'escala de longituds i velocitats de diferents autors	71
3.2 Dimensions de les maquetes per a diferents escales	76
3.3 Dimensions reals i de les maquetes per a l'escala escollida	76
3.4 Factors d'obstrucció i de contracció	78
3.5 Característiques de les sondes utilitzades	87
4.1 Condicions de contorn a l'entrada	109
5.1 Sensor tipus acceleròmetre	199
5.2 Martell d'impactes	199
5.3 Amplificació i atenuació de cinta	209
5.4 Identificació de les freqüències	210
5.5 Amplificació i atenuació de cinta	212



	Pàgina
5.6 Identificació de les freqüències	213
A1.1 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A2
A1.2 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A3
A1.3 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A4
A1.4 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A5
A1.5 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A6
A1.6 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A7
A1.7 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A8
A1.8 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A9
A1.9 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A10
A1.10 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A11
A1.11 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A12
A1.12 Velocitats mesurades amb una sonda de Prandtl	A13
A1.13 Gruix de la capa límit en la cambra d'assaig del túnel de vent	A14
A1.14 Valors de $C_{CL}$	A15
A1.15 Nivells de turbulència	A16
A2.1 Valors de les magnituds utilitzada per a l'experimentació, per a cadascuna de les velocitats (A,B,C,D,E,F,G)	A19
A2.2 Resultats de les pressions teòriques sobre un cilindre, en $Kp/m^2$ per a diferents rangs de velocitat en m/s, en funció de $\theta$	A23
A2.3 Resultats teòrics de les velocitats en m/s, obtinguts en funció de l'angle $\theta$ i per a diferents velocitats	A24
A2.4 Resultats obtinguts experimentalment, de les pressions en mm.c.a	A25
A2.5 Velocitats en m/s, en funció de l'angle $\theta$ , i obtinguts dels resultats experimentals	A26
A2.6 Comparació dels valors del coeficient K teòrics amb els experimentals, en funció de l'angle $\theta$	A27
A2.7 Comparació dels valors dels coeficients de correlació de Pearson i de Spearman entre els valors teòrics i els experimentals, per a diferents combinacions de velocitats	A28
A2.8 Coeficients de correlació de Pearson i de Spearman per als valors del coeficient K, per a angles entre 0 i 90°	A29
A2.9 Velocitats i nombres de Reynolds	A29
A3.1 Coeficients d'ajustatge per a cadascun dels calibratges	A33
A4.1 Valors de les pressions	A37
A4.2 Coeficients de pressió en les cares de la maqueta octogonal	A38
A4.3 Mesures experimentals de la velocitat per a diferents posicions	A39-A49

## LLISTAT DE FIGURES

	Pàgina
2.1 Flux al voltant d'un cilindre	54
3.1 Esquema de la cambra d'assaig del túnel	74
3.2 Secció transversal de la cambra d'assaig del túnel amb la maqueta al seu interior	77
3.3 Esquema de les sondes de pressió	79
3.4 Posició de les preses de pressió	80
3.5 Maqueta flexible	81
3.6 Esquema d'un sistema anemomètric de corrent constant	85
3.7 Esquema d'un sistema anemomètric de temperatura constant	85
4.1 Posicions de l'octògon	91
4.2 Geometria del model matemàtic en la posició radial	98
4.3 Procés de creació de la malla computacional	102
4.4 Evolució del mallat al llarg de l'estudi	103
4.5 Malla computacional per a la posició radial	104
4.6 Malla computacional per a la posició frontal	105
4.7 Condicions de contorn	108
4.8 a Paràmetres computacionals en el cas radial	114
4.8 b Paràmetres computacionals en el cas radial	115
4.8 c Paràmetres computacionals en el cas radial	116
4.9 a Paràmetres computacionals en el cas frontal	117
4.9 b Paràmetres computacionals en el cas frontal	118
4.9 c Paràmetres computacionals en el cas frontal	119
4.10 a Evolució de la velocitat durant la simulació	122
4.10 b Evolució de la pressió durant la simulació	123
4.11 a Velocitats en el pla x-y. Posició radial	128
4.11 b Velocitats en el pla x-y. Posició radial	129
4.11 c Pressions en el pla x-y. Posició radial	130
4.11 d Pressions en el pla x-y. Posició radial	131
4.12 Velocitats i pressions en el pla x-z. Posició radial	132
4.13 a Velocitats en el pla y-z. Posició radial	133
4.13 b Velocitats en el pla y-z. Posició radial	134
4.14 a Trajectòries de les partícules de fluid. Posició radial	135
4.14 b Projeccions de la figura 4.14 a	136
4.14 c Trajectòries de les partícules de fluid. Posició radial	137
4.14 d Projeccions de la figura 4.14 c	138
4.15 a Velocitats en el pla x-y. Posició frontal	139
4.15 b Velocitats en el pla x-y. Posició frontal	140
4.15 c Pressions en el pla x-y. Posició frontal	141
4.15 d Pressions en el pla x-y. Posició frontal	142
4.16 Velocitats i pressions en el pla x-y. Posició frontal	143
4.17 a Velocitats en el pla x-y. Posició frontal	144

	Pàgina
4.17 b Pressions en el pla y-z. Posició frontal	145
4.18 a Trajectòries de les partícules de fluid. Posició frontal	146
4.18 b Projeccions de la figura 4.18 a	147
4.18 c Trajectòries de les partícules de fluid. Posició frontal	148
4.18 d Projeccions de la figura 4.18 c	149
4.19 Posició relativa entre la direcció del vent i la cara de la maqueta equipada amb les presses de pressió	152
4.20 Coeficient de pressió a diferents altures	158
4.21 Coeficient de pressió en funció de l'angle	159
4.22 Coordenades de referència	161
4.23 Posició de les sèries de mesures de la velocitat	162
4.24 Mesures experimentals de la velocitat	164-165
4.25 Mesures experimentals de la velocitat enfront les velocitats del model matemàtic	168-169
4.26 Coeficients de pressió experimentals enfront el model matemàtic	171-175
5.1 Martell d'impactes	198
5.2 Posició radial versus frontal	203
5.3 Espectres instantanis de la sonda de pel·lícula calent	204-207
5.4 Situació de les sondes de pel·lícula calent	208
5.5 Espectre fluctuació del vent	211
5.6 Espectre fluctuació del vent darrera de la maqueta	214
5.7 Espectre dels impactes del martell sobre l'estructura	216
5.8 Cascada dels espectres de la sonda d'intensimetria	218
5.9 Cascada dels espectres de la resposta de l'estructura	219
5.10 Cascada dels espectres de la resposta de l'estructura més fina	220
5.11 Coherència entre el senyal de la sonda i la vibració	221
5.12 Espectre per a l'estudi de les inestabilitats, amb l'acceleròmetre col·locat a 90°. Sonda de pel·lícula calent davant	223
5.13 Espectre per a l'estudi de les inestabilitats, amb l'acceleròmetre col·locat a 180°. Sonda de pel·lícula calent davant	224
5.14 Espectre per a l'estudi de les inestabilitats, amb l'acceleròmetre col·locat a 90°. Sonda de pel·lícula calent darrera	225
5.15 Espectre per a l'estudi de les inestabilitats, amb l'acceleròmetre col·locat a 180°. Sonda de pel·lícula calent darrera	226
A1.1 Posició de les presses de dades	A14
A1.2 Perfil de velocitats en la capa límit del túnel de vent	A16
A1.3 Perfil de velocitats en la capa límit del túnel de vent	A17
A3.1 Esquema del dispositiu per al calibratge de sondes	A32
A3.2 Calibració de la sonda de pel·lícula calent	A34-A36
A5.1 Espectres	A54

CAPÍTOL I

# **INTRODUCCIÓ**

## **I INTRODUCCIÓ:**

### **1.1 ANTECEDENTS:**

**A**quest treball de doctorat té interès dins dels camps del disseny i del càlcul d'edificis i d'estructures, a l'estudiar l'acció del vent sobre una estructura determinada. Donat el notable desenvolupament tecnològic que l'enginyeria ha experimentat en els darrers anys, amb materials més resistents i en nous mètodes de resolució, aquestes poden dissenyar-se i construir-se amb formes cada vegada més complexes (més esveltes i més imaginatives). Abans, donada la gran rigidesa de les estructures i dels edificis, i dels elevats coeficients de seguretat utilitzats, aquesta acció turbulenta del vent gairebé no es tenia en compte.

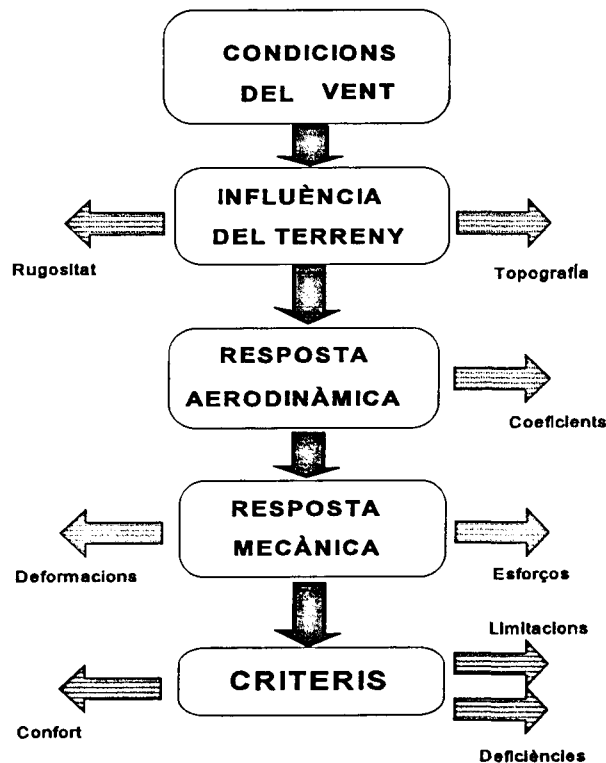
La transcendència de la turbulència del vent recau en dos fets importants, en primer lloc en les forces que aquesta pot provocar sobre diferents obstacles (edificis i estructures), i en segon lloc en que contribueix a dissipar part de l'energia associada al moviment dels fluids, mitjançant la fricció. Es fa necessari controlar aquesta turbulència per potenciar-la o inhibir-la en funció dels seus efectes, la qual cosa és possible gràcies a l'experimentació i a la simulació numèrica. Ara bé, donat el caràcter altament fluctuant i ràpidament canviant de les pressions i de les velocitats amb el temps, fan que en conjunt les tècniques utilitzades presentin una certa complexitat. És per tant una tasca molt important per a un enginyer minimitzar els riscos involucrats i assegurar que les estructures subjectes a l'acció del vent estiguin dissenyades per a garantir la seva seguretat estructural i la seva serviciabilitat.

Aquestes accions, que en ocasions poden ésser de vital importància i en altres només relatives a les molèsties que poden produir disconfort els seus ocupants o els vianants, han d'ésser sempre preses en consideració, ja que poden arribar a produir diferents fenòmens:

- 1)- Forces excessives o inestabilitats en l'estructura o en els elements estructurals.
- 2)- Excessiva deflexió o distorsió de l'estructura o dels seus elements estructurals.
- 3)- La repetició de les forces dinàmiques provoca fatiga dels elements estructurals.
- 4)- La inestabilitat aeroelàstica, en la que el moviment de l'estructura motivada pel vent produeixen forces aerodinàmiques que augmenten aquest moviment.
- 5)- Moviments dinàmics excessius, provoquen disconfort els ocupants o els vianants.

Per a aconseguir aquesta fita de garantir en les estructures modernes una edificació segura, el dissenyador necessita tenir tota la informació necessària de les condicions del vent, dels esforços induïts sobre l'estructura i del comportament d'aquesta. L'esquema N° 1.1 ens mostra la informació mínima necessària.

**ESQUEMA N° 1.1: Criteris de disseny**



Conèixer les condicions naturals del vent i del terreny són importants ja que afecten directament a l'estructura. També saber quin és el desenvolupament de la capa límit, pel procés de creació, separació i posterior despreniment de remolins.

A vegades és necessari realitzar un anàlisi aeroelàstic per a estudiar la interacció entre les forces aerodinàmiques, les inercials i les elàstiques, per tal d'esbrinar l'estabilitat aerodinàmica de l'estructura, així com obtenir els criteris de disseny necessaris i les avaluacions de protecció oportunes. Tot això ens ajudarà a respondre algunes de les preguntes que poden sorgir a l'hora de dissenyar alguns d'aquests edificis.

## **1.2 RESSENYES HISTÒRIQUES. ESTAT ACTUAL:**

Quan un investigador es planteja abordar un problema complexa, el primer que fa es intentar recopilar la màxima informació d'altres investigadors que han estudiat problemes similars. Una vegada realitzada aquesta tasca, és possible intuir de manera qualitativa quin pot ésser el comportament del fenomen físic que s'analitza. Per tant, en aquest apartat es veurà com han evolucionat els estudis dels fluxs externs al voltant d'obstacles i quin és l'estat actual de les investigacions que es porten a terme.

### **1.2.1 Aspectes històrics.-**

Les primeres investigacions sobre models es van realitzar aprofitant corrents d'aire naturals o el moviment de sòlids en aire pràcticament en repòs, però les condicions de l'aire són turbulentes, no permanents i es veuen modificades per l'efecte de contacte o proximitat amb el terra. És per tot això que s'utilitzen aparells en els que el règim del corrent es provoca artificialment en un recinte que permet regular i conèixer les característiques de la vena fluida, aquests elements d'assaig són els nomenats túnels de vent aerodinàmics.

**1) Estudis i primers equipaments.-** Després dels primers pioners com: Newton, Mariotte, Borda, Robins, D'Alembert, Concordat, Bossut o Lilienthal, que van realitzar nombroses observacions per a determinar la resistència que oferia un cos submergit dins d'un fluid. Es van començar a realitzar estudis de túnels de vent i a construir-los entre 1871 i 1891, per investigadors com: Wenham, Phillips, Joukowski.

Després d'aquestes primers es van construir d'altres per Stanton i Maxim, Rateau i Eiffel, Prandtl, Crocco, Joukowski i Riabouchinski, i molts altres. Concretament Eiffel va estudiar la deflexió de la part més alta de la torre que porta el seu nom, provocada pels efectes del vent. També va estudiar diferents models d'estructures provades en túnels de vent.



Dins del camp de l'enginyeria estructural, Baker en 1884 estudià el desastre del pont de l'estuari del Tay ocorreguda l'any 1879, i trobà que les ràfegues de vent podien afectar el valor de la pressió màxima. Irminger va fer les primeres proves en un túnel de vent amb models de cases l'any 1891. *(Tot el que s'ha explicat, queda reflectit a la Taula N° 1.1 del final d'aquest apartat).*

**2) Equipaments en l'era de l'aviació.-** Durant un llarg període de temps, des d'aproximadament 1890 fins 1930, la potència desenvolupada en els túnels era relativament petita, aquest fet provocava una certa limitació, tot i això la construcció de túnels de vent va conèixer un gran desenvolupament.

Després de l'any 1940, una vegada superada aquesta limitació, es van construir grans túnels de vent, com el de Moscou, o el de Moffett Fields (U.S.A). També calen destacar els túnels de vent de Chalais-Meudon i el de Modane en França, així com els considerats gegants, com el de la NASA a Ames Research Centre.

Durant aquest període, també es van realitzar nombrosos estudis de maquetes d'edificis en túnels, en particular els estudis realitzats per Irminger i Nokkentved l'any 1936. Així com l'estudi de gratacels mitjançant proves en túnel de vent, com en el cas de l'Empire State Building. *(Tot això pot apreciar-se a la Taula N° 1.2).*

**3) L'era dels túnels de vent per a estudiar la capa límit.-** Bailey i Vincent van fer en 1943 una sèrie de proves d'un edifici a escala en un túnel de vent amb una cambra d'assaig extremadament llarga, probablement aquest va ésser el primer per a l'estudi de la capa límit.

L'any 1948, Jensen va suggerir que la simulació del vent es fes mitjançant la utilització d'una capa límit turbulent, també va comparar la pressió mitjana en petits edificis a escala real i en models experimentals en túnels de vent. Amb posterioritat l'any 1952 Klebanoff i Diehl van crear una capa límit turbulent, per tal de simular la turbulència existent a les capes baixes de

l'atmosfera. Per aquesta mateixa època, Cermak va provar en un túnel de vent la simulació de l'evaporació d'un llac.

En 1957, Owen i Zienkiewicz, van aconseguir un èxit important en poder reproduir un flux d'aire dins de la capa límit turbulent. No obstant no va ésser fins 1963, any en el que es va celebrar la primera conferència internacional sobre "Els efectes del vent en edificis i estructures", que va tenir lloc a Teddington (G.B.), on es van obtenir les primeres conclusions sobre els estudis realitzats fins aleshores.

Finalment fer referència a les síntesis portades a cap per Counihan sobre la semblança de la capa límit turbulent. A Cermak pels seus estudis sobre la capa límit tèrmica i a Snyder per la simulació dels fenòmens atmosfèrics.

**4) Últimes construccions.-** El gran túnel de vent europeu DNW construït a Emmerloord (Holanda). El nou túnel de vent construït a London (Canadà) per en Davenport. IENER ha construït un túnel de vent, per tal d'estudiar la capa límit, format per dos canals. També IENER ha creat una instal·lació per a fluxs d'aire estratificat per a diferents rangs de velocitats i de temperatures. Robins en el CEGB ha finalitzat la construcció d'un canal amb control automàtic de l'estratificació, que és molt similar el construït al laboratori de Los Álamos (U.S.A).

**5) Aspectes recents.-** Els aspectes fonamentals dels efectes del vent en edificis i estructures en túnels de vent, han estat estudiats principalment pel professor A.G.Davenport, pioner en l'establiment dels mètodes teòrics del càlcul de les estructures sotmesos a l'acció del vent, mentre que els esforços que actuen sobre aquests han estat investigats pel professor B.J.Vickery. També calen destacar els treballs efectuats per: Cermak, Snyder, Counihan, Plate, Gartshore i Schlichting, els quals han aconseguit prendre mesures en la capa límit turbulent, i els seus resultats han servit per a desenvolupar formules que ajuden en el disseny d'una capa límit apropiada per a la simulació.

L'efecte del vent és dinàmic amb totes les implicacions específiques que aquesta variable comporta: impactes, vibracions, entrada en ressonància dels elements sol·licitats, etc. Aquests efectes van ésser estudiats l'any 1967 per en Davenport d'una manera estàtica, amb el mètode que porta per nom "*Mètode Estàtic Equivalent de Davenport*", i va marcar una certa metodologia que ha estat seguida posteriorment per altres investigadors com Simiu, que l'any 1980 va proposar el "*Mètode Simiu*" que és molt més general i simplificatiu. (*Veure Annex 5*).

### **1.2.2 Estat actual.**

Els darrers anys, a més a més de les aportacions que podríem anomenar clàssiques dels investigadors abans mencionats, *la simulació numèrica* ha obtingut un gran impuls, sobre tot des de que es va celebrar el Primer Simpòsium Internacional de l'Enginyeria del vent a Tokyo (1992). Les ponències presentades van servir d'unió per a un futur desenvolupament de l'enginyeria del vent mitjançant mètodes computacionals, ja que han unificat criteris, a part de comentar les diferents experiències que s'estaven portant a terme arreu del món.

Dins de la modelització de la turbulència calen destacar, els estudis sobre diferents models de turbulència nomenats (LES, RSE, ASM, RSM, RNG,...). De tots aquests el que està essent més utilitzat aquests darrers anys és el LES (Large Eddy Simulation), encara que s'utilitza més el nomenat k- $\epsilon$  i el RSM (Reynolds Strees Model). Aquests estudis de comparació entre diferents models els han efectuat W. Rodi a Karlsruhe, P.J. Richards i B.S. Wanigaratne a Auckland.

Hí han molts pocs investigadors que estudiïn simultàniament els resultats obtinguts experimentalment amb els teòrics obtinguts amb la simulació numèrica, el que fan és utilitzar els resultats experimentals d'altres científics, la majoria obtinguts fa temps, per contrastar els seus teòrics. L'excepció a aquesta regla és el professor S. Murakami de la Universitat de

Tokyo , qui utilitza els seus propis resultats experimentals per comparar-los en els obtinguts teòricament amb diferents models de turbulència. No content aquest professor en els models de turbulència ja establerts, està estudiant la resolució numèrica mitjançant elements finits. Aquesta mateixa inquietud la tenen els investigadors T.J.R. Hughes i K. Jansen de la Universitat de Stanford. Així el Sr. Hughes des de l'any 1995 està estudiant els nomenats "High Performance Finite Element Computation".

Els famosos A.G. Davenport a London i T.Stathopoulos a Montreal, que tan han fet pel "Wind Engineering", estan treballant des de 1995 en la generalització i simplificació de les càrregues del vent i les seves possibles implicacions en els mètodes computacionals. També, com sempre, estan treballant en la simulació numèrica en edificis de diferent geometria i el seu assaig en túnels de vent amb escales de longitud de 1/400.

Últimament (1997) a la Universitat de Tokyo hi ha una gran quantitat d'investigadors que estan analitzant la resposta a les vibracions d'edificis alts, utilitzant normalment nombres de Reynolds baixos (100 i 1200), escales de longitud elevades (1/1000 i 1/2000) i estructures simples (cilindres circulars), com : T. Nomura amb cilindres circulars i  $Re = 100$  ò M. Shimura i A. Sekine que fan simulació d'estructures rígides amb  $Re = 1200$  i  $Re = 500$  si l'estructura és flexible. També, cal destacar investigadors importants, com: H. Isukagoshi (Osaka), Y. Tamura, A. Sasaki (Kanagawa) ò H. Kanai.

Gairebé la totalitat d'aquests investigadors utilitzen el mètode de turbulència (LES) amb models de prismes rectangulars o cilíndrics oscil·lants, com: S. Sakamoto, S. Murakami, S. Kato ò A. Mochida. Altres estudien numèricament la inestabilitat aeroelàstica com A. Okasima o K. Kitajima (Ishikawa).

Una gran majoria d'aquests investigadors de CFD estan dedicant-se a la millora de les malles i de les tècniques d'acceleració de la convergència dels resultats numèrics. En aquest aspecte calen destacar els estudis d'en P.Eiseman de la Universitat de Columbia, en la generació

automàtica de malles estructurades o en la generació de malles prismàtiques, com K. Nakahashi de la Universitat de Tokyo, o els treballs efectuats conjuntament per la Universitat de Gales i la de Cambridge en els estudis dels procediments de generació de malles no estructurades amb els següents investigadors: E.J. Probert, O. Hassan, K. Morgan, J. Peraire i N.P. Weatherill.

Una vegada s'aconsegueixin generar malles més efectives, caldrà accelerar el màxim el procés de convergència dels resultats, per exemple mitjançant la computació en paral·lel, aquests procediments que estan estudiant-se ara mateix, calen destacar H. Viviand a Cannes i Ch. L. Merkle de la Universitat estatal de Pennsylvania respectivament, però encara no s'han arribat a obtenir uns resultats excel·lents per a la majoria de situacions. *(La Taula N° 1.3 reflecteix el que s'ha vist en aquests subapartats).*

**6) Temes pendents.**- Els importants i ràpids avanços tecnològics de les últimes dècades han fet que els dissenys d'edificis siguin cada cop més imaginatius i esvelts, aquest fet pot comportar un elevat risc. Semblar però, que tot té solució si s'efectua un estudi mitjançant mètodes computacionals, ara bé, hem d'anar en compte i fugir d'aquesta fal·làcia, doncs la simulació numèrica està utilitzant models simples de turbulència que no poden representar correctament tot el procés de transport provocat per l'acció del vent, a més a més d'utilitzar nombres de Reynolds baixos i geometries senzilles on el deixant és estable (Simulació Parcial).

Són en els casos complexos, quan les dades obtingudes experimentalment són crucials alhora de procedir a realitzar aquesta simulació numèrica, sobre tot en aquelles zones on hi ha recirculació de flux, doncs no es poden computar amb claredat els punts situats a prop de parets, ni els detalls del deixant, si aquest és inestable. Tot això, fa que aquest tipus de realització comporti un cost elevat de computació (millora de les malles utilitzades i acceleració del procés de convergència), per aquest motiu els túnels de vent continuen essent el vehicle més adient per tal d'investigar els conceptes de disseny d'una estructura.

Ara bé, si no es disposen de dades experimentals, aquesta simulació numèrica pot ésser vàlida, per tal d'obtenir una primera aproximació. Però s'ha d'anar en compte d'afirmar que els resultats obtinguts numèricament són vàlids, si no es contrasta amb els resultats experimentals.

En la bibliografia recent, pot apreciar-se que hi han pocs investigadors que estudiïn simultàniament els resultats obtinguts experimentalment amb els teòrics de la simulació numèrica. En aquest treball s'intentarà generalitzar i simplificar el problema, per això es pretén repetir mitjançant l'ajut de la simulació numèrica les condicions de pressa de dades en el túnel de vent, així es treballarà amb les mateixes condicions de contorn que en la investigació experimental i d'aquesta manera poder validar el treball teòric amb l'experimental evitant els coneguts problemes d'escala.

### **1.2.3 Taules i esquemes:**

En les properes pàgines es mostren els esquemes i les taules esmentades.

TAULA N<sup>o</sup> 1.1: Ressenyes històriques (Primeres passes).

INVESTIGADOR	ESTUDIS TEÒRICS I CONSTRUCTIUS	CONSEQÜÈNCIES
L.Da Vinci 1452-1591	Estudi del vol dels ocells i disseny de possibles màquines voladores.	S'acaba una etapa de foscor i començar a veure el llum les investigacions científiques.
E. Mariotte 1620-1684	Mesura les forces que actuen sobre un disc pla submergit dins de l'aigua.	Comencen a realitzar-se els primers estudis de diferents cossos submergits dins un fluid.
I. Newton 1642-1727	Estudi de diferents esferes deixades caure des de la cúpula de Sant Pau (Londres).	
J.C. Borda 1733-1799	Va experimentar en tot tipus de cossos movent-los dins l'aigua mitjançant un braç rotatori.	
B. Robins 1707-1791	Va utilitzar el mateix aparell que Borda però en l'aire.	
J.Le R. D'Alambert 1717-1783	Diferents models treballant amb aire.	Va trobar la paradoxa que porta el seu nom.
A. Concordat 1743-1794 C. Bossut 1730-1814	Diferents models treballant amb aire.	
H. Whenham 1824-1908	Primer estudi teòric per a la realització d'un túnel de vent aerodinàmic, l'any 1871.	Inici de la realització dels túnels de vent aerodinàmics.
G. Eiffel 1832-1923	Estudi de la deflexió produïda pel vent de la torre que porta el seu nom.	Va revisar la tècnica prèviament utilitzada per en Newton i en Mariotte.
H. Phillips 1845-1912	Va construir el primer túnel de vent l'any 1884.	
N.E. Joukowski 1847-1921	Construcció d'un túnel de vent a Moscou l'any 1891.	
O. Lilienthal 1848-1896	Utilització d'un dispositiu per a mesurar la força sobre un objecte pla, l'any 1866.	
Stanton, Maxim, Rateau, Prandtl, Crocco, Riabouchinski		Estudiosos i constructors de túnels de vent.
Baker	Estudi sobre el camp d'utilització de l'enginyeria estructural. Estudia l'any 1884 el desastre del pont de l'estuari del Tay, que va passar l'any 1879.	Va determinar que les ràfegues de vent poden afectar el valor de la pressió màxima.

TAULA N<sup>o</sup> 1.2: Ressenyes històriques (Inici de l'era moderna).

INVESTIGADOR	ESTUDIS TEÒRICS I CONSTRUCTIUS	CONSEQUÈNCIES
Irminger, Nokkentved	Van realitzar les primeres proves en un túnel de vent amb models a escala d'edificis l'any 1936	Inici dels estudis amb models d'edificis.
J. Ackert	Primer túnel de vent supersònic, construït l'any 1930.	Inici de l'era moderna.

TAULA N<sup>o</sup> 1.3: Ressenyes històriques (Aspectes recents).

INVESTIGADOR	ESTUDIS TEÒRICS I CONSTRUCTIUS	CONSEQUÈNCIES
Bailey, Vincent 1943	Creació d'un túnel de vent per tal d'estudiar la capa límit.	Túnel de secció d'assaig extraordinàriament allargada. Inici dels estudis de la capa límit.
Jensen 1948	Va suggerir que la simulació del vent s'efectués mitjançant la utilització d'una capa límit turbulenta.	
Klebanoff, Diehl 1952	Creació d'una capa límit turbulenta, per a simular la turbulència existent a les capes baixes de l'atmosfera.	
Cermak 1952	Simulació de l'evaporació d'un llac, realitzat en un túnel de vent.	Inici dels estudis sobre la capa límit tèrmica.
Owen, Zienkiewicz 1957	Van pogué reproduir completament un flux d'aire dins de la capa límit turbulenta.	
1963	Primera Conferència Internacional sobre "Els efectes del vent en edificis i estructures".	S'obtenen les primeres conclusions sobre els estudis realitzats fins aleshores sobre els efectes del vent sobre les estructures.
Davenport 1967	Mètode estàtic equivalent	Efectes dinàmics del vent



INVESTIGADOR	ESTUDIS TEÒRICS I CONSTRUCTIUS	CONSEQÜÈNCIES
Counihan, Snyder,Hertig, Gartshore, Vickery, Stathopoulos 1967-1980	Estudis de semblança dins la capa límit turbulenta. Simulació de fenòmens atmosfèrics.	Primers estudis via simulació numèrica.
Bearman	Estudis de les inestabilitats dels	Valors de nombre de Strouhal alts
Simiu	Mètode Simiu	Efectes dinàmics del vent
1992  1995	I Simposium Internacional enginyeria computacional del vent (CWE92) 6 Simposium Internacional (CFD)	Han servit d'unió dels futurs desenvolupaments de l'enginyeria, mitjançant els mètodes computacionals
Murakami 1995	Resultats numèrics i experimentals efectuats per ell mateix	Contrastació de resultats numèrics i experimentals
Roshko 1993	Estudi de les inestabilitats dels vòrtexs	Confirmació dels valors obtinguts per Bearman
Hughes, Jansen 1995	High Performance Finite Element	Resolució numèrica mitjançant elements finits
Davenport, Stathopoulos 1995	Generalització i simplificació de les càrregues del vent	Simulació numèrica en edificis, assaig en túnel de vent a escales de longitud de 1/400
Nomura, Shimura, Sekine (Tokyo) 1997	Resposta a les vibracions d'edificis extremadament alts	Resposta per a nombre de Reynolds baixos i escales de longitud grans

### **1.3 OBJECTIUS:**

A l'hora de realitzar el disseny d'una estructura o d'un edifici esvelt, cal saber quines són les forces que hi actuen determinant els coeficients corresponents de pressió i de resistència a l'avanç, i aplicar-los en la fase de construcció. També cal veure si les vibracions produïdes per la turbulència (aleatòria o organitzada) donen lloc a valors massa grans (ressonàncies). Per últim cal comprovar si hi haurà fenòmens d'autoexcitació.

Aquestes forces que poden arribar a ser destructives, poden produir-se o bé perquè en el règim estacionari són massa grans, o bé perquè en el règim no estacionari s'ha produït o bé autoexcitació (vibracions destructives), o bé s'han generat estructures coherents amb freqüències que han coincidit amb alguna de les freqüències de l'estructura entrant en ressonància.

El present treball de doctorat té per objectius estudiar teòricament i experimentalment el comportament del flux de l'aire al voltant d'un edifici octogonal tot analitzant els efectes estàtics i dinàmics que es produeixen sobre aquest. D'aquesta manera es preten arribar a establir tota una *sistemàtica* d'estudi d'aquest fenomen.

Els objectius que volen assolir-se en la *part teòrica* són bàsicament l'anàlisi del flux al voltant de l'estructura, plantejant les equacions que descriuen aquest fenomen juntament amb la seva resolució numèrica (CFD), a fi de conèixer els camps de velocitats i de pressions.

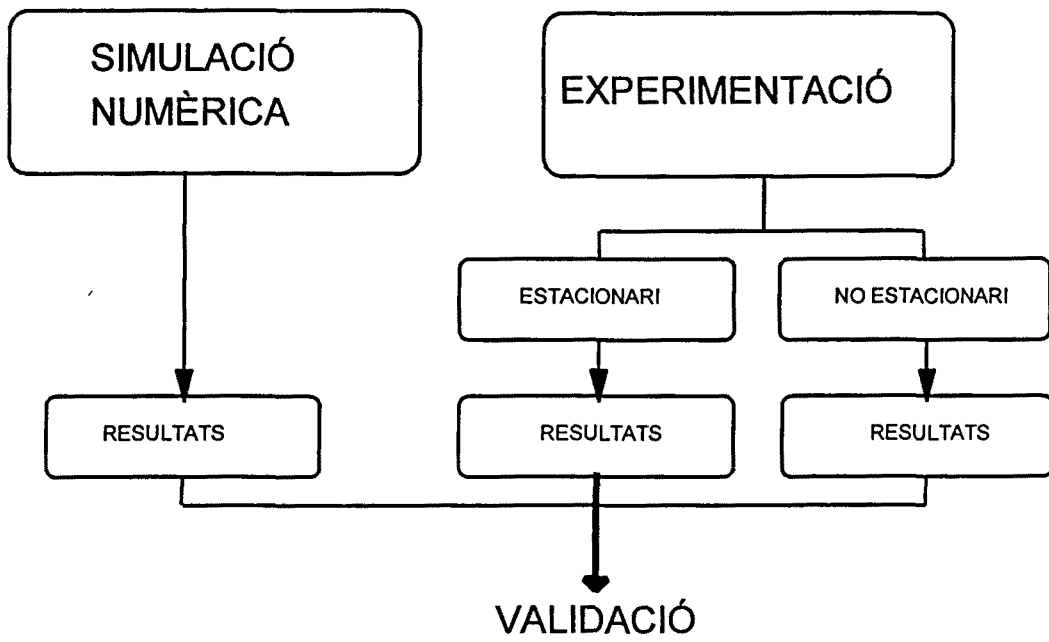
Donat que un experiment ben preparat és la millor manera d'analitzar un problema en forma concreta, l'objectiu que es vol assolir en la *part experimental* és la mesura de les velocitats i de les pressions. Les proves es realitzaran en el banc d'assaig disponible al laboratori d'Aerodinàmica del Departament de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB.

Una vegada realitzades aquestes parts, es compararan els resultats teòrics obtinguts mitjançant la simulació fluidodinàmica CFD i els obtinguts experimentalment. A més a més, es realitzarà l'estudi dels fenòmens no estacionaris, tot trobant les principals excitacions que s'originen i que poden arribar a generar vibracions fluidodinàmiques sobre l'estructura. Una vegada determinades aquestes, fora interessant estudiar les possibles inestabilitats que poden generar un fenomen d'autoexcitació. Per portar a terme aquesta part s'haurà d'adaptar la maqueta utilitzada en el flux estacionari i transformar-la en una de més flexible, per tal de simular aquest fenomen.

La instrumentació utilitzada estarà formada pels dispositius experimentals del laboratori d'Aerodinàmica (túnel de vent, sonda d'anemometria, acceleròmetres, sonda d'intensimetria, amplificadors, gravadores, etc.) del Departament de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB i els mitjans informàtics (estació de treball i programa FIRE), del Departament de Mecànica de Fluids Termotècnia i Física de l'EUETIB.

A manera de resum, pot construir-se l'esquema N° 1.3.

**Esquema 1.2: Objectius**



#### **1.4 PLA DE TREBALL:**

Una vegada fixats els objectius del present treball, és a dir analitzar els efectes estàtics i dinàmics de l'aire al voltant d'una estructura octogonal. Es procedeix a portar a terme aquests, per això cal realitzar una sèrie de passes.

Com en tot estudi, primer s'ha de realitzar un anàlisi bibliogràfic i d'antecedents per a saber quines són les últimes novetats en aquest camp. Una vegada s'ha realitzat una primera valoració temàtica, cal començar a plantejar-se portar a terme la part teòrica i la part experimental.

**Part teòrica.** En aquest apartat s'ha tractat de veure quins són els procediments teòrics, tant en el règim estacionari com en el no estacionari, per la seva posterior contrastació en els mètodes experimentals.

**Part experimental.** En aquest apartat se han tractat d'establir les millors condicions per tal de portar a terme aquest estudi. Així, en aquest cas, primer de tot es van realitzar una sèrie "*d'estudis previs*", per a veure el comportament del flux al voltant d'objectes:

- Visualització en túnel hidrodinàmic.
- Estudi de velocitats al voltant d'un octògon.
- Caracterització del túnel de vent.
- Visualització mitjançant fils.

**Visualització en túnel hidrodinàmic.**- La complexitat d'utilització d'un túnel aerodinàmic per a realitzar visualitzacions, fa que els túnels hidrodinàmics bidimensionals siguin molt utilitzats per a donar una idea del comportament d'un flux al voltant d'un obstacle. Per aquest motiu, es van realitzar una sèrie de registres fotogràfics en el túnel hidrodinàmic bidimensional de que disposa el Departament de Mecànica de Fluids (ETSEIB) que té una

secció de visualització de 170x90 mm<sup>2</sup> amb regulador de velocitats per a treballar a diferents nombres de Reynolds (1000 a 10000), per a veure quin comportament tenen els deixants darrera de la maqueta octogonal.

Donat que l'edifici octogonal té diferents arestes vives, es va iniciar l'estudi per a un cilindre de les mateixes dimensions que l'octògon (25 mm).

**Estudi de velocitats al voltant d'un octògon.**- Per a conèixer les diferents tècniques anemomètriques per a la mesura de velocitats i familiaritzar-se en la instrumentació i presses de dades en maquetes d'edificis, vaig realitzar una sèrie de mesures de velocitat en el túnel de vent del Departament d'Enginyeria Química i Bioquímica de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.

Aquest túnel té les següents característiques; túnel de vent de vena tancada i circuit obert de baixa velocitat, amb una cambra d'assaig de secció quadrada de 600x600x3000 mm, amb una secció útil de 400x400 mm. La maqueta octogonal utilitzada, mateixes dimensions que la que s'ha fet servir posteriorment és de ferro, donat que les característiques de la cambra d'assaig no hi havia previst un sistema de subjecció de la mateixa. L'estudi de les velocitats es va efectuar mitjançant un anemòmetre de fil calent i de temperatura constant.

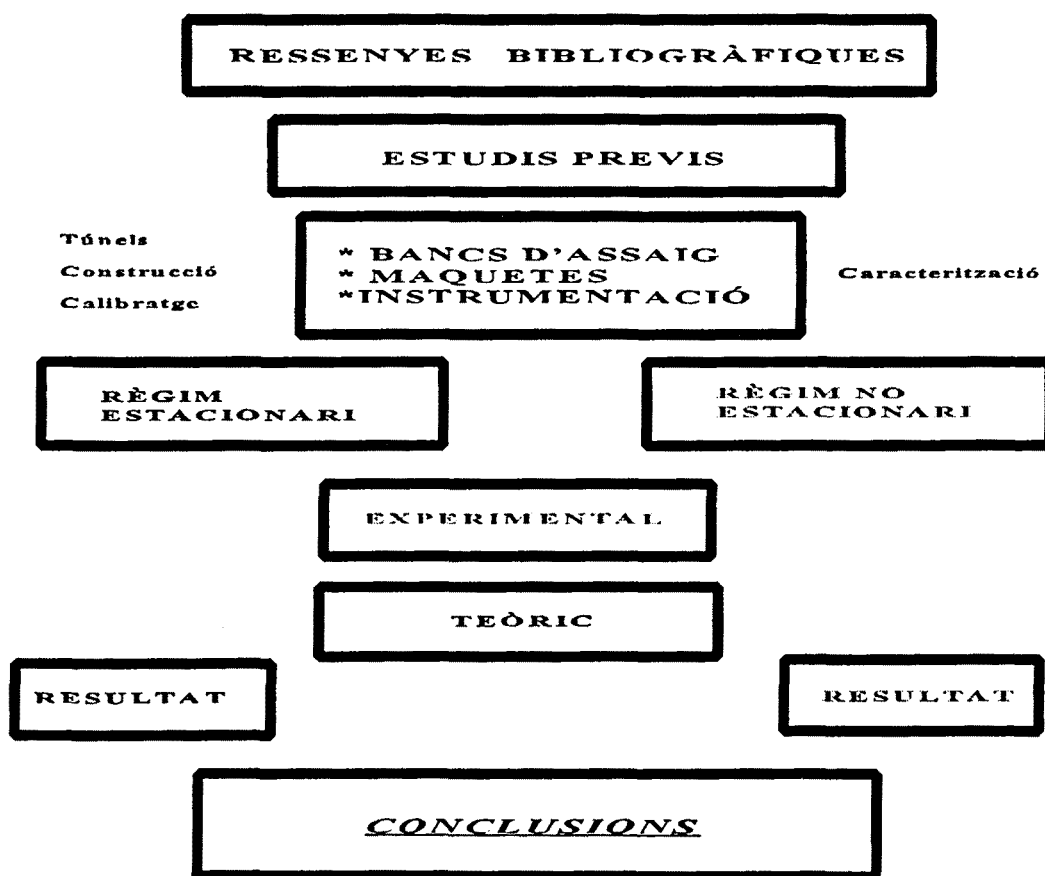
**Caracterització del túnel de vent.**- Una vegada efectuats els anteriors apartats, es va portar a terme la caracterització del túnel de vent de que disposa el Departament de Mecànica de Fluids (ETSEIB), en quant a trobar les escales més adequades d'utilització, els camps de velocitats i els gruixos de la capa límit en la cambra d'assaig.

**Visualització mitjançant fils.**- Per tal de visualitzar d'una manera senzilla la distribució de les línies de corrent al voltant del prisma regular de base octogonal, posicions frontal i radial; i d'un cilindre. S'ha fet servir el mètode nomenat dels fils, donada la seva senzillesa de realització en el túnel de vent de Barcelona.

Aquests fils ens indiquen la direcció del flux i donen una idea de caire orientatiu de quin pot ésser el comportament esperat i analitzar el procés de generació del deixant. Tot aquest procés de visualització s'ha realitzat mitjançant registres fotogràfics.

Una vegada fets aquests estudis previs, s'han realitzat la part teòrica i experimental tant en règim estacionari como no i dels resultats obtinguts s'han extret les conclusions oportunes

El proper esquema N° 1.3, es pot apreciar quin ha estat el procés d'elaboració d'aquest treball, per tal d'aconseguir els objectius mencionats anteriorment.



Esquema N° 1.3: Pla de treball

CAPÍTOL II

**ESTUDI TEÒRIC RÈGIM  
ESTACIONARI**



## II ESTUDI TEÒRIC RÈGIM ESTACIONARI

### 2.1 INTRODUCCIÓ:

Qualsevol estudi requereix un desenvolupament teòric del fenomen i el planteig de les *Equacions* que el descriuen. Per a la seva resolució, hi han diferents mètodes teòrics com per exemple la *Teoria Del Flux Potencial* o la *Simulació Numèrica*. Cadascun d'ells té els seus avantatges i els seus inconvenients, encara que cada dia els segons són menys. En el cas concret del disseny d'estructures i d'edificis, l'efecte de les càrregues estàtiques i dinàmiques provocades per l'acció del vent han d'ésser considerades amb una “*atenció especial*”.

Des dels inicis de l'experimentació dins del camp de la Mecànica de Fluids, els investigadors han pogut proporcionar respostes a les preguntes concernents a la simulació del flux d'aire, encara més des de que les condicions necessàries per una semblança exacta son conegudes. Però tot i que els aspectes teòrics de la semblança són prou coneguts i les condicions necessàries de semblança de la capa límit atmosfèrica són acceptades unànimement, apareixen dificultats quan s'intenta aplicar, ja que aquestes condicions són freqüentment contradictòries i complementàries.

L'aplicació de la *Teoria del Flux Potencial* permet obtenir una primera solució vàlida, però cal tenir en compte que els càlculs efectuats són una aproximació del flux real.

Els inconvenients que presenta la *Simulació Numèrica* són, el de la precisió dels resultats obtinguts i la dificultat per quantificar aquesta precisió. Així resulta difícil, descriure matemàticament un fenomen físic complexa com és aquest, ja que no podem obtenir una solució exacte. A més a més, hem de transformar les equacions diferencials que descriuen el fenomen, en equacions algebraïques que són les que utilitza la simulació numèrica, i això fa que es cometi un error. Ara bé no tots són inconvenients, doncs a més a més d'ésser una

alternativa als mètodes experimentals, té la facilitat de poder canviar les condicions de contorn, reproduint els diferents tipus de vent a que pot està sotmès un edifici i per tant estudiar diferents situacions.

Encara que s'han produït importants avenços en les tècniques experimentals i en els mètodes numèrics de càlcul, aquesta constant evolució està molt unida a la dels computadors, que són avui en dia, una eina indispensable per l'enginyeria.

## **2.2 EQUACIONS FONAMENTALS:**

Les equacions fonamentals que és necessiten per a resoldre el nostre problema són: continuïtat, quantitat de moviment, energia, estat (fluid compressible), i per a un flux turbulent, s'han d'afegir les equacions corresponents al model de turbulència. A continuació es presenten les equacions bàsiques de la dinàmica de fluids.

### **Equació de continuïtat:**

Per a un flux tridimensional i tridireccional, l'equació de continuïtat és:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

i amb una altre notació queda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

Per a un flux compressible estacionari,

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

i per a un flux incompressible (estacionari o no),

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

**Equació de la quantitat de moviment:** A) Equació d'Euler d'un flux no viscos;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z$$

B) Equació de Cauchy d'un flux viscos:

Ara és consideraran les equacions diferencials que descriuen els esforços tallants i/o la turbulència:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

o amb una altre notació,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_i = 0$$

Les relacions resultants esforç-velocitat de deformació són per a un fluid newtonià (en coordenades cartesianes):

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

Substituint aquests termes, s'obté per a un flux tridimensional i tridireccional, i per a un fluid incompressible i newtonia:

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

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

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

o amb una altre notació,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g_i - \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = 0$$

Equacions de Navier-Stokes per a un fluid incompressible de viscositat constant i són al mateix temps les equacions més conegudes i més difícils de la ciència de l'enginyeria, al ser equacions diferencials parcials acoblades i no lineals.

**Equació de l'energia:** Partint de l'equació de l'energia en forma integral;

$$\frac{dQ}{dt} = -\iint q \cdot dA + \iiint \dot{\theta} \rho dv$$

on  $q$  és el flux vectorial de calor i  $\dot{\theta}$  la taxa de producció d'energia per unitat de massa en un punt del continu.

De l'equació anterior i després de realitzar les simplificacions pertinents, s'obté la següent expressió:

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho \dot{\theta} = \rho \frac{d\hat{u}}{dt}$$

Com:

$$q_i = -K \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

(Llei de Fourier, on K és la conductivitat tèrmica)

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \dot{\theta} = \rho \frac{d\hat{u}}{dt}$$

Substituint  $\tau_{ij}$  utilitzant el tensor d'esforços desviació:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + P \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{\theta} + \Phi$$

on  $\Phi$  és la funció dissipació, cal dir que en aquestes equacions no s'han considerat la transferència de calor per radiació, ni les possibles fonts internes de calor.

### **2.3 SIMULACIÓ NUMÈRICA:**

Per a estudiar experimentalment aquests tipus de fenomen, és necessita un material sofisticat i costos, a més a més d'una forta inversió en temps que tot assaig necessita. Per una altre banda, són ben coneguts els problemes que apareixen al intentar respectar la semblança entre un fenomen a escala real i el seu model. Problemes que es veuen augmentats el créixer el factor d'escala de la semblança i que no són estranys a l'anàlisi del flux al voltant d'un edifici.

#### **2.3.1 Conceptes bàsics.-**

Les equacions diferencials que regeixen els fenòmens de transport de massa i energia, només són resolubles de forma analítica en geometries senzilles, quan aquesta es complica és necessari utilitzar l'ajut dels mètodes numèrics. Gràcies a la gran evolució que han experimentat els ordinadors en els darrers anys, les equacions descrites anteriorment es poden resoldre mitjançant els mètodes numèrics que han donat lloc al nomenat CFD (Computational Fluid Dynamics).

La simulació numèrica consisteix en discretitzar, dins el domini de càlcul, les equacions que regeixen el fenomen de transport, i que donen lloc a una sèrie de nodes que formen la malla computacional, és en aquests nodes on es calculen totes les propietats físiques del fluid. En molts casos la simulació és la alternativa als mètodes experimentals i enfront a aquests apareixen avantatges i inconvenients.



**Avantatges:**

- . *Baix cost*; el cost de la solució numèrica és menor que el de la investigació experimental.
- . *Velocitat*; es poden estudiar amb certa facilitat diferents configuracions fins obtenir el disseny òptim. En contraposició, modificacions del model experimental requereixen d'un temps superior.
- . *Informació*; permet conèixer en tot el domini el valor de totes les magnituds del problema (arriben a llocs inaccessibles). En el cas experimental, es fa difícil imaginar un escombrada de tot el domini i en determinades situacions és realment complicat accedir a algunes zones.
- . *Condicions realistes*; experimentalment existeixen certes dificultats per a reproduir condicions realistes. En la simulació numèrica no és difícil treballar amb dimensions grans o petites, temperatures elevades o baixes, en ambients tòxics o inflamables, o en processos a velocitat molt alta o molt baixa.
- . *Condicions ideals*; en alguns casos resulta interessant centrar l'estudi en determinats efectes, deixant de costat d'altres, com per exemple, l'estudi bidimensional, densitat constant, superfícies adiabàtiques, etc. Mitjançant la simulació resulta senzill reproduir condicions ideals, mentre que experimentalment aquestes condicions s'han de reproduir de forma aproximada i amb un cost molt més elevat.

**Inconvenients:**

- . *Precisió dels resultats*; el inconvenient de la simulació numèrica apareix en la precisió dels resultats i en la dificultat per a quantificar aquesta precisió (Roache [28]). Les fonts d'error són, bàsicament, de dos tipus:
  - a) *descripció matemàtica*; existeixen casos on la descripció matemàtica del fenomen físic a estudiar no és exacte i és necessari utilitzar models empírics o semiempírics.
  - b) *mètode numèric*; per a trobar la solució de les equacions diferencials que apareixen, és necessari transformar-les en equacions algebraïques, cometent l'inevitable error de truncament.

### **2.3.2 Equacions diferencials a la simulació numèrica .-**

Donat el gran volum d'equacions a resoldre en qualsevol fenomen físic que estudiem, s'ha utilitzat per resoldre-les, el programa comercial FIRE. Com és lògic hem de partir de les equacions fonamentals de la Mecànica de Fluids vistes en l'apartat 2.2:

Equació de Continuitat.

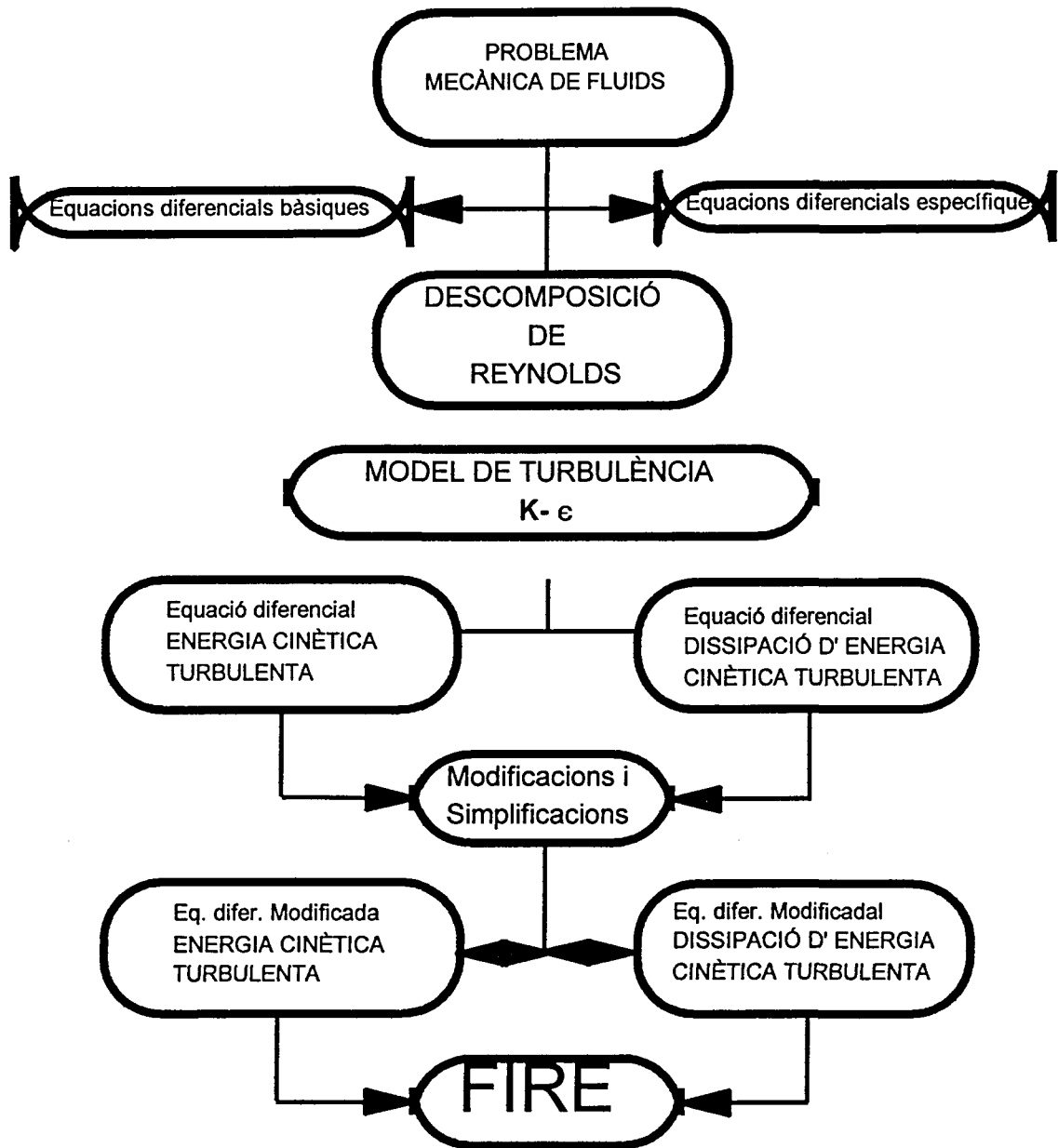
Equació de Quantitat de moviment:

(Equació d'Euler per a un flux no viscos o l'equació de Cauchy d'un flux viscos).

Equació de l'Energia.

Equació del Model de turbulència.

A continuació és mostra l'esquema 2.1 amb el procés que es seguirà per tractar aquestes equacions i obtenir la solució desitjada.



Esquema 2.1: Procés a seguir

Les equacions diferencials bàsiques són suficients per a resoldre el cas d'un flux laminar. Però en un flux turbulent, les velocitats, pressions i temperatures canvien de forma ràpida i aleatòria en funció de la posició i del temps. Actualment, amb els mitjans computacionals disponibles, no es poden resoldre els règims transitoris i turbulents per integració directa de les equacions diferencials. És per tot això, que es fa necessari utilitzar la descomposició de Reynolds, que consisteix en transformar les variables temporals ( $\phi$ ) en un valor mitja ( $\bar{\phi}$ ) i un valor fluctuant de la variable al voltant de la mitja ( $\phi'$ ). Per tant, les variables dependents instantànies queden com suma de dos termes:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

on la mitjana temporal en un flux estacionari es defineix com:

$$\bar{\phi}(x_0) = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{2t_0} \int_{-t_0}^{t_0} \phi(x_0, t) dt$$

Si el flux és transitori la mitjana temporal es defineix com:

$$\bar{\phi}(x_0, t) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m + 1} \sum_{-m}^m \phi(x_0, mt_0 + t)$$

Aplicant aquesta *Descomposició De Reynolds*, les equacions anteriorment comentades en l'apartat 2.2 es transformen en les següents:

**Equació de continuïtat:**

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0$$

**Equació de la quantitat de moviment:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j} - \bar{\tau}_{ij}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \bar{\rho} g_i = 0$$

**Equació de l'energia:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{h} + \overline{\rho u'_j h'}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\bar{\lambda}}{C_p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = 0$$

En la darrera expressió, no s'han tingut en compte les fluctuacions de la densitat, de la viscositat laminar, de la conductivitat tèrmica ( $\lambda$ ) ni de la calor específica ( $c_p$ ).

Al introduir en les equacions bàsiques, la descomposició de Reynolds apareixen noves incògnites en el problema:

Primer, és té una matriu de 3x3, anomenada tensor de Reynolds i que està formada per la mitja del producte de fluctuacions de la velocitat, i que apareixen en l'equació de conservació de la quantitat de moviment.

$$\begin{bmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{bmatrix}$$

Segon, en l'equació de l'energia els valors fluctuants de la velocitat i entalpia (h) dóna lloc a un vector de 3 elements.

$$(\overline{u'_1 h'} \quad \overline{u'_2 h'} \quad \overline{u'_3 h'})$$

Per a resoldre el nou sistema d'equacions, és necessari generar una sèrie d'expressions per a calcular les dotze noves incògnites. És per aquest motiu, que queda justificat la necessitat dels models de turbulència.

### 2.3.3 Model de turbulència.-

El primer en modelitzar aquest tensor, va ésser Boussinesq l'any 1896 tot introduint el concepte de viscositat turbulenta ( $\mu_t$ ) per similitud amb la llei de Stokes per a un flux laminar.

Aquesta idea, pot ésser utilitzada per a estimar les components del tensor de Reynolds:

$$\tau_{ap} = - \overline{\rho u'_i u'_i} = 2\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left( \bar{\rho} k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right)$$

$$\tau_{ap} = - \overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$$

Partint de aquesta hipòtesis, el Model de Turbulència k-ε utilitza dues equacions diferencials addicionals, una per a l'energia cinètica turbulenta (k) i una altra per a la dissipació de l'energia cinètica turbulenta (ε):

Equació de l'energia cinètica turbulenta

$$k = \frac{\overline{u_i'^2}}{2}$$

Equació de la dissipació cinètica turbulenta

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l_t}$$

on  $l_t$  és l'escala de longituds de turbulència i  $C_\mu$  és un coeficient empíric que normalment pren un valor constant.

També podem definir, unes escales de longitud i de velocitats característiques de la turbulència com  $k^{3/2}/\varepsilon$  i  $k^{1/2}$  respectivament. Utilitzant l'anàlisi dimensional i les escales definides, es troba la següent relació per a la viscositat turbulenta:

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon}$$

**Equació de l'energia cinètica turbulenta:**

Una equació diferencial per a la conservació de l'energia cinètica turbulenta pot obtenir-se per multiplicació de l'equació de quantitat de moviment per a  $u_i$ , amb el seu corresponent component de fluctuació  $u_i'$  i amitjanant. El resultat, no tenint en compte les fluctuacions de densitat, és:

$$\begin{array}{cccccc}
 \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) & + & \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j k) & + & \frac{\partial}{\partial x_j}[\overline{\rho u'_j (k + \frac{p}{\rho})}] & + & \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} & + & \mu \overline{\left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i}\right)^2} & - & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) & = & 0 \\
 I & & II & & III & & IV & & V & & VI & & 
 \end{array}$$

Els termes I i II quantifiquen la velocitat de canvi i la convecció de k motivat per el flux mitja. El III representa el transport de k motivat per la fluctuació de les velocitats. Aquest terme es modelat pel programa FIRE com:

$$- \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

on  $\sigma_k$  és el nombre de turbulència de Prandtl. El terme IV, és el producte entre les tensions de Reynolds i la velocitat de deformació mitjana, i representa la velocitat de generació d'energia cinètica turbulenta. Utilitzant les equacions de la hipòtesis de Boussinesq, la velocitat de generació ( $G_t$ ) queda:

$$G_t = \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$$

El V representa la dissipació d'energia cinètica turbulenta i per definició de  $\epsilon$  pot substituir-se per  $\rho\epsilon$ . El terme VI representa el transport de k per difusió molecular i pot combinar-se amb el model utilitzat per al terme III, donen:

$$- \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$





El terme III descriu el transport de  $\epsilon$  degut a la fluctuació de velocitat i es modelitza de forma similar al mateix terme de l'equació de transport de  $k$ :

$$- \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right)$$

El terme IV representa l'augment de  $\epsilon$  i es modelitza com:

$$- C_1 \frac{\epsilon}{k} \overline{\rho u'_i \mu'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

El terme V expressa la disminució de  $\epsilon$  i s'assumeix que és proporcional a  $\epsilon$  dividit per l'escala de temps de decaïment de la turbulència,  $k/\epsilon$ ; és a dir:

$$C_2 \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k}$$

El terme VI conté el producte entre  $\epsilon$  i la divergència de la fluctuació de velocitat i el terme VII la divergència de la velocitat mitja. Els dos es substitueixen per el VII multiplicat per una constant:

$$C_3 \bar{\rho} \epsilon \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m}$$

El terme VIII conté una correlació desconeguda entre gradients i fluctuacions de velocitat. Per a fluxs amb nombres de Reynolds elevats el terme VIII i el  $S_\mu$  és menystenible.

Aplicant totes les consideracions anteriors apareix la forma de l'equació diferencial de  $\epsilon$  utilitzada pel programa FIRE:

$$\frac{d}{dt}(\bar{\rho}\epsilon) + \frac{d}{dx_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j\epsilon) = \frac{d}{dx_j}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{d\epsilon}{dx_j}\right) + \frac{\epsilon}{k}\left[C_1\mu_{eff}G_t - \frac{2}{3}C_t\frac{\sigma u_m}{\partial x_m}\left(\mu_{eff}\frac{\sigma u_m}{\partial x_m} + \bar{\rho}k\right)\right] - C_2\frac{\bar{\rho}\epsilon^2}{k} + C_3\bar{\rho}\epsilon\frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m}$$

En la taula 2.1 es mostren els valors que utilitza el FIRE per a cadascuna de les constants que apareixen en les equacions diferencials de transport de k i de ε.

**Taula 2.1: Coeficients model k-ε**

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_h$	$\kappa$	E
0,09	1,44	1,92	-0,333	1	1,217	0,9	0,418	9,793

Per últim, les equacions diferencials per a qualsevol variable es poden escriure en forma general com:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{\phi} - \Gamma_\phi\frac{\partial\bar{\phi}}{\partial x_j}\right) = S_\phi$$

essent φ qualsevol de les variables  $u_1, u_2, u_3, h, k, \epsilon$  o en el cas de la conservació de la massa la unitat,  $\Gamma_\phi$  és el coeficient d'intercanvi turbulent i  $S_\phi$  és el terme de font.

### **2.3.4 Modelització de l'equació de l'energia per a un flux turbulent.-**

El model de turbulència presentat fins ara ha plantejat equacions que permeten salvar l'escull del tensor de Reynolds. Seguint la filosofia dels processos de difusió hi ha que plantejar una equació per als termes producte entre la fluctuació de l'entalpia i la velocitat, que apareixen en l'equació de l'energia en règim turbulent:

$$-\overline{\rho u' h' j} = \frac{\mu_t}{\rho_h} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i}$$

Així com, l'equació d'estat necessària pel cas d'un fluid compressible (gasos ideals):

$$\frac{p}{\rho} = R\bar{T}$$

En la taula 2.2 es trobem agrupades les equacions i els coeficients pel model k-ε

Taula 2.2: Ecuacions i coeficients del model k-ε

$$K) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j k) + \frac{\partial}{\partial x_j}[\overline{(\rho u'_j k + \frac{p}{\rho})}] + \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = 0$$

$$K) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_{eff} G_t - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \left[ \mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} + \bar{\rho}k \right] - \bar{\rho}\epsilon$$

$$\epsilon) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u'_j \epsilon}) + 2\mu \left[ \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_1} \frac{\partial u'_i}{\partial x_1} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \right)^2 \right] +$$

$$- 2\mu \left[ \frac{\partial u'_i}{\partial x_1} \frac{\partial u'_j}{\partial x_1} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_1} \right)^2 \right] - 2\bar{\rho}\epsilon \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \bar{\rho}\epsilon \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + 2\mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_1 \partial x_j} u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_1} - S_\mu = 0$$

$$C_1) \quad - C_1 \frac{\epsilon}{k} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

$$C_2) \quad C_2 \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$C_3) \quad C_3 \bar{\rho} \epsilon \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m}$$

$$\epsilon) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - \frac{\epsilon}{k} \left[ C_1 \mu_{eff} G_t - \frac{2}{3} C_1 \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} + \bar{\rho}k \right) \right] -$$

$$- C_2 \frac{\bar{\rho}\epsilon^2}{k} + C_3 \bar{\rho}\epsilon \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m}$$

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_h$	$\kappa$	$E$
0,09	1,44	1,92	-0,333	1	1,217	0,9	0,418	9,793

### 2.3.5 Condicions de contorn en les parets.-

En les zones on hi ha contacte entre sòlid i fluid, es produeixen dos efectes importants que és necessari considerar:

**Primer;** es donen forts gradients en la majoria de les propietats del fluid.

**Segon;** el nombre de Reynolds turbulent és baix, produint una zona on els efectes viscosos són importants.

A més a més, la presència de la paret sòlida influeix en l'estructura de la turbulència, fent que l'escala de turbulència menor deixi d'ésser isòtropa. Aquests efectes poden ser modelats utilitzant un mallat molt fina i amb models de turbulència per a nombres de Reynolds baixos; no obstant, això requeriria un cost computacional elevat que resulta innecessari en la majoria d'aplicacions enginyerils. L'alternativa consisteix en utilitzar expressions semiempíriques en la capa límit, que utilitzen la distància normal a la paret adimensionalitzada,  $y^+$ , definida com:

$$y^+ = \frac{\rho v_\tau y}{\mu}$$

on la velocitat de fricció  $v_\tau$ , ve donada per:

$$v_\tau = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2}$$

essent  $y$  la distància normal a la paret i  $\tau_w$  l'esforç tallant en la paret.

Tal com va demostra C. B. Millikan i d'altres, una llei logarítmica s'ajusta de forma raonable al comportament de la velocitat en la capa límit i va proposa la nomenada llei logarítmica de la capa límit:

$$u_T = \frac{v_\tau}{\kappa} \ln(Ey^+)$$

on  $u_T$  és la velocitat tangencial a la paret a una distància  $y$  de la mateixa i els valors que utilitza el programa per a les constants  $E$  i  $\kappa$  es poden trobar a la taula 2.1. A més a més, aquesta llei és la base de càlcul utilitzada pel FIRE en les zones on apareixen parets sòlides.

### **2.3.6 Esquema de resolució.**

Fins ara s'han presentat les equacions diferencials bàsiques de la mecànica de fluids utilitzades pel programa FIRE. A arribat el moment de resoldre aquestes equacions mitjançant l'enfocament de la dinàmica de fluids computacionals (DFC).

Els mètodes DFC més populars són:

- Diferències finites (DF)
- Volums finits (VF)
- Elements finits (EF)

La tècnica que utilitzem, és la coneguda amb el nom de "diferències finites". Aquest mètode és molt útil per a generar solucions aproximades d'equacions diferencials de tot tipus. Les equacions computacionals es formulen començant amb les equacions diferencials i després aproximant les derivades de les equacions mitjançant diferències finites. Els passos necessaris per a realitzar un càlcul mitjançant les diferències finites són els següents:

- Per a definir un nombre gran de punts, en el camp de flux es superposa una malla. En cadascun d'aquests punts es defineixen les variables del flux (velocitat, pressió, potencial, funció de corrent,...)
- En cadascun dels punts, les equacions diferencials s'aproximen, substituint qualsevol derivada per quocients de diferències finites que inclouen les variables de flux en punts veïns.
- Per la mateixa raó, les condicions de contorn s'aproximen pels punts sobre o prop de les fronteres del flux.
- El resultat és un sistema d'equacions algebraiques. Aquestes es resolen per a les variables de flux en els punts de la malla utilitzant qualsevol mètode iteratiu conegut.

Com és normal en tots els mètodes de DFC, la precisió requereix una malla molt fina, un gran nombre d'equacions i càlculs extensos. En general, la única elecció realista són les solucions via computador.

### **2.3.7 Descripció de l'esquema de treball del FIRE.-**

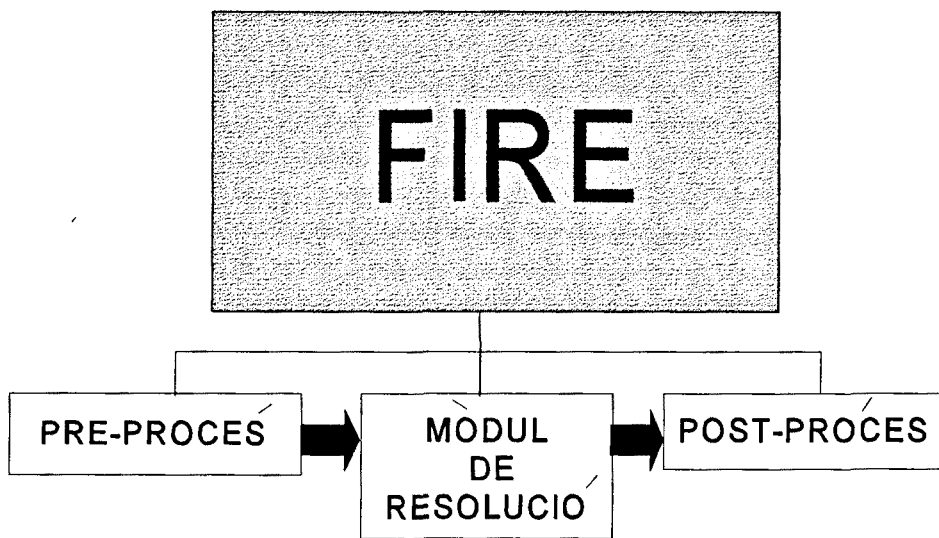
És, en les cel·les creades pel programa, on utilitzant el desenvolupament en sèrie de Taylor es passa d'un sistema d'equacions diferencials a un d'algebraiques, la seva resolució mitjançant mètodes iteratius ens donarà les característiques d'aquestes equacions, fins que la diferència entre els resultats donats per dos passos consecutius del càlcul iteratiu sigui inferior al criteri de convergència fixat. Aleshores el programa salta al següent interval de temps repetint-se el procés fins cobrir tot el període de temps que es pretén estudiar.



Concretament els passos seguits per a l'estudi d'aquest sistema fluídic són:

- 1) Recopilar la màxima informació sobre el sistema fluídic a estudiar. Un coneixement previ del comportament del sistema facilita la presa de decisions a l'hora de crear el model. Decisions com la configuració del mallat, les condicions de contorn, els paràmetres computacionals, etc.
- 2) Crear la geometria. En aquest pas es tracta d'anar generant i unint superfícies senzilles fins generar una superfície més complexa que modelitzi el sistema ha estudiar.
- 3) Crear el mallat. Consisteix en generar un volum, format per cel·les de sis cares, que s'adaptin a la superfície generada en l'apartat anterior. També és possible anar unint volums senzills per a aconseguir un volum final més complexa.
- 4) Assignar al volum les condicions de contorn adequades a cadascuna de les seves superfícies, entrades de fluid, sortides, parets fixes, parets mòbils, etc. En aquest punt s'han de fixar-se les propietats físiques a cadascuna de les superfícies, com temperatura, rugositat, pressió, cabal, etc. *(Aquests punts formen les condicions de contorn del model)*
- 5) Preparar el model del sistema fluídic per a la seva resolució. En aquest pas, es defineixen les condicions inicials, els paràmetres computacionals i les condicions que varien amb el temps. El resultat, és un fitxer que conte les indicacions que necessita el programa per a realitzar la simulació. Una vegada es disposa del mallat del volum, de les condicions de contorn i de les especificacions necessàries per a la simulació, pot dir-se que el model del sistema ha estat creat.
- 6) Sotmetre el model del sistema a la resolució. El programa genera un fitxer amb els resultats de la simulació. Durant la simulació és possible visualitzar en pantalla els resultats que es van obtenint per a una cel·la del sistema prèviament seleccionada i emmagatzemar aquests valors en un fitxer pel seu posterior tractament.
- 7) Analitzar els resultats, ja que el programa disposa de tota una sèrie d'utilitats de visualització per a analitzar els resultats amb representacions amb colors, vectors, isolínies, traces de partícules, etc.

El programa comercial FIRE està estructurat en tres grans blocs: **PRE-PROCÉS**, on es genera el model del sistema fluídric; **MÒDUL DE RESOLUCIÓ**, que resol les equacions diferencials del model creat en el pre-procés i; **POST-PROCÉS**, que ofereix les eines per a realitzar l'anàlisi dels resultats, tal com pot apreciar-se en l'esquema 2.2.



Esquema N° 2.2: Blocs de treball del programa FIRE

## **PRE-PROCÉS**

En el pre-procés es genera el model del sistema fluídic que es pretén estudiar. Això es realitza pas a pas:

- . Geometria.
- . Mallat del volum de control.
- . Condicions de contorn (C.C.).
- . Paràmetres computacionals, que regeixen la simulació.

### **Geometria**

És el conjunt de superfícies que delimiten el volum que es sotmet a estudi, és el que es podria dir superfície de control. Per a generar-la hi ha dos camins: el primer consisteix en utilitzar els menús propis del FIRE incrementats per aquest motiu. El segon camí consisteix en importar part o la totalitat de la superfície de control des d'altres paquets informàtics, tipus CAD.

### **Mallat del volum de control**

És la zona de l'espai a estudiar i en el cas de l'anàlisi mitjançant mètodes numèrics, és necessari discretitzar-lo mitjançant un mallat adequat. El FIRE defineix aquest volum com la zona de l'espai tancada per la superfície de control. També s'ha de considerar el temps necessari per a la seva creació, les necessitats computacionals de memòria i el temps de càlcul. És important crear un bon mallat per a aconseguir resultats acceptables.

Els elements fonamentals que formen la malla, únicament poden ésser cel•les de sis cares (al utilitzar diferències finites), això ens obliga a tenir limitacions al haver de connectar tots els vèrtexs d'una cel•la amb vèrtexs d'altres cel•les. També fa augmentar molt el nombre de cel•les si es pretén reduir la grandària de la malla en una zona concreta.

A l'hora de generar el mallat que s'adapti a una geometria composta per superfícies, el FIRE ofereix dos mètodes alternatius. El primer mètode (*calculation method*) consisteix en definir els vèrtexs, arestes i cares del volum sobre la geometria definida anteriorment. El segon mètode (*cell block method*) consisteix en crear un cub, en el que es defineix la grandària de cel·la i el nombre de cel·les en cada una de les tres direccions de l'espai, i adaptar-lo a la geometria del problema.

Degut a la importància que sobre els resultats d'una simulació té el mallat, és necessari anar modificant-lo i redimensionar-lo en determinades zones en funció dels resultats obtinguts en cada nova simulació. Inclús, no és estrany trobar-se amb la necessitat de reconfigurar tota l'estructura del mallat. Per tot això, la creació de la malla computacional és un treball que requereix molt de temps, una important dosi de paciència i tota l'experiència i coneixements previs que s'han pogut acumular.

### **Condicions de contorn**

Aquestes han de quedar clares en el moment que es defineix l'estratègia amb la que es va a abordar el modelat del fenomen. Les propietats físiques (pressió, temperatura, rugositat, velocitat, etc.), que s'assignen a les superfícies del volum de control, són les condicions de contorn.

Aquest programa permet realitzar l'assignació de les CC a tota una superfície, a una part i inclús cel·la a cel·la. Aquesta flexibilitat permet assignar diferents condicions a diferents regions d'un mateix contorn. El conjunt de totes les condicions de contorn formen un paquet de CC, de forma que l'usuari pot tenir definits, per a un mateix volum de control diferents paquets de CC i anar utilitzant un o altre en funció del cas concret que pretengui simular. És més, és possible variar les CC al llarg del temps dins de la mateixa simulació.

### **Paràmetres computacionals**

Aquests paràmetres que governen la simulació i que poden ésser modificats pel usuari són:

- 1.- El mètode de resolució de les equacions algebraïques que descriuen el sistema fluídic i el nombre màxim de cicles de càlcul per a cada equació.
- 2.- Nombre màxim d'iteracions dins de cada interval de temps i nombre d'interval de temps a simular.
- 3.- Criteri de convergència, definit com el valor màxim que pot prendre el residu per a que en el procés de càlcul es salti al següent interval de temps.
- 4.- Continuitat global del flux màssic, si es selecciona aquesta opció, es força a que el cabal màssic en les entrades al sistema sigui igual al de les sortides. Això és aplicable en fluxs estacionaris i accelera el procés de convergència.
- 5.- Coeficients de relaxació per a accelerar o relaxar el procés de convergència del mètode numèric de resolució del sistema d'equacions. És possible definir uns valors per a les equacions de continuïtat, de quantitat de moviment, de l'energia cinètica turbulenta i un altre per a la de dissipació de  $k$ .
- 6.- Seleccionar una o dues equacions per a la correcció de la pressió.
- 7.- Model de turbulència, es disposa de dos models de turbulència, el  $k$ - $\epsilon$  i el RNG (Renormalization Group Model).
- 8.- Esquema en diferències finites, és possible seleccionar un esquema de discretització de les equacions diferencials entre cinc de possibles.
- 9.- Número de cel·la en la que es fixa l'origen de pressions.
- 10.- Cel·la en la que es monitoritzen els resultats de forma simultània.
- 11.- Forces de camp que actuen sobre el sistema.
- 12.- Fluid incompressible o compressible.
- 13.- Propietats del fluid, el programa ofereix la possibilitat d'utilitzar una sèrie de funcions d'usuari per a definir propietats del fluid.
- 14.- Hi ha una sèrie de paràmetres físics i computacionals que es poden fer variar al llarg de la simulació. Per tant, hi ha que definir l'evolució d'aquests paràmetres amb el temps.

## **MÒDUL DE RESOLUCIÓ. ANÀLISI**

Creat el model matemàtic del nostre sistema fluídic mitjançant el menú **PRE-PROCÉS**, es llença el procés de simulació. En aquest, el programa porta a terme un procés de càlcul iteratiu, resolvent les equacions del sistema en cada interval de temps. El procés de resolució de totes les equacions del sistema es diu cicle. La diferència entre la solució donada per dos cicles consecutius per a cada equació, és el residu d'aquesta. El procés saltarà al següent interval de temps, quan el residu de l'equació de continuïtat sigui menor que el criteri de convergència o quan s'arriba al nombre màxim d'iteracions. La simulació finalitza quan es cobreix el temps total de simulació o a petició del usuari. Durant aquest procés, el programa permet monitoritzar els resultats que estan obtenint-se per a una cel·la escollida per l'analista.

## **POST-PROCÉS**

Té la finalitat de permetre a l'usuari una visualització operativa dels resultats numèrics mitjançant gràfics i representacions en color. El programa ofereix tres possibilitats de visualització de resultats:

- . Representació estàtica.
- . Representació dinàmica.
- . Representació de dues dimensions.

**Representació estàtica.**- Per a un instant de temps i en un o més plànols de la geometria, la representació estàtica permet visualitzar els valors de la simulació. També el programa deixar seleccionar, calcular i visualitzar una sèrie de variables:

- . Velocitat.
- . Pressió relativa.
- . Pressió absoluta.
- . Pressió total.
- . Velocitat turbulenta.
- . Energia cinètica turbulenta.

- . Ratio de generació d'energia cinètica turbulenta.
- . Ratio de dissipació d'energia cinètica turbulenta.
- . Escala de longituds de turbulència.
- . Escala de temps de turbulència.
- . Temperatura.
- . Densitat.
- . Viscositat.

Aquests valors es poden reproduir en la pantalla com:

- . Fletxes (per a les variables vectorials). On la longitud i el color poden ésser proporcionals al mòdul o a alguna de les seves components.
- . Isolínies. On, un codi de colors representa el valor de la variable en cada isolínia.
- . Isonivells. Mostren una sèrie de nivells de diferents colors, on la intensitat del color és funció del valor de la variable.
- . Isosuperfícies. El programa busca la superfície on una variable té un valor concret.
- . Goodie. És una representació similar a la d'isonivells, però cada cel·la es pinta d'un únic color, mentre que en la representació per isonivells els colors varien de forma progressiva.

**Representació dinàmica.-** Aquesta representació, permet visualitzar la trajectòria d'una o varies partícules fent possible identificar zones on existeixi recirculació, veure les acceleracions i desacceleració del flux, etc. També és possible seleccionar una variable del flux, per a que el color de la trajectòria que descriu una partícula sigui proporcional el seu valor.

**Representació en dues dimensions.-** Permet representar el valor d'una variable, per a una sèrie de cel·les seleccionades, en funció de la distància entre aquestes cel·les. La representació es realitza mitjançant un gràfic pla amb dos eixos de coordenades.

## 2.4 FLUX POTENCIAL

### 2.4.1 Conceptes bàsics.-

Normalment els efectes viscosos queden confinats, en fluxs a elevats nombres de Reynolds, a capes límits properes a les superfícies sòlides i a regions de desprendiments i deixants, que apareixen quan hi ha un *gradient advers de pressions*. Donat que a la part frontal de quasi tots els cossos hi ha una regió de *gradients favorables* on la capa límit està adherida i és prima, pot considerar-se en aquesta regió que el flux és incompressible i no viscos, i per tant es pot tractar com un *Flux Potencial*.

L'aplicació d'aquesta teoria ens permet obtenir una primera solució vàlida d'un flux extern al voltant d'un cos, ja que existeixen un gran nombre de solucions matemàtiques disponibles, però cal anar molt en compte alhora d'aplicar-la, doncs els càlculs efectuats amb aquests tipus de fluxs són només una aproximació del flux real.

Per a dur a terme aquest estudi s'ha utilitzat un cos cilíndric (una de les geometries més estudiades) sotmès a un flux extern de direcció normal el seu eix.

### 2.4.2 Equacions.-

A continuació, en els propers subapartats es mostren les equacions que ens fan falta, tant pel flux potencial bidimensional, com pel flux potencial axisimètric.

**Flux potencial bidimensional.-** Aquests tipus de flux potencial, només ens serveix quan estem en un flux extern pla, per veure quina pot ésser l'evolució al voltant de cosos simples bidimensionals. Seguidament és representen les expressions utilitzades per descriure el moviment d'un cilindre bidimensional estacionari indefinit, en forme de taula.



**Taula 2.3: Equacions per a un flux potencial bidimensional**

$$P_M - P_\infty = \left( \frac{\gamma}{2g} \right) (C_\infty^2 - C_M^2)$$

$$K_p = \frac{\Delta P}{\left( \frac{1}{2\rho C_\infty^2} \right)} = 1 - \left( \frac{C_M^2}{C_\infty^2} \right)$$

$$C_\theta = \frac{\delta\theta}{\delta\theta} \cdot \left( \frac{1}{r} \right) = -C_\infty \sin\theta \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$C_r = \frac{\delta\phi}{\delta_r} = C_\infty \cos\theta \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\Psi = C_\infty y \left( \frac{(1-a^2)}{(x^2+y^2)} \right) = C_\infty \sin \theta \cdot \left( r - \frac{a^2}{r} \right)$$

$$\Phi = C_\infty x \left( \frac{(1+a^2)}{(x^2+y^2)} \right) = C_\infty \cos \theta \cdot \left( r + \frac{a^2}{r} \right)$$

$$P_M - P_\infty = \frac{1}{2} \left( \rho C_\infty^2 (1 - 4(\sin^2\theta)) \right)$$

Amb aquestes expressions pot determinar-se la pressió i la velocitat a qualsevol punt de la superfície del cilindre. On  $C_\infty$  i  $P_\infty$  són respectivament la velocitat i la pressió en un punt de la corrent lliure suficientment allunyat de l'obstacle, per a poder-lo considerar no pertorbat per la presència d'aquest, com aquests valors són coneguts normalment, només és necessari conèixer la velocitat d'un punt ( $C_M$ ) per a determinar el valor de la pressió ( $P_M$ ).

Fent adimensional l'expressió que reb el nom de Coeficient de Pressió " $K_p$ " i que relaciona les forces de pressió amb les inercials, val  $K_p = 1$ , als punts d'estancament, és a dir quan  $C_M = C_A = C_C = 0$ , i val  $K_p = 0$ , quan  $C_M = C_\infty$ . Aquest paràmetre és necessari per a realitzar representacions adimensionals, (per exemple entre aquest coeficient i l'angle de posició del punt de la superfície del cilindre que s'està considerant).

La següent figura (figura 2.1), ens ajudarà a entendre la nomenclatura utilitzada en les expressions, on el contorn del cilindre representa la funció de corrent  $\Psi = 0$ , i on els punts A i C són punts d'estancament i B i D els de màxima velocitat.

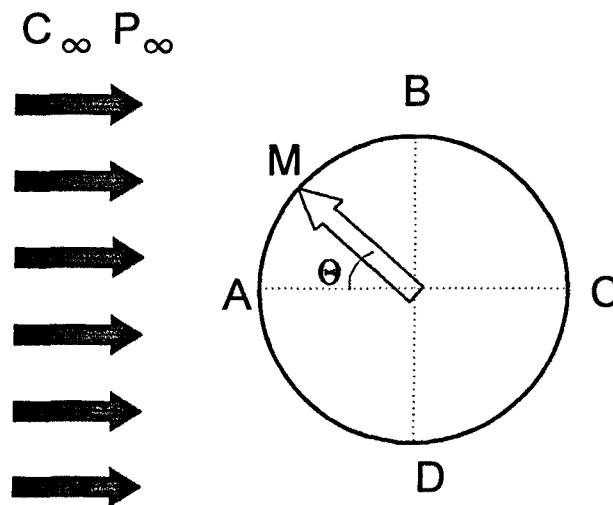


Figura 2.1: Flux al voltant d'un cilindre

De la última expressió, la distribució de pressió del flux potencial és simètrica respecte ambdós eixos, perquè no hi han esforços tangencials superficials (viscosos). A causa d'aquesta simetria, i com que la resultant de les pressions sobre el cilindre és nul·la, la força fluidodinàmica que s'exerceix sobre un cilindre circular estacionari i indefinit és també nul·la, aquest fet es conegut amb el nom de paradoxa de D'Alambert.

**Flux Potencial Axisimètric.**- Els fluxs al voltant d'edificis són un clar exemple d'un flux axisimètric, que no poden ésser descrits acceptablement per un model bidimensional, per a aquest tipus de flux es sol utilitzar la mateixa tècnica de superposició emprada per a un flux potencial pla, això fa que la manera de plantejar el problema sigui molt similar a la descrita en l'apartat anterior. Les equacions que s'obtenen pel cas d'un flux al voltant d'un cilindre circular són les mostrades a continuació, també en forma de taula.

**Taula 2.4: Equacions per a un flux potencial axisimètric**

$$P_M - P_\infty = \left(\frac{1}{2}\right) \rho C_\infty^2 \left(1 - \frac{9}{4} (\sin^2\theta)\right)$$

$$C_M = \left(\frac{3}{2}\right) C_\infty (\sin \theta)$$

$$C_\theta = - \left(\frac{1}{2}\right) C_\infty \sin \theta \left(2 + \frac{a^3}{r^3}\right)$$

$$C_r = C_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{a^3}{r^3}\right)$$

ESTUDI EXPERIMENTAL DEL RÈGIM ESTACIONARI

### CAPÍTOL III

# **ESTUDI EXPERIMENTAL RÈGIM ESTACIONARI**

### III ESTUDI EXPERIMENTAL RÈGIM ESTACIONARI

#### 3.1 INTRODUCCIÓ:

La part experimental es justifica per si mateixa, ja que és la forma intuïtivament més lògica d'aconseguir informació d'un fenomen físic complex. A més a més, aquests resultats obtinguts experimentalment ens permeten validar la informació que ens pot proporcionar la simulació numèrica o els estudis teòrics.

Alhora de dissenyar un edifici d'unes certes característiques gens corrents, és necessari conèixer exactament tots els detalls concernents al flux d'aire que es produeix al voltant d'aquest, ja que la seva forma i grandària influeix de manera important en el desenvolupament d'aquest flux. Degut a la complexitat del moviment turbulent d'un fluid com és l'aire, fa que aquest s'hagi de tractar en compte i amb una metodologia especial. Per tant no pot realitzar-se una predeterminació de tots i cadascun dels processos aerodinàmics que poden originar-se. És per tot això que s'han de dur a terme determinacions experimentals del comportament d'aquest flux al voltant d'edificis i d'estructures. Donades les poques experiències realitzades amb estructures similars, fa que aquests efectes s'hagin de determinar experimentalment en maquetes fetes a escala reduïda i provades en túnels aerodinàmics, amb unes condicions que reproduïxin al màxim els mecanismes atmosfèrics del vent, i amb els mitjans de mesura que garanteixin en tot moment la validesa de l'assaig.

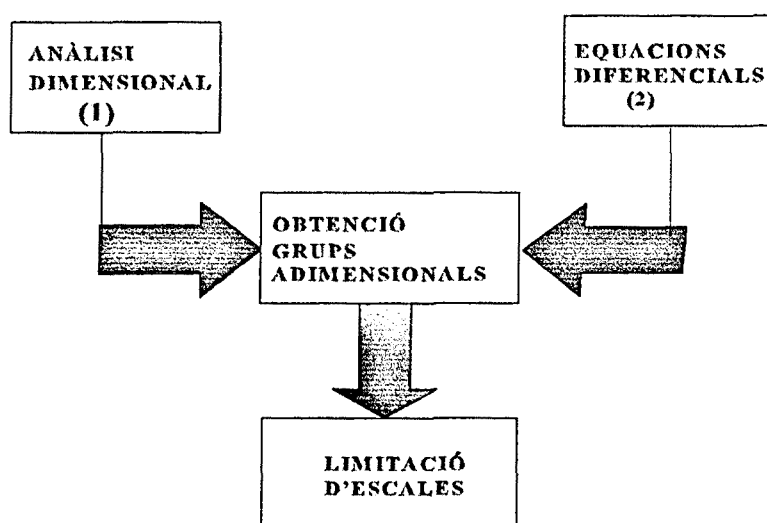
Quan es treballa amb un prototipus i amb un model reduït, és necessari respectar les lleis de semblança, perquè els assaigs realitzats amb el model donin informació aplicable al prototipus. Aquestes lleis venen donades pels nombres adimensionals que governen en cada cas un fenomen físic concret, això ens obliga a realitzar l'anàlisi dimensional corresponent.

### **3.2 ANÀLISI DIMENSIONAL I SEMBLANÇA:**

L'anàlisi dimensional ens ha de servir per a fer un assaig correcte, ja que l'estudi teòric i experimental sobre un model té per objectiu calcular les accions que pot rebre un edifici, de la mateixa manera que el prototipus, per a una determinada velocitat del vent.

Un dels criteris més establerts pel que fa referència als grups adimensionals, és el de la seva classificació d'acord amb el camp d'aplicació i intentar identificar-los amb les equacions diferencials d'on ells deriven, tot això fa necessari realitzar un estudi molt profund dels principals paràmetres adimensionals que intervenen en l'assaig a realitzar. Ara bé, apareix la dificultat de poder descriure correctament aquests fenòmens atmosfèrics, donada la complexitat de les equacions diferencials que es necessiten, i el gran nombre de condicions imposades pel model. Existeixen per tant dos camins per tal d'obtenir aquests criteris; (1) partint de l'anàlisi dimensional, (2) partint de les equacions diferencials.

**Esquema N° 3.1 : Criteris de semblança**



- (1) L'anàlisi dimensional consisteix en escriure totes les combinacions adimensionals de les variables bàsiques conegudes que apareixen en la descripció del fenomen. Té l'inconvenient que no dóna una idea molt precisa de la importància física de cadascun d'aquests.
  
- (2) El mètode d'inspecció d'equacions consisteix en escriure les equacions diferencials i adaptar-les al problema que s'estudia, escrivint-les en forma adimensional amb l'ajut d'alguns paràmetres de referència bàsics. Com a resultat final, els paràmetres adimensionals que es troben en cadascun dels termes de l'equació són els que respecten els criteris de semblança.

### **3.3 ASSAIGS EN TÚNELS DE VENT:**

Les característiques dels assaigs que es realitzen en un túnel de vent i amb una maqueta reduïda, ens porten a realitzar una sèrie de restriccions a la semblança total o completa, així com a l'elecció de l'escala més adequada per a porta a terme amb èxit aquestes proves en un túnel aerodinàmic. En els propers subapartats es poden trobar aquestes realitzacions.

#### **3.3.1 Nombres adimensionals que intervenen en aquest fenomen.-**

Hi han molts paràmetres adimensionals que intervenen en l'àrea de la Mecànica de Fluids, però en el cas presentat les forces més predominants són les d'inèrcia, gravetat, viscositat i elasticitat, i no necessàriament de forma simultània. A continuació es passa a determinar aquells més característics, utilitzant els mètodes esmentats en l'apartat 3.2.

**(1) Partint de l'anàlisi dimensional.-** Si es volgués aplicar l'estudi de l'anàlisi dimensional a un cos submergit dins d'un flux extern i determinar els coeficients i els nombres adimensionals que intervenen, primer s'hauria d'analitzar intuïtivament quins poden ésser les magnituds físiques que poden definir el problema, en el nostre cas es podrien triar:

- . Propietats del fluid; densitat ( $\rho$ ), viscositat dinàmica o cinemàtica ( $\mu$  ò  $\nu$ ), calor específica a pressió i a volum constant ( $c_p$  i  $c_v$ ) i la constant de l'aire ( $R$ ).
- . Paràmetres com, la velocitat de l'aire ( $c$ ) i la freqüència de vibració de la velocitat degut al règim turbulent ( $f$ ), freqüència de tots els cicles de vòrtex Shedding ( $f_s$ ).
- . El paràmetre de Coriolis ( $f_c$ ) que depèn de la latitud en la que s'edificarà l'estructura.
- . Geometria del sistema; la relació entre les diferents longituds de l'edifici ( $L$ ) i l'alçada respecte el terra ( $z$ ) de qualsevol punt del camp fluídic.
- . Temperatura de l'aire ( $\Theta$ ).
- . La força que l'aire exerceix sobre l'obstacle ( $F$ ).



Estudi experimental règim estacionari

Donat la gran quantitat de variables que poden intervenir en aquest fenomen, s'ha d'arribar a un equilibri per d'aquesta manera trobar aquells paràmetres més representatius, per aquest motiu, en un principi només s'han escollit els 10 següents:

$$f(F, c, \rho, L, P, v, R, \Theta, f, f_s) = 0$$

Construint la matriu dimensional, es pot veure que és d'ordre 4

	M	L	T	$\Theta$	DIMENSIONS		
F	1	1	-2	0	M	L	$T^{-2}$
c	0	1	-1	0		L	$T^{-1}$
$\rho$	1	-3	0	0	M	$L^{-3}$	
L	0	1	0	0		L	
P	1	-1	-2	0	M	$L^{-1}$	$T^{-2}$
$\Theta$	0	0	0	1			$\Theta$
R	0	2	-2	-1		$L^2$	$T^{-2}$ $\Theta^{-1}$
v	0	2	-1	0		$L^2$	$T^{-1}$
$f, f_s$	0	0	-1	0			$T^{-1}$

El nombre de paràmetres adimensionals que apareixen és de:  $\pi_i = 10 - 4 = 6$ , i estaran formades per les 6 equacions següents:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \rho^{x_1} \cdot c^{y_1} \cdot L^{z_1} \cdot \Theta^{k_1} \cdot F \\ \pi_2 &= \rho^{x_2} \cdot c^{y_2} \cdot L^{z_2} \cdot \Theta^{k_2} \cdot v \\ \pi_3 &= \rho^{x_3} \cdot c^{y_3} \cdot L^{z_3} \cdot \Theta^{k_3} \cdot P \\ \pi_4 &= \rho^{x_4} \cdot c^{y_4} \cdot L^{z_4} \cdot \Theta^{k_4} \cdot R \\ \pi_5 &= \rho^{x_5} \cdot c^{y_5} \cdot L^{z_5} \cdot \Theta^{k_5} \cdot f \\ \pi_6 &= \rho^{x_6} \cdot c^{y_6} \cdot L^{z_6} \cdot \Theta^{k_6} \cdot f_s \end{aligned}$$

Desenvolupant completament totes les equacions mitjançant les seves dimensions s'obténn els següents sis paràmetres:

$$\pi_1 = F/\rho \cdot c^2 \cdot L^2$$

$$\pi_2 = v/c \cdot L = 1/Re$$

$$\pi_3 = P/\rho \cdot c^2 = Eu$$

$$\pi_4 = R \cdot \Theta/c^2 = 1/M^2$$

$$\pi_5 = f \cdot L/c = 1/Ro$$

$$\pi_6 = f_s \cdot L/c = St$$

El primer és l'anomenat coeficient de força. D'aquest es poden determinar els factors de forma que depenen del nombre de Reynolds (Re) per a velocitats baixes i mitjana, i es fan independents d'aquest paràmetre per a velocitats elevades. Així mateix per a velocitats molt elevades depenen d'un altre nombre adimensional, el de Mach (M) i que en canvi per a velocitats baixes la seva influència es insignificant.

El segon paràmetre adimensional obtingut és l'invers del nombre de Reynolds (Re).

El tercer és el nombre d'Euler, i d'ell pot obtenir-se el coeficient de pressió:

$$K_p = (P - P_0) / \rho \cdot c_0^2 / 2$$

On  $P_0$  i  $c_0$  són valors de referència

El quart paràmetre ens defineix l'invers del quadrat del nombre adimensional de Mach (M).

El cinquè d'aquests paràmetres adimensionals és el nombre adimensional de Rossby.

L'últim d'aquests paràmetres adimensionals té les mateixes característiques que l'anterior i se nomena Strouhal.

**(2) Partint de les equacions diferencials.-** Ara es determinaran quins són els paràmetres que més s'adapten al cas presentat, partint de les equacions diferencials per a l'estudi de la capa límit.

$$U \cdot \frac{\delta U}{\delta x} + V \cdot \frac{\delta V}{\delta y} + W \cdot \frac{\delta W}{\delta z} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} - f_c \cdot V - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta \tau_u}{\delta z} = 0$$

on U, V i W són les components de la velocitat en les direccions x, y i z respectivament;  $\tau_u$  l'esforç tallant i val:

$$\tau_u = \mu \cdot \frac{\delta U}{\delta z} + P \cdot (-\overline{uw})$$

On, u i w són les components de la velocitat de fluctuació en les direccions x i z; i  $f_c$  el paràmetre de l'acceleració de Coriolis. Derivant respecte al temps les variables s'obté:

$$U' = U/U_0 ; V' = V/U_0 ; W' = W/U_0$$

$$u' = u/U_0 \quad w' = w/U_0$$

$$P' = P/\rho \cdot U_0^2$$

$$x' = x/L_0 ; y' = y/L_0 ; z' = z/L_0$$

on  $U_0$  i  $L_0$  són la velocitat i la longitud de referència respectivament, queda per tant:

$$U' \cdot \frac{\delta U'}{\delta x'} + V' \cdot \frac{\delta U'}{\delta y'} + W' \cdot \frac{\delta U'}{\delta z'} + \frac{\delta P'}{\delta x'} - \frac{L_0 \cdot f_c \cdot C \cdot V'}{U_0} - \frac{v}{U_0 \cdot L_0} \cdot \frac{\delta^2 U'}{\delta z'^2} - \frac{\overline{u'w'}}{\delta x'} = 0$$

Si es consideren els termes  $L_0 \cdot f_c \cdot C \cdot V' / U_0$  i el  $v / U_0 \cdot L_0$ , es veu que precisament són els inversos dels nombres adimensionals de Rossby (Ro) o el que es el mateix el de Strouhal (St) i de Reynolds (Re) respectivament, tal com ja s'ha vist a l'apartat anterior d'anàlisi dimensional.

La semblança s'aconsegueix si les quantitats  $u'(z')$  i  $U'(z')$  i així successivament totes, són les mateixes, és a dir que es compleixi:

$$[Re]_{\text{model}} = [Re]_{\text{prototipus}}$$

$$[Ro]_{\text{model}} = [Ro]_{\text{prototipus}}$$

Cal dir que per a l'estudi en un túnel de vent d'un model a escala reduïda, és necessari que els nombres de Reynolds (Re) i el de Rossby (Ro) es compleixin en ambdós fluxs, tal com diuen E.Simiu, R.H.Scalan. Però també cal tenir en compte els coeficients: sustentació ( $C_L$ ), resistència a l'avanç ( $C_D$ ) i pressió ( $C_p$ ).

**3.3.2 Impossibilitat de poder mantenir la igualtat de tots els nombres adimensionals.-**

No sempre és possible fer que tots els paràmetres adimensionals obtinguts siguin iguals al mateix temps, però els principis de l'anàlisi dimensional i de la semblança porten a respectar si més no, un cert nombre d'aquests paràmetres, ja que freqüentment solament una part d'aquests paràmetres són importants per tal de caracteritzar els aspectes més peculiars del fenomen estudiat. En aquestes situacions, s'han de fer algunes concessions, intentant per això que es produeixin en la majoria dels casos una suficient similitud, per tal de fer el mètode escollit vàlid.

Així, el nombre de Reynolds ( $Re$ ) no pot ésser simulat correctament, ja que l'aire que s'utilitza en el laboratori en les proves efectuades en un túnel de vent té la mateixa viscositat cinemàtica que el de l'atmosfera i en substituir-ho a l'expressió de Reynolds entre model i prototipus queda:

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{c_m L_m}{\nu} = \frac{c_p L_p}{\nu}$$

$$\frac{c_m}{c_p} = \frac{L_p}{L_m}$$

On els subíndexs m i p fan referència el model i el prototipus respectivament.

Tal com pot apreciar-se, queda imposada una limitació entre velocitats i longituds, per tant aquest nombre de Reynolds ha d'ésser pres dins d'una consideració especial. Una altra consideració important és fer els cossos en moltes arestes, ja que el flux es veu obligat a separar-se i com que la naturalesa del flux a la zona de separació és independent del nombre de Reynolds, s'assumeix per aquesta raó que tots els fluxs al voltant de cossos punxeguts són independents d'aquest paràmetre adimensional.

Per tant, pot assegurar-se que en un moviment turbulent, existeix una feble dependència d'aquest nombre de Reynolds. Quelcom semblant passa amb al nombre de Rossby ( $R_o$ ) que en el cas particular de l'estudi d'edificis no és necessari que s'observi la similitud entre model i prototipus, ja que :

$$R_o = \frac{c(h)}{h \cdot f_c}$$

$$\begin{aligned} \delta &\approx 0,25 \cdot (c \cdot / f_c) ; & \text{essent} & & c \cdot &= c(h) / 2,5 \cdot \ln(h/z_o) \\ \delta &= \Gamma \cdot R_o ; & \text{essent} & & \Gamma &= 0,25 \cdot h / 2,5 \cdot \ln(h/z_o) \end{aligned}$$

- c(h) Velocitat del vent a una alçada h
- $z_o$  Rugositat
- $\delta$  Gruix de la capa límit
- c. Velocitat de fricció

S'observa que el gruix de la capa límit ( $\delta$ ), és funció de la velocitat del vent i per tant del nombre de Rossby, doncs s'ha trobat l'expressió que els relaciona. Ara bé, la regió d'interès per a un dissenyador d'estructures, és d'uns pocs centenars de metres de la capa límit atmosfèrica, mentre que el gruix d'aquesta pot ésser d'uns quants quilòmetres. És per això que en el cas presentat no té molta importància que no s'acompleixi la similitud d'aquest nombre adimensional.

### *Estudi experimental règim estacionari*

---

Quant el nombre de Mach ( $M$ ), a la velocitat que es treballa no té cap tipus d'importància, doncs estem treballant a un nombre de Mach molt baix (velocitat subsònica).

### **3.3.3 Escales més adequades d'utilització en proves en túnels de vent.-**

Aquestes situacions anòmals que s'ha vist a l'apartat anterior, de no satisfer totes les condicions d'igualtat dels nombres adimensionals, no implica necessàriament que les característiques del flux desenvolupades en el túnel de vent siguin inacceptables per a les proves proposades. Haguda compta que l'única manera de complir totes aquestes condicions, és treballar a una escala de 1:1, la qual cosa és impossible en el cas d'un edifici, es fa necessari limitar els valors de les escales.

A l'hora d'ajustar les característiques turbulentes, és sol utilitzar en els models escales de longituds grans, de l'ordre de 1:1000, ja que una escala gran de turbulència juga un paper important en la simulació del perfil de velocitats, així mateix l'espectre longitudinal i transversal per a l'estudi dinàmic han de semblar-se tant en el model com en la realitat perquè es pugui reproduir l'experiment amb tota fidelitat. Així, en el cas concret d'un cilindre circular, s'ha demostrat [24] que per a nombres de Reynolds inferiors a  $10^5$  els resultats obtinguts poden resultar inadequats, i això és veritat tant per a la simulació d'un model a escala d'un cos gran com per a un a escala petita.

Per a la simulació en túnels de vent, l'elecció de les escales de longitud i de velocitat, ve determinada per un cert compromís entre dues necessitats extremes. Per una part és necessari reproduir completament el gruix de la capa límit atmosfèrica, que vindrà limitat per l'alçada de la cambra d'assaig del túnel de vent, i per tant son necessàries escales de simulació petites. D'altre banda, en el model ja s'ha vist que el nombre de Reynolds ha d'ésser tan gran com sigui possible, com a mínim  $Re = 10^5$ , i degut a la baixa velocitat d'assaig de la majoria dels túnels corrents, són necessàries escales grans.

Diferents autors han arribat a establir aquest compromís d'escales, així segons B.J.Vickery [40] i T. Stathopoulos [36] el límit d'escales per a grans edificis pot estar al voltant dels 1:400 la de longitud i de 1:10 la de velocitats. Per a una altra banda, segons E.Simiu i



R.H.Scalan [33], un valor típic de l'escala geomètrica al laboratori per a realitzar proves d'edificis és de 1:100 a 1:500 la de longitud i la de velocitats té que està compresa entre 1:5 i 1:10. Essent la velocitat mínima recomanada d'uns 10 m/s. Segons J.A.Hertig [18] l'escala més apropiada de longitud ha d'ésser compresa entre 1:50 i 1:300. A manera de resum, és construeix la següent taula:

**TAULA N° 3.1: Límits d'escapes de longitud i de velocitats per a diferents autors.**

<b>AUTOR:</b>	<b>ESCALES DE LONGITUDS:</b>	<b>ESCALES DE VELOCITATS:</b>
B.J.VICKERY T. STATHOPOULOS	1/400	1/10
E.SIMIU	1/100 - 1/500	1/5 - 1/10
R.H.SCALAN	1/100 - 1/500	1/5 - 1/10
J.A.HERTIG	1/50 - 1/300	-----

Donat les dimensions de la cambra d'assaig utilitzada, i les diferents escapes que suggereixen aquests autors, les de 1/50 a 1/100 són molt petites i donen lloc a maquetes excessivament grans. També, per raons constructives s'ha desestimat l'escala de 1/500, ja que donen lloc a maquetes excessivament petites, que tenen el desavantatge alhora de col·locar els sensors corresponents per a mesurar les pressions, les velocitats o els espectres, entre les dimensions relatives d'aquests enfront la maqueta. Per tant l'experimentació s'ha realitzat amb una escala de longitud de 1/300, que no presenta els inconvenients abans esmentats.

### **3.4 DESCRIPCIÓ DEL BANC D'ASSAIG:**

Bàsicament el banc d'assaig utilitzat en aquesta part del treball, està format per un túnel de vent, les maquetes i els elements necessaris per a mesurar pressions i velocitats.

#### **3.4.1 Túnel de vent.-**

Els túnels de vent són eines pensades per a reproduir i analitzar fenòmens físics en els que apareix un corrent d'aire amb unes condicions concretes. L'interès dels estudis que es poden efectuar poden centrar-se, tant en l'anàlisi de la pròpia corrent d'aire, com en la interacció amb un obstacle. És per tant que aquests, són essencials per a l'assaig de models i per a la investigació bàsica en certes indústries com les aeronàutiques, les navals o les d'automoció. També són importants per a determinar les càrregues del vent i les vibracions en les estructures, estudiar certs problemes meteorològics, o veure la interacció entre el vent i la superfície de l'aigua.

Aquests assaigs efectuats en túnels aerodinàmics han de garantir les condicions requerides per l'experiment, concretament aquest tipus de proves són les més apropiades per a l'assaig al laboratori de les càrregues produïdes pel vent per a nombres de Reynolds elevats, ja que permeten la determinació de pressions, velocitats i esforços per tal de veure el comportament enfront de l'acció del vent d'edificis i estructures sensibles. A més a més, permeten trobar quines són les velocitats més acceptables dins de les ciutats, les càrregues adverses induïdes per edificis adjacents i l'estudi del flux del vent a la base i el sostre d'aquests.

Quant a les característiques constructives més notables es poden distingir entre els de vena tancada o oberta, segons la cambra d'assaig sigui oberta o tancada, i entre circuit tancat o obert, que fa referència a la recirculació o no de l'aire impulsat pel ventilador.

**Components d'un túnel de vent.**- Els elements en que està dividit un túnel de vent poden ésser molt variats depenen de la utilització que se li vulgui donar. En aquest punt únicament es pretén comentar els més importants i que apareixen en la major part dels casos.

L'element responsable de generar el corrent d'aire és el ventilador, que pot ésser d'aspiració o d'impulsió. Controlant la velocitat de gir d'aquest element es controla el cabal d'aire impulsat.

La cambra d'assaig és la zona més important del túnel. En ella el flux d'aire ha de tenir les característiques (perfil de velocitats i nivells de turbulència) necessàries per a modelitzar correctament el sistema que es pretén estudiar. I és la zona on es col·loca la maqueta a estudiar.

Per a aconseguir les condicions adequades de l'assaig, es col·loca abans de la cambra d'assaig una zona de condicionament del flux, que generalment està formada per una sèrie de malles tranquilitzadors del flux en forma de bresca d'abella (per a aconseguir turbulència isòtropa i amb escales de longitud petites).

Abans d'aquesta cambra es produeix una reducció gradual de la secció nomenada *efusor* per a augmentar la velocitat, reduir el gruix de la capa límit en la cambra d'assaig, i evitar la formació de remolins. Per últim, a la sortida de la zona d'assaig es col·loca un *difusor* per a transformar l'energia cinètica en energia de pressió, d'aquesta manera el ventilador no necessita produir una potència tant important per a mantenir la velocitat de la vena fluida.

**Característiques del túnel de vent utilitzat.**- Per a la presa de dades experimentals s'ha utilitzat un túnel de vent de construcció tubular metàl·lica de vena i circuit tancat, de baixa velocitat i nivell de turbulència. Cambra d'assaig oval (veure la figura 3.1) de dimensions 0,69x0,47x1,1 m.

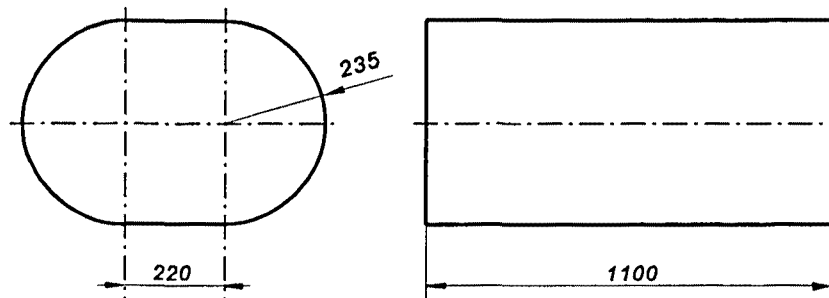


Figura 3:1: Esquema de la cambra d'assaig del túnel

Aquest túnel està equipat amb varies zones de tranquil·litació del flux, un efusor amb un angle de contracció de  $16^\circ$  i una longitud de 1,625 m, un difusor amb un angle d'expansió de  $6^\circ$  i una longitud de 4,5 m.

El corrent d'aire es genera mitjançant un ventilador d'impulsió de 10 pales i 8 àleps directrius accionat per un acoblament bomba-motor oleohidràulic, on la seva missió és la de permetre la regulació de la velocitat de gir del ventilador. Un motor elèctric de 25 CV a 1500 rpm és l'encarregat de l'accionament de l'esmentada bomba oleohidràulica. A més a més disposa d'un sistema de regulació de cabal per a aconseguir la velocitat desitjada, així com dels elements de regulació i control per a garantir un funcionament correcte.

La velocitat màxima de l'aire que el ventilador és capaç de proporcionar en la cambra d'assaig és de 60 m/s (sense cap tipus d'obstacle), no obstant, les condicions de treball a aquesta velocitat no són les més adequades per a l'estudi de l'acció del vent sobre edificis. Les velocitats òptimes de treball estan compreses entre 10 i 20 m/s

### **3.4.2 Maquetes.-**

Per a conèixer els efectes que produeixen els corrents d'aire sobre els edificis, tradicionalment s'ha recorregut a l'experimentació. A l'hora de plantejar aquesta experimentació apareix la impossibilitat de construir maquetes a escala real i realitzar assaigs sobre elles. Per tant no queda més remei que treballar amb maquetes a escala reduïda i mitjançant les lleis de semblança, extrapolar els resultats experimentals obtinguts amb la maqueta a l'edifici real.

Per a portar a terme aquesta feina, s'ha construït una maqueta rígida, prismàtica de base octogonal, que ens permet estudiar els efectes estàtics i dinàmics de l'aire sobre l'estructura. Així mateix, s'ha construït una maqueta cilíndrica de les mateixes dimensions i en una distribució de presses de pressions idèntica a la de la maqueta octogonal per tal de caracteritzar el túnel.

**Dimensions de l'edifici i de la maqueta.-** Per a aquest treball s'ha escollit un edifici prismàtic regular de base octogonal, amb una alçada de 84 m i una distància entre cares paral·leles a la base octogonal de 38,4 m.

Partint de les dimensions reals de l'edifici s'ha de seleccionar les dimensions de la maqueta per als assaigs en el túnel de vent. Per a aquest motiu s'ha realitzat l'anàlisi dimensional que ens ha donat les lleis d'escala entre model i prototipus, adoptant-se solucions basades en l'experiència de diferents autors com: Davenport i Vickery [14]. Del que ja s'ha vist en el subapartat 3.3.3, l'escala escollida és de 1/300; per tant, l'alçada de la maqueta és de 0,280 m i la distància entre cares paral·leles de la base octogonal és de 0,128 m.

A la taula següent pot apreciar-se els valors que haurien de tenir les maquetes en metres per a cadascuna de les escales.

**TAULA N° 3.2: Dimensions de les maquetes per a diferents escales.**

ESCALES	1/50	1/100	1/300	1/500
ALÇADA H	1,68	0,84	0,280	0,168
AMPLADA D	0,768	0,384	0,128	0,0768

Per a l'escala de 1/300, les dimensions reals de l'edifici, són les esmentades a la taula.

**TAULA N° 3.3: Dimensions reals i de les maquetes, per a l'escala escollida.**

	Edifici real PROTOTIPUS (m)	Edifici d'assaig MODEL (m)
ALÇADA	H = 84,0	H' = 0,280
AMPLADA	D = 38,4	D' = 0,128

**Factor d'obstrucció de la maqueta dins el túnel de vent.-** Segons la teoria de l'obstrucció, el flux que circula per la cambra d'assaig del túnel de vent, es veu obligat a passar per un estretament degut a la presència de la maqueta, la qual cosa pot modificar els efectes del fluid sobre l'edifici. El factor d'obstrucció ( $\beta$ ) es defineix com el quocient entre la distància del sostre de la maqueta al sostre de la cambra d'assaig i l'altura de la cambra d'assaig, i en el nostre cas val:

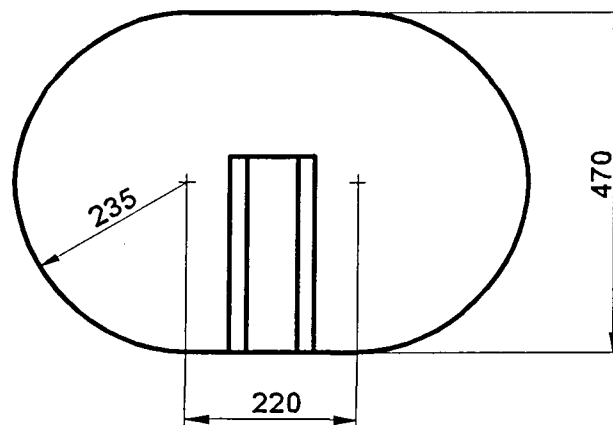
$$\beta = \frac{0,19}{0,47} = 0,4$$

Degut a que estem tracten un problema clarament tridimensional, sembla més raonable utilitzar un factor d'obstrucció superficial (secció perpendicular a la direcció del vent), i d'un altre factor d'obstrucció volumètric, que no pas d'un únic ( $\beta$ ) funció d'una dimensió.

**Factor d'obstrucció superficial, definit com:**

$$O_s = \frac{S - S_m}{S} = \frac{0,2769 - 0,03584}{0,2769} = 0,8706 \text{ (87,06\%)}$$

On  $S$  és la superfície de la cambra d'assaig perpendicular al flux d'aire i  $S_m$  és la superfície de la projecció de la maqueta en el pla perpendicular al flux d'aire. Aquest valor ens està dient que l'àrea de pas de l'aire quan es troba amb la maqueta és del 87,06% de l'àrea de pas abans i després de l'obstacle (veure figura 3.2).



**Figura 3.2: Secció transversal de la cambra d'assaig del túnel amb la maqueta en el seu interior.**

**Factor d'obstrucció volumètric, definit com:**

$$O_v = \frac{V - V_m}{V} = \frac{0,30459 - 0,0144}{0,30459} = 0,9527 \text{ (95,27\%)}$$

On  $V$  és el volum útil de la cambra d'assaig i  $V_m$  és el volum de la maqueta. Aquest valor del 95,27 % ens indica el volum de pas que té el fluid en la cambra d'assaig.

La forma de l'entrada de la cambra d'assaig d'aquest túnel aerodinàmic, està dissenyada per que es produeixi un increment continuat i proporcional de la velocitat. La relació de contracció a l'entrada s'ha trobat en determinar la secció de la cambra d'assaig i la secció abans de la contracció.

**Factor de contracció, definit com:**

$$C_c = \frac{S}{S_{ac}} = \frac{0,27}{1,34}$$

On  $S_{ac}$  és la secció abans de la contracció i  $S$  és la secció de la cambra d'assaig. Aquest resultat representa una contracció de 5/1

**Taula 3.4: Factors d'obstrucció i de contracció**

$\beta$	$O_s$ (%)	$O_v$ (%)	$C_c$
0,4	87,06	95,27	5/1



**Característiques constructives de la maqueta estàtica.**- Els esforços estàtics sobre una estructura és determinen utilitzant una maqueta rígida que ha d'ésser semblant geomètricament al prototipus.

La maqueta octogonal està constituïda per un esquelet octogonal fabricat amb fusta de 9 mm de gruix i folrada amb planxes de fusta per a donar-li un bon acabat superficial. Per a donar consistència a aquest conjunt, format per les presses de pressió i el cos octogonal, es va omplanar de ciment (tot el conjunt té un pes de 2,3 Kg). Aquesta massa dóna rigidesa a la maqueta i al mateix temps ens anirà molt bé quan col·loquem els acceleròmetres per a realitzar les proves dinàmiques.

Amb l'objecte de mesurar la pressió en la superfície de la maqueta s'han instal·lat unes sondes de pressió (cànules metàl·liques). Cada pressa de pressió està formada per una d'aquestes cànules de diàmetre exterior 1,5 mm aproximadament, totes elles connectades a un orifici practicat perpendicularment a la superfície exterior de la maqueta. Tots els tubs baixen pel centra de l'interior de l'edifici i surten a l'exterior per la base a través d'un tub d'acer de 12 mm de diàmetre exterior i una alçada de 95 mm, solidari a la maqueta i s'ha utilitzarà per a subjectar-la mitjançant un cargol a la base de la cambra d'assaig del túnel. tal com pot apreciar-se en la figura 3.3.

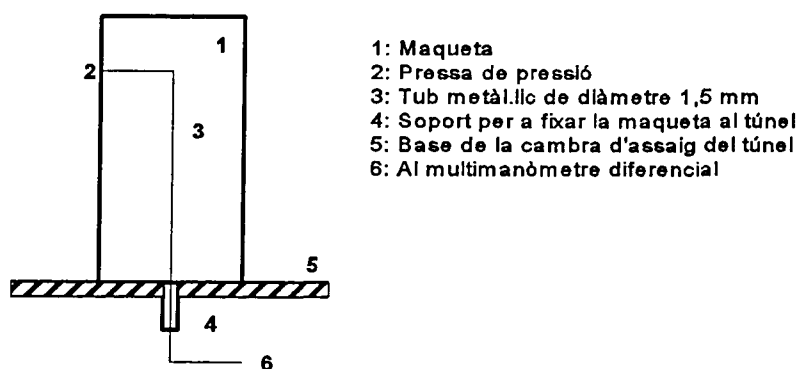


Figura 3.3: Esquema de les sondes de pressió

Aquestes cànules metàl·liques van connectades a uns micro-tubs de plàstic flexible de 2 mm de diàmetre exterior i 1,5 mm d'interior. La utilització de tubs de plàstic es degut principalment a que presenten l'avantatge d'ésser barats i que no produeixen distorsió als senyals elèctrics. Aquests tubs s'acoblen a un multimanòmetre per a visualitzar i llegir els valors de les pressions durant els assaigs. Cap dels acoblaments efectuats entre els diferents tubs permet cap tipus de fuga ni d'entrada d'aire en els tubs.

Per a encastar les sondes i proporcionar consistència al muntatge, donat que inicialment es pensava treballar a velocitats més elevades, es van fer dues construccions concèntriques, una primera octogonal exterior de fusta, tal com ja s'ha comentat, i una segona de secció quadrada a l'interior. Les sondes travessen ambdues parets, d'aquesta manera s'aconsegueix la fixació d'aquestes cànules, a continuació es va omplir l'espai interior dels dos cossos amb ciment molt líquid, per a donar consistència i subjectar les cànules

S'han col·locat presses de pressió en una de les cares de l'octògon i en el sostre del mateix. Girant la maqueta respecte a la direcció del vent es poden mesurar les pressions en totes les cares de l'edifici. En la figura 3.4 es veuen les posicions de les sondes en una de les cares i en el sostre de l'octògon.

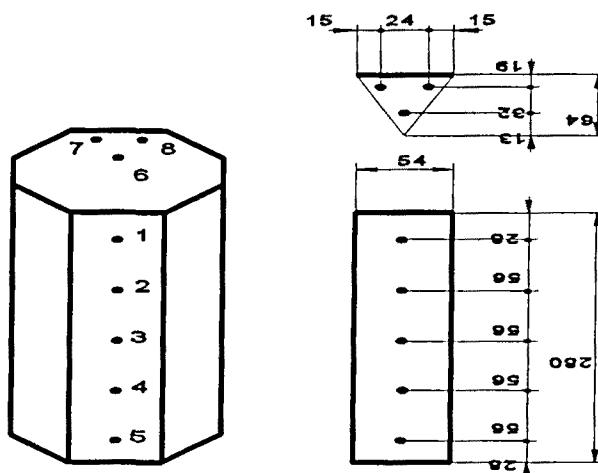


Figura 3.4: Posició de les presses de pressió

**Característiques constructives de la maqueta dinàmica.**- Els esforços dinàmics sobre una estructura és determinen utilitzen una maqueta rígida semblant geomètricament al prototipus i amb una subjecció flexible a la base de la cambra d'assaig del túnel si es volen determinar autoexcitacions. Per l'estudi dinàmic s'ha utilitzat la mateixa maqueta que per l'anàlisi estàtic, però modificant-la per convertir-la en més flexible i poder d'aquesta manera visualitzar els efectes d'autoexcitació.

En aquest tipus de maqueta més flexible s'han eliminat el tub d'acer que servia per a subjectar-la a la cambra d'assaig del túnel, així com les cànules metàl·liques que s'utilitzaban per a la mesura de les pressions. A més a més, se li ha acoblat una molla d'acer inoxidable a la base de la maqueta per fer-la flexible, en les següents característiques:

- diàmetre: 50 mm,
- distància entre plans: 50 mm,
- diàmetre del fil: 6 mm,
- separació de les espires: 12 mm.
- constant de la molla: 28019 N/m

La molla s'ha subjectat a la base de l'edifici i a la molla mitjançant brides amb un disc de 100 mm de diàmetre, sol·lidari d'un eix de 22 mm de diàmetre, el qual permet ésser subjectat a l'estructura del túnel de vent. Tal com pot apreciar-se a la figura 3.5.

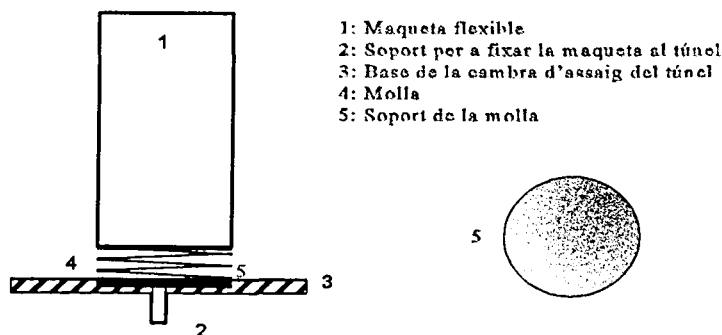


Figura 3.5: Maqueta flexible

### **3.5 DESCRIPCIÓ DELS ELEMENTS EXPERIMENTALS DE MESURA:**

Moltes vegades les condicions experimentals necessàries son contradictòries per a cadascuna dels assaigs que efectuem. Així per exemple, si s'intenta reproduir per simulació les forces ascensionals tindrà que reduir-se la velocitat del flux; en cas contrari si hom vol simular unes condicions turbulents, necessitarà una velocitat més elevada. Conseqüentment allò que s'ha de fer, és veure quin és el comportament real que és vol reproduir en la simulació durant l'experiment en un túnel de vent i necessàriament, com avaluar aquestes diferències, amb la instrumentació adequada.

Les variables que es mesuren en el laboratori i els mitjans de que es disposa per a realitzar l'assaig en un flux estacionari s'exposen a continuació.

#### **3.5.1 Mesura de la velocitat.-**

S'han utilitzat dos equips ben diferenciats per a la mesura de les velocitats d'aire en el laboratori. Aquests equips són:

- . Sonda de Prandtl.
- . Anemòmetria.

**Sonda de Prandtl.**- La sonda de Prandtl mesura la diferència entre la pressió total (pressió dinàmica més pressió estàtica) i la pressió estàtica en un punt d'un corrent fluida. És a dir, dóna la pressió dinàmica, partint de la qual es calcula la velocitat del fluid mitjançant l'expressió:

$$c = C \sqrt{2gh \left( \frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)}$$

On  $c$  és la velocitat del fluid,  $h$  l'altura que marca el manòmetre diferencial connectat a les dues presses de pressió de la sonda,  $\rho_m$  és la densitat del fluid manomètric,  $\rho$  la densitat del fluid que s'està estudiant i  $C$  és el coeficient de calibratge de la sonda.

La sonda de Prandtl, pot semblar un aparell senzill, on no hi han complicats mecanismes ni dispositius electrònics, però ofereix una gran simplicitat d'us i una elevada fiabilitat. Per tot això és l'instrument ideal per a mesurar el valor mitjà de la velocitat en un punt en concret, quan es coneix la direcció de la velocitat, i no és treballa a unes velocitats molt petites ja que la seva sensibilitat pot disminuir dràsticament.

Per ésser un element molt conegut dins el camp de la mecànica de fluids és innecessari donar detalls sobre el seu principi de funcionament i aspecte físic.

**Anemometria**.- Es coneix per anemometria, el conjunt de tècniques experimentals dissenyades per a mesurar el camp instantani de velocitat dins d'un fluid en moviment. Els fonaments físics d'aquests diferents procediments de mesura utilitzades, permet classificar els mètodes anemomètrics en tres grans famílies:

- 1) La de fil calent HWA (Hot-Wire Anemometry).
- 2) La de pel·lícula calent HFA (Hot-Film Anemometry).
- 3) La làser Doppler LDA (Laser-Doppler Anemometry).

Qualsevol d'aquestes tres grans famílies tenen unes excel·lents característiques per a l'estudi experimental de les magnituds locals d'un flux turbulent, ja que; poden seguir fenòmens variables molt ràpidament en el temps; les famílies 1) i 2) ocupen un espai reduït, no aportant més que petites pertorbacions al moviment ja existent en el fluid; i són molt sensibles a les variacions de certes magnituds, com per exemple la velocitat.

**Principi de funcionament dels anemòmetres HWA:** L'anemometria de fil calent és bàsicament un sensor (transductor tèrmic), el funcionament del qual es basa en el refredament que produeix el flux el passar sobre un petit filament escalfat per un corrent elèctric. En el moment que la velocitat del flux canvia, la transferència d'escalfor des del fil al flux també ho fa, desequilibrant el balanç tèrmic. Com que el filament està constituït per un material de resistència variable amb la temperatura, es poden relacionar les variacions d'aquesta resistència o bé de voltatge, que són necessàries aplicar per tal de restituir el seu valor original, quan s'han produït variacions amb la velocitat.

**Principi de funcionament dels anemòmetres HFA:** L'anemometria de pel·lícula calent és una tècnica utilitzada per a mesurar la velocitat instantània en un punt d'un fluid en moviment. El principi de funcionament es basa en el refredament produït per un flux que passa el voltant d'un cilindre escalfat per un corrent elèctric. Aquest refredament està relacionat amb la velocitat del fluid i per tant, és possible quantificar-la.

Existeixen dues tècniques bàsiques per a mesurar l'efecte anteriorment esmentada i que són:

. **Anemòmetre de corrent constant (ACC):** amb aquesta tècnica el corrent pel sensor es manté essencialment constant connectant una resistència molt gran en sèrie amb el filament de la sonda. Si la transferència de calor entre el fluid i la sonda creix (augment de la velocitat del fluid), la sonda tendeix a refredar-se, produint una disminució de la seva resistència. Amb un corrent ct. una disminució de la resistència provoca una variació de la tensió en els borns del filament. Les tensions s'amplifiquen i a partir d'elles s'obtenen les velocitats.

Aquest sistema no és recomanable en fluxs on existeixen ràpids canvis de la velocitat i si quan les fluctuacions de la velocitat són petites enfront a la velocitat mitjana del flux.

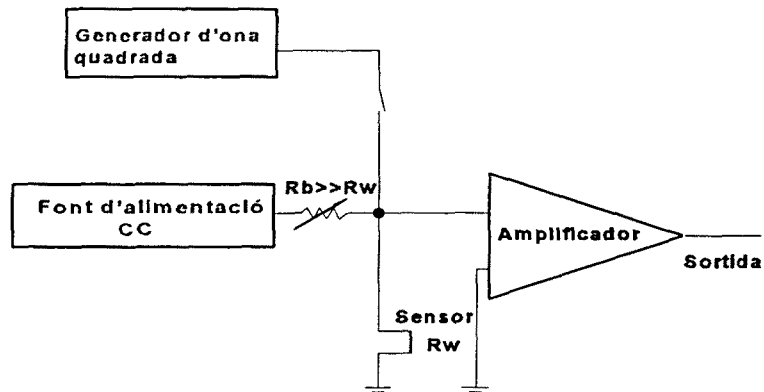


Figura 3.6: Esquema d'un sistema anemomètric de corrent constant

**Anemòmetre de temperatura constant (ATC):** Aquest sistema manté la temperatura de la sonda constant mitjançant un circuit realimentat que compensa els efectes de refredament produïts pel fluid, l'augmentar la velocitat del fluid la sonda es refreda, per la qual cosa el circuit respon augmentant la intensitat de corrent, per aquest motiu es fa necessari augmentar la tensió, que és amplificada i mesurada.

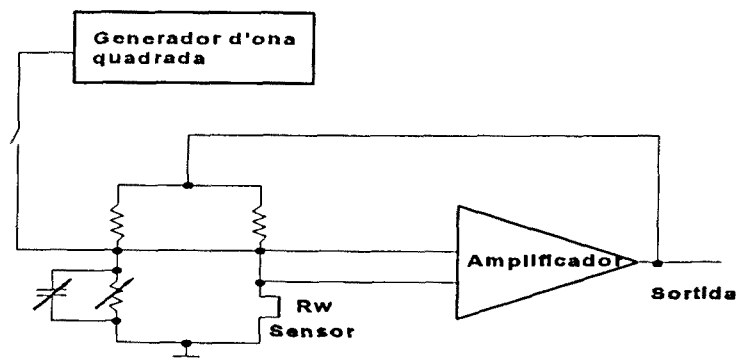


Figura 3.7: Esquema d'un sistema anemomètric de temperatura constant

### **Comparació entre aquests diferents sistemes anemomètrics**

Quan es comparen sistemes anemomètrics, els paràmetres bàsics a tenir en compte són el nivell de soroll i la resposta freqüencial del sistema. Això, és realment important per a fluxs amb elevades freqüències de turbulència. En l'actualitat, el comportament d'ambdós sistemes segons els dos paràmetres mencionats, és molt semblant. Per una altra banda, l'anemòmetre de temperatura constant té una sèrie d'avantatges enfront al de corrent constant:

- . Major flexibilitat.
- . L'ATC permet la utilització de sondes de pel·lícula, mentre que l'ACC no.
- . En l'ATC s'evita que el sensor es cremi el disminuir sobtadament la velocitat del flux que el refrigera.
- . L'ATC és més pràctic per a mesures en líquids.
- . En l'ATC és possible la linealització. Amb un ACC no.
- . En un sistema d'ATC pot compensar-se la temperatura.

Per totes aquestes raons el sistema de corrent constant és poc utilitzat i ha estat reemplaçat pel de temperatura constant.

**Característiques de l'equip anemomètric utilitzat.**- S'ha utilitzat l'anemòmetre de temperatura constant disponible en el departament de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB. Es tracta d'un equip amb un únic canal, el qual permet mesurar el mòdul de la projecció en un pla de la velocitat. Aquest fet implica una limitació important a l'hora de pretendre conèixer el camp de velocitats en fenòmens on la direcció de la velocitat és en principi desconeguda. L'equip anemomètric està format pels següents elements:

- . Sonda de pel·lícula calent model 1211-20 de la casa Thermo-Systems Inc., on el sensor és paral·lel a l'eix de la sonda. Les seves característiques són:



### *Estudi experimental règim estacionari*

---

Diàmetre del sensor	51 $\mu\text{m}$
Longitud de l'àrea sensible	1 mm
Distància entre suports del sensor	1,67 mm
Resistència típica a temperatura ambient	6 $\Omega$
Resistència típica en operació	9 $\Omega$
Temperatura màx. d'operació per a aire	425 $^{\circ}\text{C}$
Màxima resposta freqüencial típica en aire a 100 m/s	250 kHz

- . Pont Dantec 56C17.
- . Condicionador del senyal Dantec 56N20.
- . Unitat de valor mitjà Dantec 56N22.
- . Software per a anemometria de fil calent de la casa Dantec i un PC/486.
- . Targeta d'adquisició de dades A/D.

#### **3.5.2 Mesura de la pressió.**

Per a efectuar les lectures de la pressió sobre la superfície de la maqueta s'ha utilitzat un multimanòmetre format per una sèrie de tubs rígids de plàstic transparent d'un diàmetre interior de 6 mm i plens de fluid indicador. Aquests tubs estan subjectats verticalment sobre un plafó que té incorporat un paper mil·límetrat amb un zero (valor en repòs), que ens permetrà llegir els valors de les pressions i identificar el signe que té la pressió quan s'està fent les mesures.

A l'hora d'efectuar les mesures s'ha de tenir molt present que dins dels tubs piezomètrics indicadors no es produeixi una entrada d'aire en forma de petites bombolles, ja que aquestes fan variar la lectura de la pressió.

Es pot apreciar millor les característiques d'aquests instruments, en la següent taula:

**Taula 3.5: Característiques de les sondes utilitzades**

<b>ELEMENT DE MESURA</b>	<b>SONDA DE PRANDTL</b>	<b>SONDA ANEMOMÈTRICA</b>
<b>PRINCIPI DE MESURA</b>	Diferències de pressions	Refredament produït pel flux que passa al voltant d'un cilindre escalfat per un corrent elèctric
<b>DENOMINACIÓ</b>	Micromanòmetre inclinat de líquid	Anemòmetre de pel·lícula calent a temperatura constant
<b>VALOR D'ESCALA</b>	0.032 mm.c.a./divisió d'escala	
<b>LÍMIT DE REACCIÓ</b>	0.8 m/s	0.2 m/s
<b>CALIBRATGE</b>	Micromanòmetre de membrana de precisió	Túnel obert DISA, amb mesurador de cabal tipus Venturi
<b>ERRORS</b>	1 %	- Condicionador senyal 1.00% - Linealitzador 0.50% - Processador analògic 0.25%
<b>INTERVAL D'UTILITZACIÓ</b>	De 0.8 a 100 m/s	De 0.2 a 200 m/s
<b>DESVIACIONS DE LA SONDA RESPECTE AL FLUX</b>	Fins a 15°	Sempre perpendicular a la direcció del flux

### **3.6 CALIBRATGES:**

Els calibratges efectuats en els aparells de mesura per l'estudi del règim estacionari, es troben en l'annex corresponent.

*(Veure Annex 3)*

CAPÍTOL IV

**RESULTATS RÈGIM  
ESTACIONARI**

## IV RESULTATS RÈGIM ESTACIONARI

### 4.1 INTRODUCCIÓ:

La aplicació per la que està pensat aquest estudi, és l'anàlisi de l'acció del vent sobre un edifici, encara que les conclusions del mateix poden extrapolar-se a una infinitat de casos en la que apareixen fluxs externs. S'ha escollit un edifici prismàtic regular de base octogonal amb dues orientacions extremes diferents, **FRONTAL** i **RADIAL** (figura 4.1).

\* **Frontal (F)** el vent incideix perpendicularment sobre un dels costats (**direcció de l'apotema**).

\* **Radial (R)** en la que aquest incideix sobre una aresta (**direcció del vòrtex**).

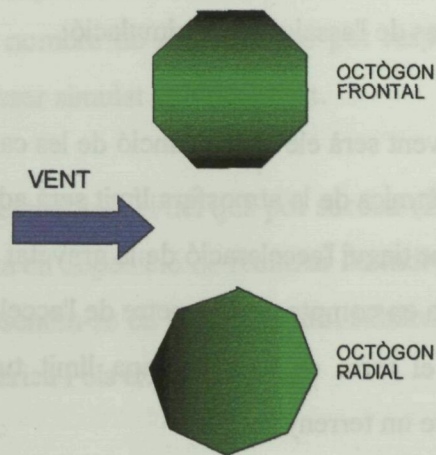


Figura N°4.1: Posicions octògon

Per a aconseguir un bon disseny i una bona qualitat d'execució de l'assaig, hem d'assegurar una sèrie de hipòtesis i concretar les regles a tenir en compte.

#### **4.2 HIPÒTESIS DE PARTIDA I REGLES A TENIR EN COMPTE:**

Una vegada plantejat el problema, es fa necessari fixar el nivell de complexitat amb el que es vol abordar l'estudi. És possible realitzar certes hipòtesis que simplifiquin l'anàlisi, sense que aquest fet faci desvirtuar la seva resolució de manera apreciable. En tot cas, aquells efectes que ara no es considerin poden afegir-se de manera individual o en grup en altres tipus d'estudis.

**Hipòtesis:** Aquestes es fonamenten en l'estudi dels efectes del vent sobre els edificis, en primer lloc es classifica el flux que es fa servir, amb les següents característiques:

- Flux estacionari i no estacionari (permanent i no permanent)
- Flux incompressible.

Quant a les característiques de l'assaig i de la simulació:

- La velocitat del vent serà elevada, i funció de les característiques desitjades.
- La estratificació tèrmica de la atmosfera límit serà adiabàtica (Atmosfera Neutra).
- Les influències que tingui l'acceleració de la gravetat es consideren menystenibles.
- Tampoc es tindrà en compte el paràmetre de l'acceleració de Coriolis.
- El flux sobre el terra dins de la capa límit turbulent pot ésser totalment desenvolupat sobre un terreny rugós.
- La presència d'humitat, o la concentració d'efluents seràn insignificants.

**Regles:** També existeixen una sèrie de regles a tenir en compte:

**\* 1) Regles geomètriques:**

- Pot respectar-se la total geometria del problema:
- L'escala de velocitats ha d'ésser similar, en el model i en el prototipus.
- L'escala de turbulència pot reduir-se a l'escala de longituds utilitzada.

\* 2) Regles de homogeneïtat:

- L'escala de la intensitat de la turbulència ha d'ésser semblant en la realitat i en el model. També s'ha de complir per els camps de densitat de probabilitat o dels valors extrems.

\* 3) Regles estadístiques:

- La funció de correlació temps-espai han d'ésser semblants. Si les escales de turbulència són reduïdes a les escales de longitud la correlació dels coeficients de velocitat han d'ésser iguals.

\* 4) Regles de semblança:

- Tal com ja s'ha vist en l'apartat 3.2, hi han certes relacions entre les conclusions obtingudes en la utilització de les regles de semblança i les obtingudes per altres criteris normalment aplicats. En aquest cas, diferents autors asseguren que els nombres de *Rossby* i de *Froude* poden tenir conseqüències molt petites. El d'*Euler* és no obstant, respectat automàticament. També és conegut, que el nombre de *Reynolds* no pot respectar la influència del flux turbulent i per tant no pot ésser simulat correctament.

Una vegada tenim un coneixement inicial del que pot succeir (Estudi teòric) i havent fixat les hipòtesis de partida, se està en disposició de realitzar l'estudi pròpiament dit i obtenir els resultats corresponents. Presenten-se en aquest capítol subdividits en dos subapartats, els de la part de simulació numèrica i els experimentals.

### **4.3 RESULTATS MODEL MATEMÀTIC:**

En aquest apartat s'explica tot el procés de creació del model matemàtic, així mateix s'exposen les dificultats trobades i les solucions adoptades. També es presenten els resultats obtinguts pel model matemàtic. El procés de creació del model pot dividir-se en tres grans blocs dins de los quals hi ha tota una sèrie de passes a seguir:

**1) Investigació conceptual:** En aquesta etapa es pretén conèixer de manera general quin és el comportament del fluid en el sistema que s'està estudiant, així com la seva naturalesa, sense analitzar detalls concrets o petites zones del flux. Normalment, en aquesta fase s'utilitza una malla computacional de baixa o mitjana resolució i s'han seguit les següents passes:

- . Recopilar la màxima informació sobre el sistema a estudiar.
- . Crear la geometria del sistema.
- . Crear la malla computacional.
- . Assignar a la malla les condicions de contorn.
- . Definir els paràmetres computacionals.
- . Realitzar les simulacions.
- . Analitzar els resultats obtinguts a les simulacions.

**2) Investigació específica:** Amb la informació aportada es passa a refinar el model o a tornar-lo a dissenyar per a estudiar amb detall determinades zones o fenòmens que poden aparèixer en el sistema, com la turbulència prop de les parets, els despreniments de la capa límit, els reenganxaments, les zones amb gradients importants, etc. En aquesta fase la malla computacional sol ésser molt més refinada que l'anterior. Per tant és fa necessari passar de nou per la major part dels passos que en la fase anterior han servit per a crear el model numèric.



3) *Validació experimental:* Consisteix en comparar els valors obtinguts en les simulacions amb les dades experimentals obtingudes en el laboratori. Generalment, la informació que pot mesurar-se en un assaig és limitada però serveix per a la validació del model matemàtic. La informació que pot donar aquest, és molt més extensa i permet entendre completament el fenomen físic estudiat.

És evident que aquestes tres fases són realimentades amb la informació que aporten unes i altres. Per exemple, les diferències existents entre els valors numèrics i experimentals ens obliga a retocar la malla en determinades zones del model o a tornar a plantejar l'elecció d'algun paràmetre computacional.

#### 4.3.1 Classificació del flux.-

Ha d'iniciar-se la creació del model classificant o fixant les característiques fonamentals del flux. En apartats anteriors s'han fixat les hipòtesis de partida per a l'estudi de l'acció del vent sobre un edifici octogonal.

Des del punt de vista del model matemàtic, algunes de les característiques del flux poden variar, degut a que amb aquest model es pretén reproduir més, els assaigs realitzats en el laboratori que el cas a escala real. Sota aquest punt de vista el flux és:

- . Intern.
- . Turbulent.
- . Estacionari.
- . Viscós.
- . Compressible.
- . Subsònic.
- . Sense efectes tèrmics.
- . Un únic fluid i sense canvis de fase.'

#### **4.3.2 Geometria del model matemàtic.-**

Un bon model matemàtic ha d'iniciar-se amb una bona elecció del domini fluídic. Aquest domini és la part del sistema fluídic que es modalitza. Algunes vegades, degut a les simetries, és possible reduir el model a una petita zona del sistema fluídic. Altres vegades, és necessari simular tot el sistema perquè els resultats siguin satisfactoris.

En el present cas s'ha seleccionat com domini tota la cambra d'assaig del túnel de vent a partir de 250 mm de l'entrada. A pesar d'existir simetria geomètrica respecte al pla x-z, no pot assegurar-se en un inici que el flux d'aire sigui simètric. Com exemple, el flux d'un fluid al voltant d'un cilindre no és simètric per a determinats nombres de Reynolds (carrer de remolins de Von Kármán) mentre que si ho és per a valors de Reynolds elevats.

S'ha iniciat l'estudi considerant el cas més desfavorable, és a dir, sense simetria. Després de simular varies malles computacionals s'ha arribat a la conclusió que els resultats que simulen tot el sistema o només la meitat són els mateixos, aquest fet permet reduir el temps de computació o mantenir el temps però augmentar la precisió treballant amb un mallat més dens en les zones de més interès.

El procés per a construir la geometria del model amb el programa FIRE és relativament laboriós, essent necessari treballar segons l'esquema 4.1.

##### **Generar plans:**

Es tracta de dibuixar en un pla les geometries que posteriorment s'utilitzen per a generar les superfícies.

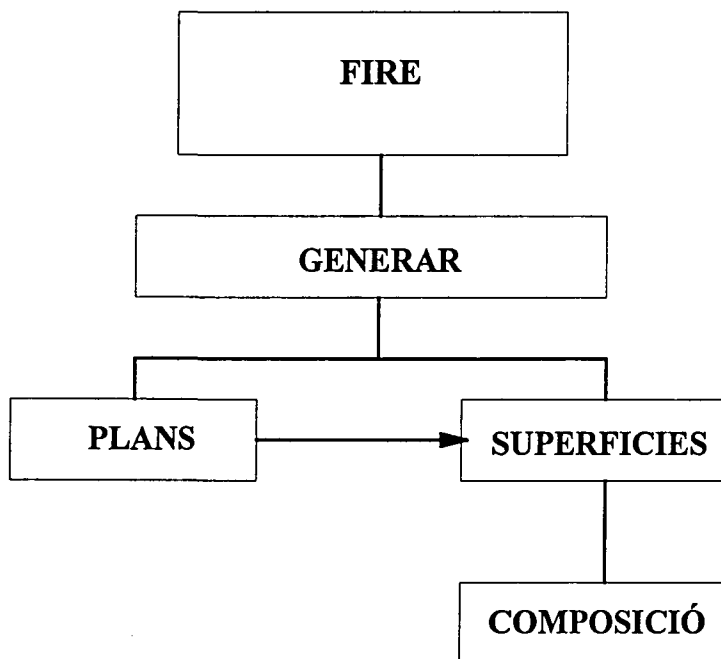
##### **Generar superfícies:**

Mitjançant la superposició de plans s'obtenen superfícies senzilles en tres dimensions.

**Composició de superfícies:**

Unint superfícies senzilles es genera la superfície del model, és a dir, la superfície de control dins la qual està el volum de control. Per a realitzar totes aquestes fases el programa ofereix tota una sèrie d'eines de CAD.

En la figura 4.2 apareix la geometria del model matemàtic en el cas radial. Es evident que la geometria del problema es diferent en la posició radial que en la frontal, per tant, s'ha fet necessari generar una superfície de control diferent per a cadascun dels dos casos que se estan estudiant.



Esquema 4.1: Geometria del model matemàtic

SEL_TIME
SEL_CUT
SEL_ARBI
SURFACE_V
ISOSURFAC
REF_SCRN
↓PLOT_FLOW
↓PLOT_ERRO
↓PLOT_ACOU
FILENAMES
ROTATE
ZOOM
COO-CROSS
TEXT
2D_PLOT
LOAD_VOL
GEO_INFO
SPECIALS
?SEL_JUMP
↑RETURN
HELP
PRGM_STOP

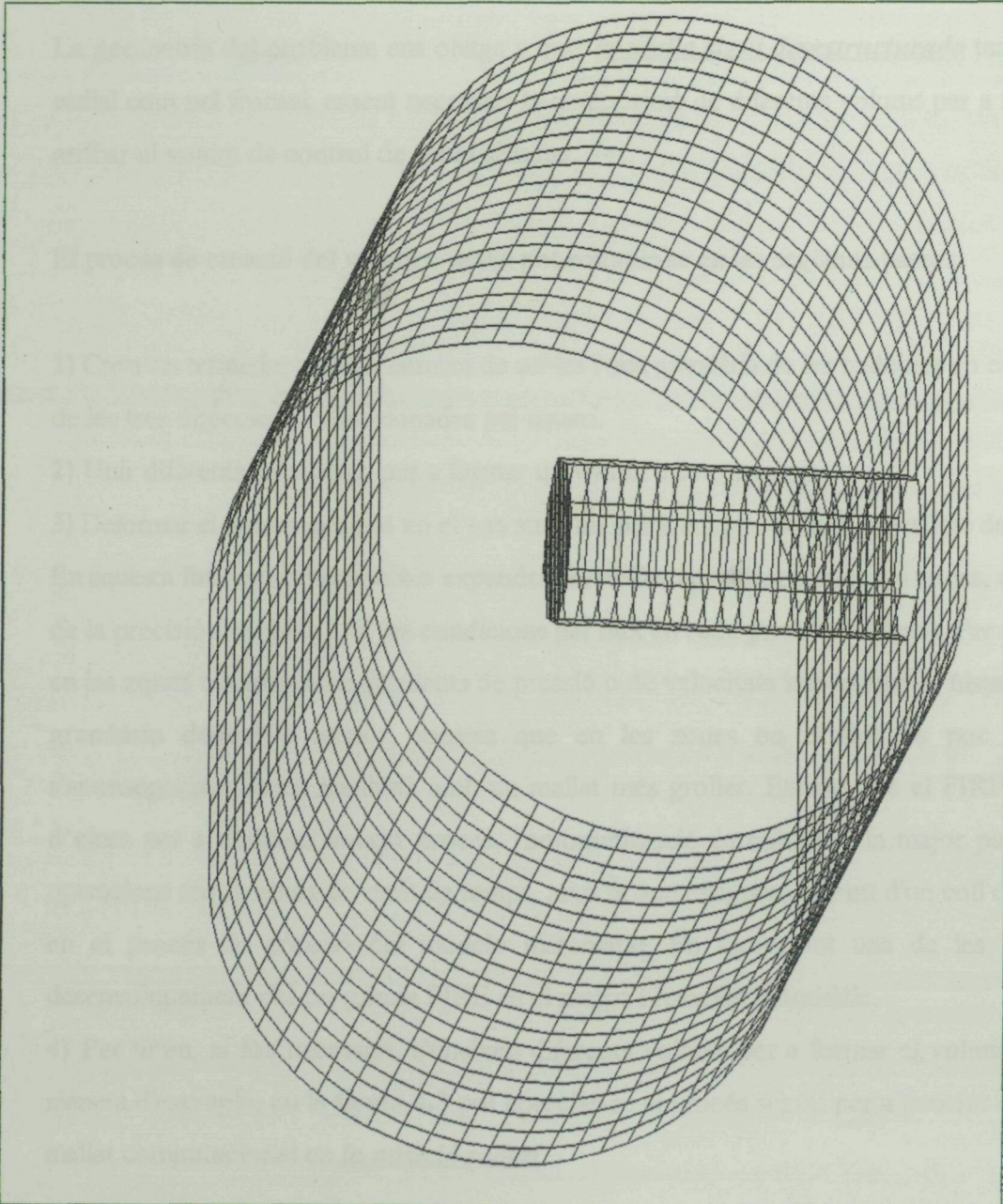


Figura 4.2: Geometria del model matemàtic en la posició radial