

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

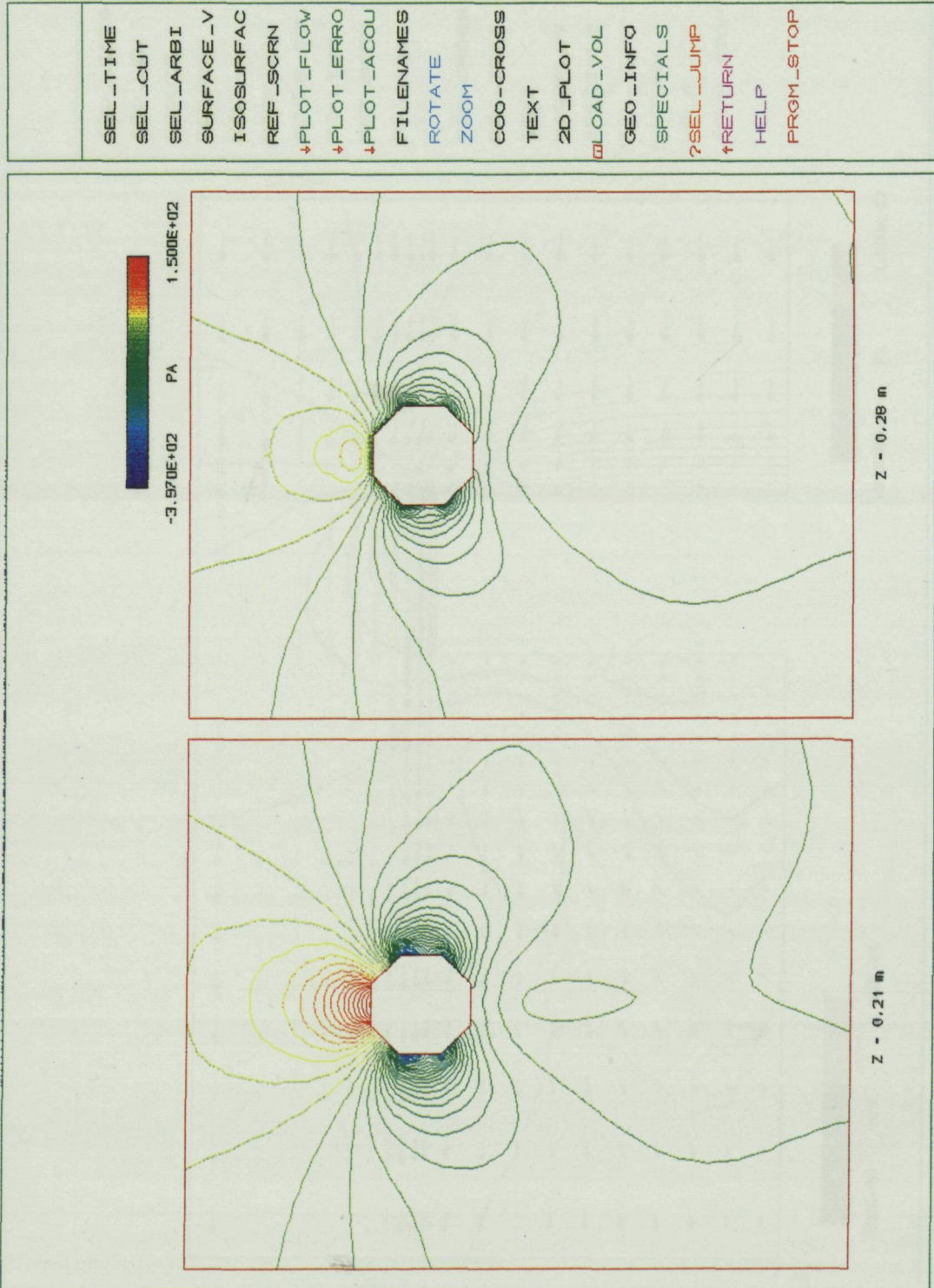
**ACCIÓ DEL VENT SOBRE UNA ESTRUCTURA:  
ANÀLISI TEÒRIC I EXPERIMENTAL**

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*

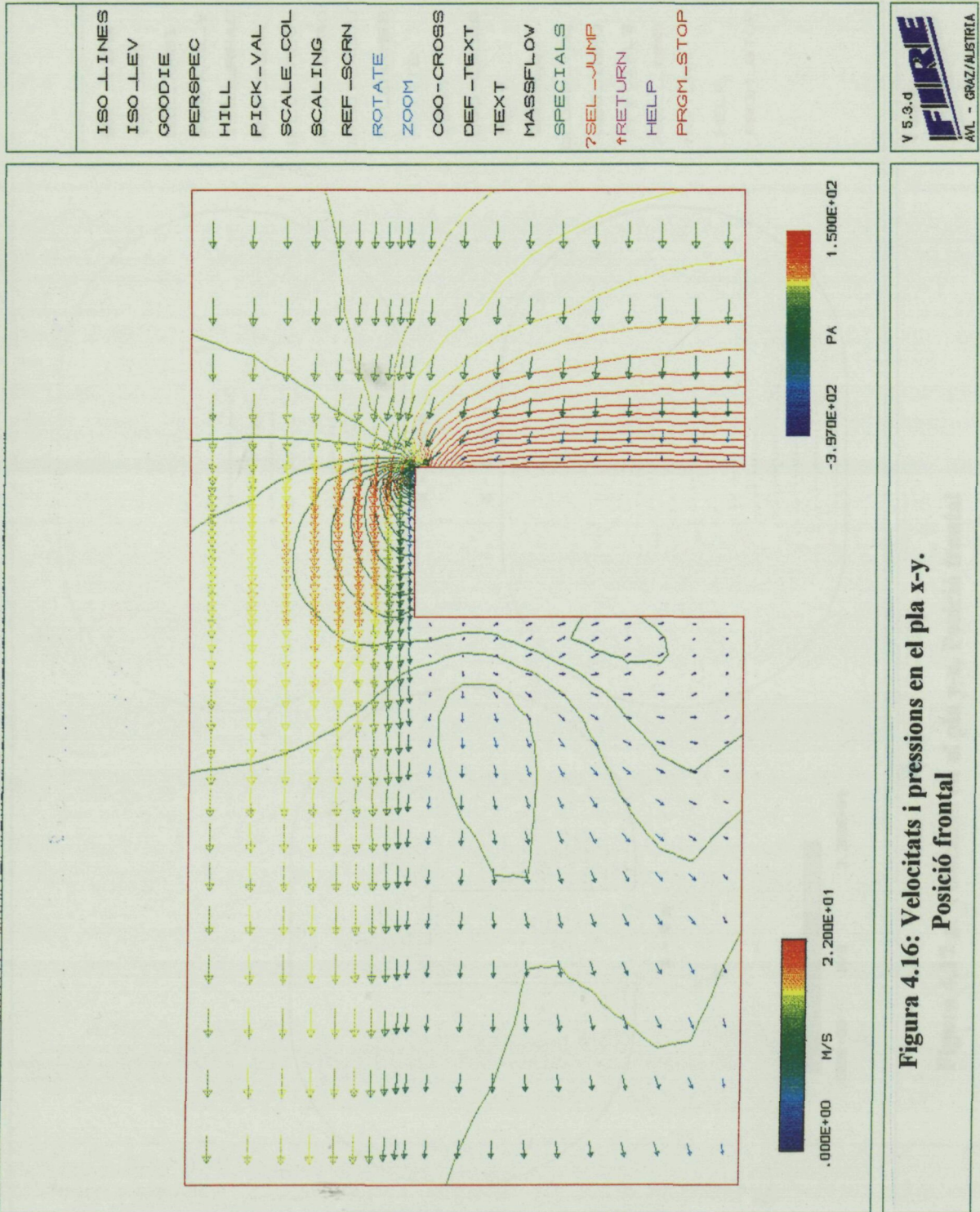


- SEL\_TIME
- SEL\_OUT
- SEL\_ARBI
- SURFACE\_V
- ISOSURFAC
- REF\_SCRN
- ↓PLOT\_FLOW
- ↓PLOT\_ERRO
- ↓PLOT\_ACOU
- FILENAMES
- ROTATE
- ZOOM
- COO-CROSS
- TEXT
- 2D\_PLOT
- LOAD\_VOL
- GEO\_INFO
- SPECIALS
- ?SEL\_JUMP
- ↑RETURN
- HELP
- PRGM\_STOP

V 5.3.d  
**FLIR**  
 AVL - GRAZ/ÖBTRIA

Figura 4.15 d: Pressions en el pla x-y. Posició frontal





**Figura 4.16: Velocitats i pressions en el pla x-y.  
 Posició frontal**



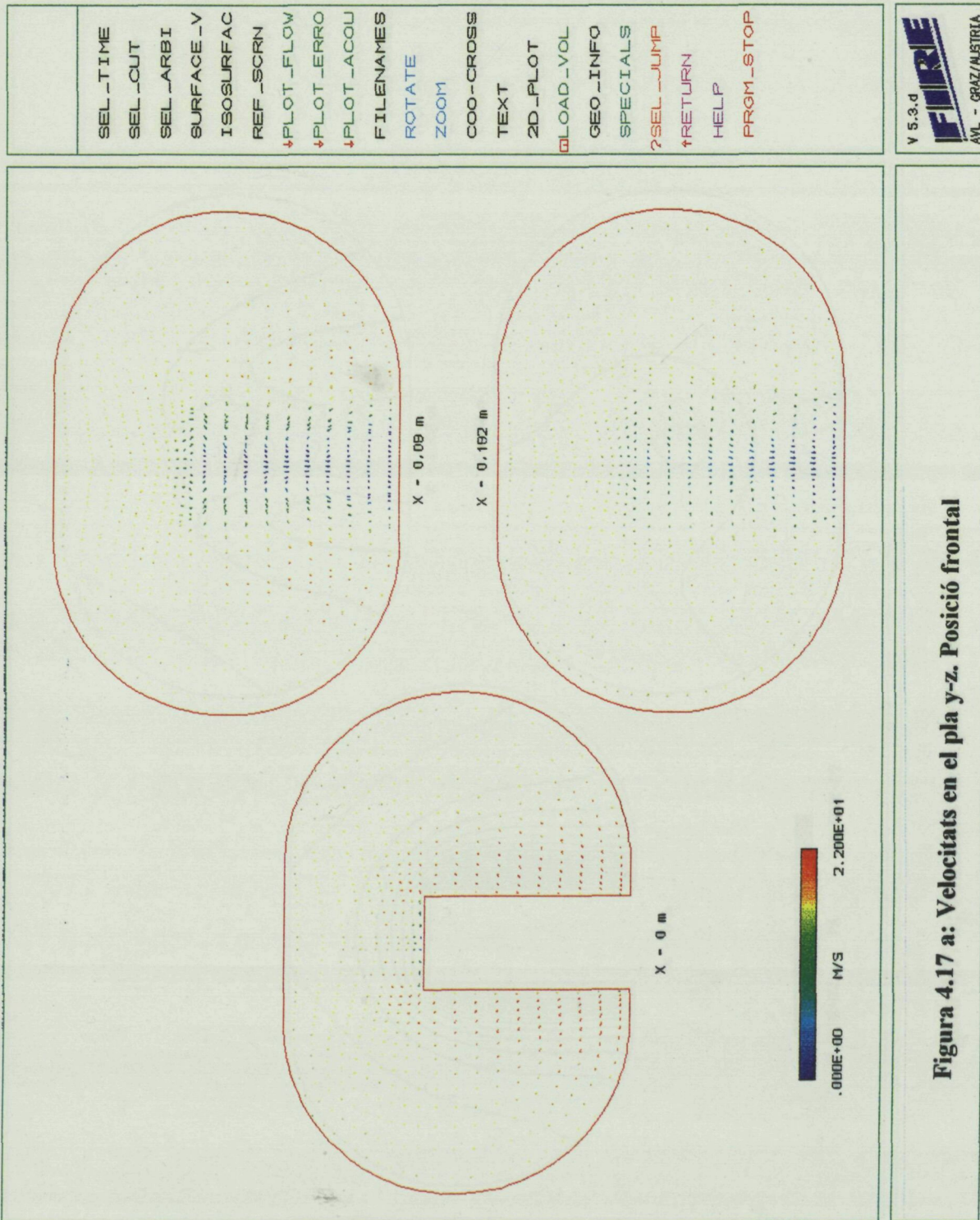


Figura 4.17 a: Velocitats en el pla y-z. Posició frontal

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\_VDL  
 GEO\_INFO  
 SPECIALS  
 ?SEL\_JUMP  
 ↑RETURN  
 HELP  
 PRGM\_STOP

V 5.3.d  
**FIREF**  
 AVL - GRAZ/AUSTRIA

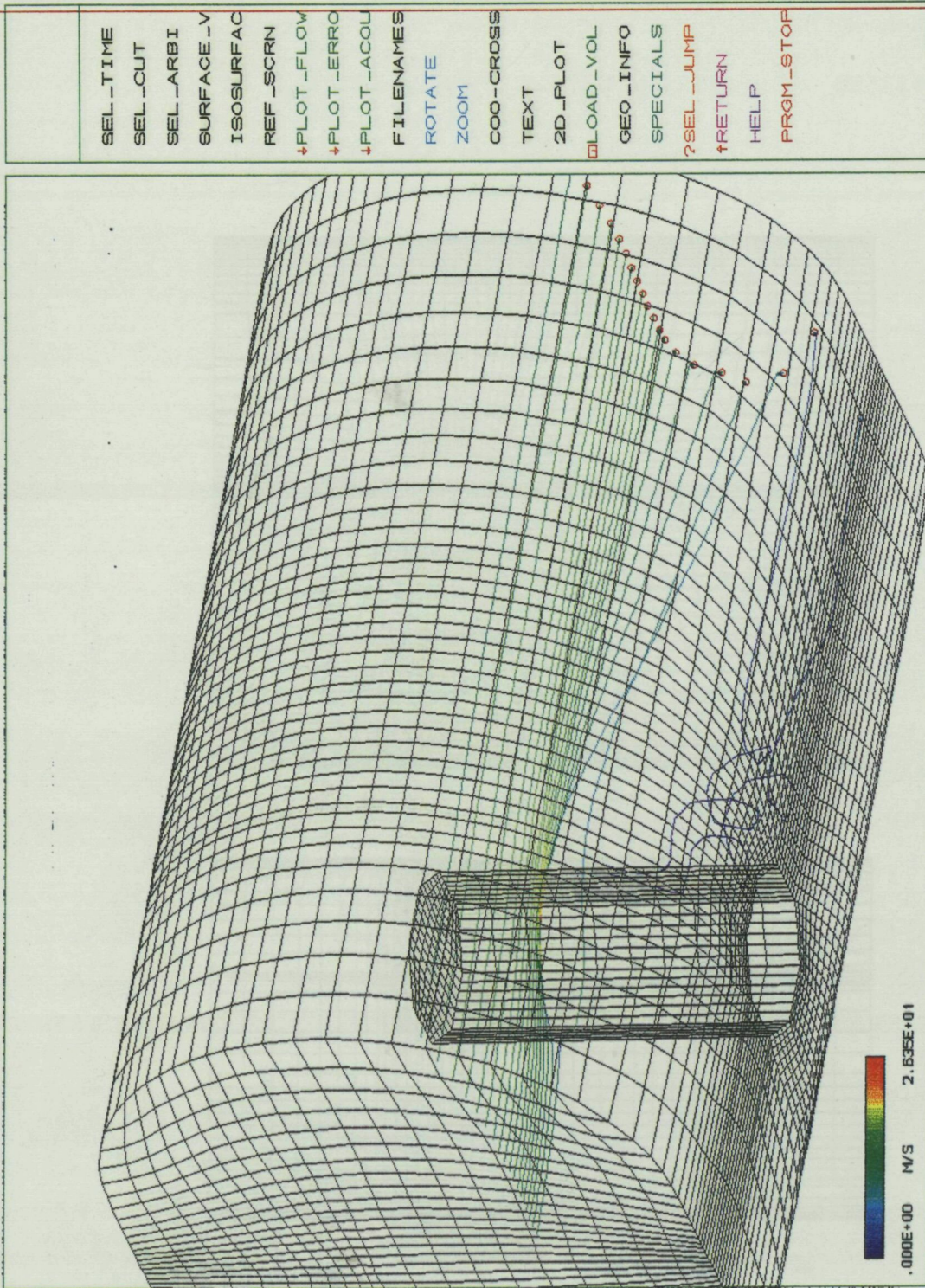


SEL_TIME
SEL_CUT
SEL_ARBI
SURFACE_V
ISOSURFAC
REF_SCRN
↓PLOT_FLOW
↓PLOT_ERRO
↓PLOT_ACOU
FILENAMES
ROTATE
ZOOM
COO-CROSS
TEXT
2D_PLOT
LOAD_VOL
GEO_INFO
SPECIALS
?SEL_JUMP
↑RETURN
HELP
PRGM_STOP



Figura 4.17 b: Pressions en el pla y-z. Posició frontal





V 5.3.d  
**FIREF**  
 AVL - GRAZ/ALETRIA

Figura 4.18 a: Trajectòries de les partícules de fluid.  
 Posició frontal



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

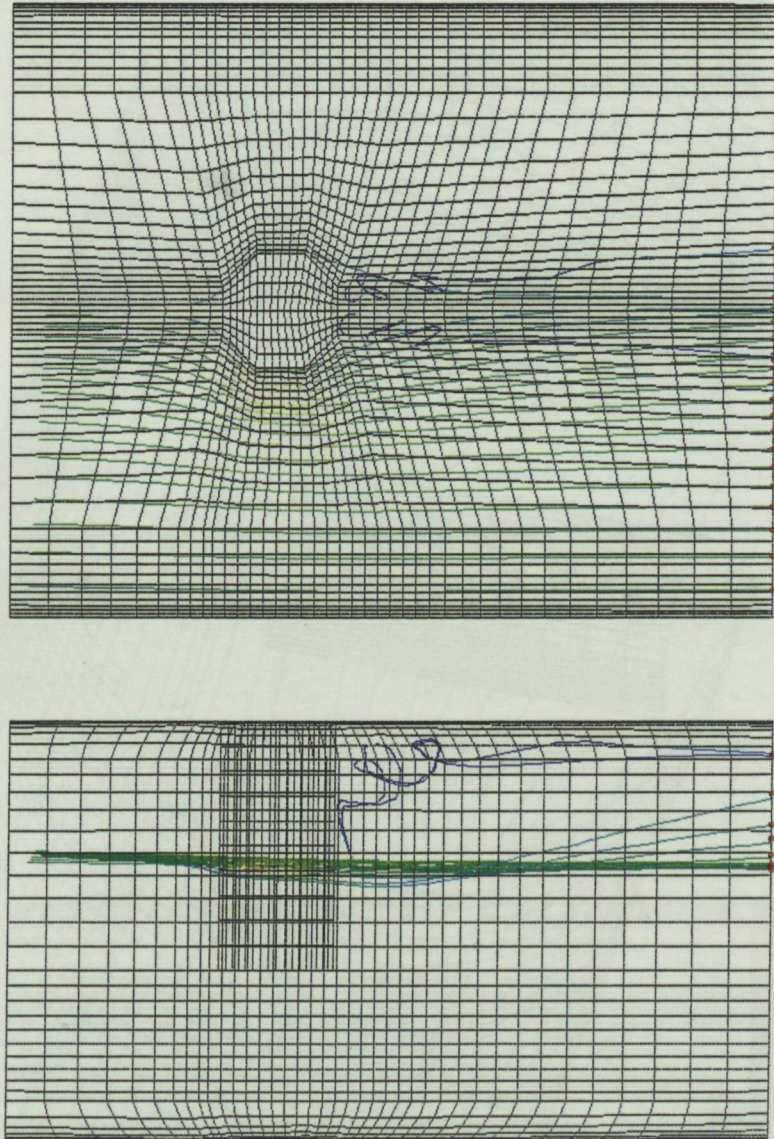
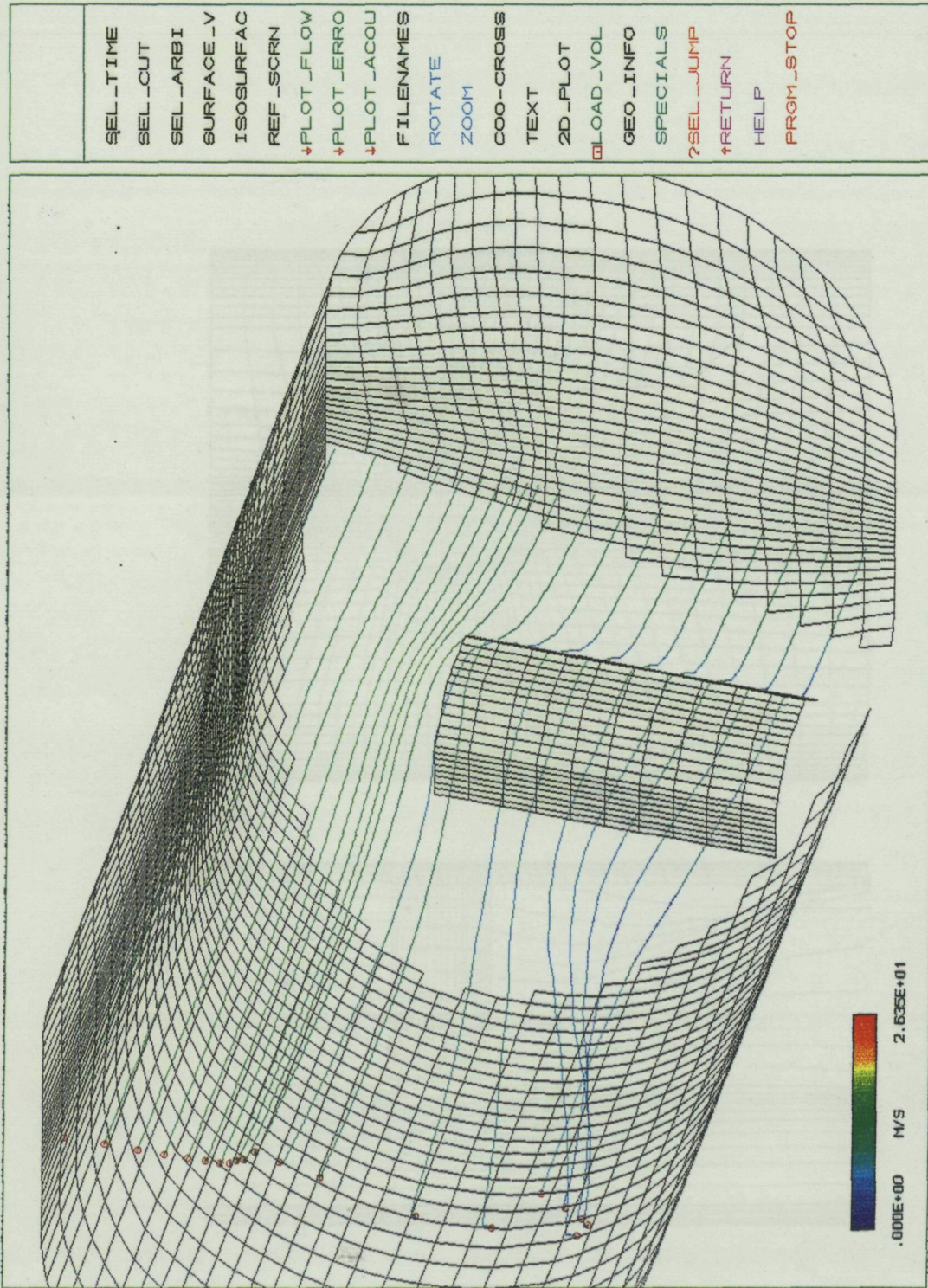


Figura 4.18 b: Projeccions de la figura 4.18 a

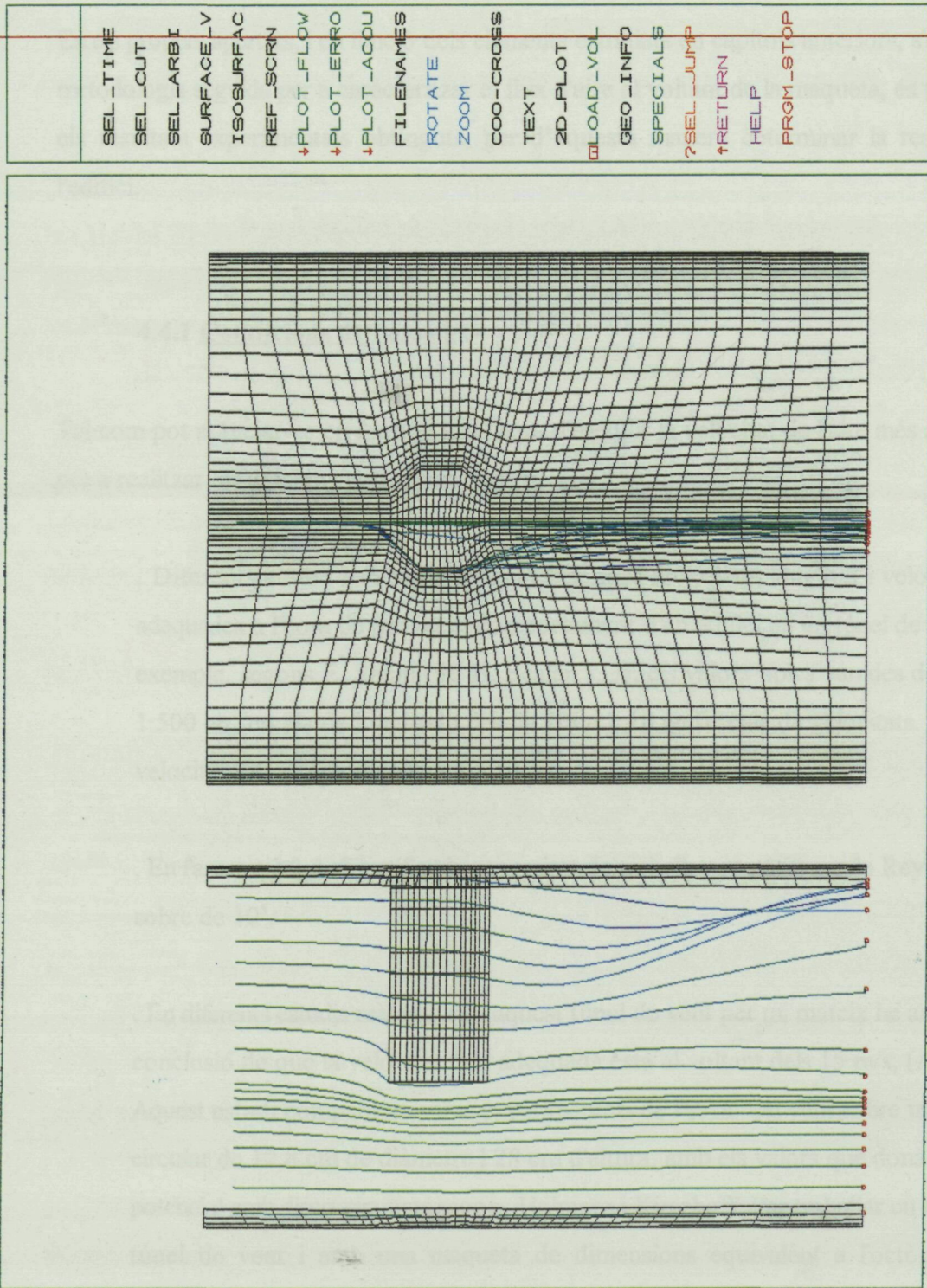




V 5.3.d  
**FLUENT**  
 AVL - GRAZ/AUSTRIA

Figura 4.18 c: Trajectòries de les partícules de fluid.  
 Posició frontal





V 5.3.d  
**FLARE**  
 AVL - GRAZ/AUSTRIA

Figura 4.18 d: Projeccions de la figura 4.18 c

#### **4.4 RESULTATS EXPERIMENTALS:**

En els propers apartats, i en funció dels elements estudiats en capítols anteriors, s'explica la metodologia seguida per a caracteritzar el flux d'aire al voltant de la maqueta, és presenten els resultats experimentals obtinguts, per d'aquesta manera determinar la resposta de l'edifici.

##### **4.4.1 Condicions de l'assaig .-**

Tal com pot apreciar-se en l'annex 1, a l'hora d'escollir la velocitat de l'aire més adequada per a realitzar els assaigs s'han seguit tres criteris:

. Diferents autors han establert quines són les escales de longitud i velocitat més adequades a l'hora de provar el comportament d'un edifici en un túnel de vent. Per exemple, segons E. Simiu i R. H. Scalan [33], els valors típics van des de 1:100 a 1:500 en l'escala de longitud i des de 1:5 a 1:10 en l'escala de velocitats. Essent la velocitat mínima recomanada de 10 m/s.

. En l'apartat 3.3.3 es justifica la necessitat de treballar en números de Reynolds per sobre de  $10^5$ .

. En diferents estudis realitzats en aquest túnel de vent per mi mateix he arribat a la conclusió de que la velocitat més adequada està al voltant dels 15 m/s, (Annex 1). Aquest estudi compara mesures experimentals de l'acció del vent sobre un cilindre circular de 12,8 cm de diàmetre i 28 cm d'altura, amb els valors que donà la teoria potencial amb discontinuïtats segons Helmotz i Kirschoff. Per treballar en el mateix túnel de vent i amb una maqueta de dimensions equivalent a l'octògon, s'ha considerat que les conclusions són extrapolables a aquest problema.



El tercer criteri marca com velocitat més adequada la de 15 m/s, que està d'acord amb lo exposat pel primer criteri, i el número de Reynolds per a aquesta velocitat és de  $Re = 1,3 \cdot 10^5$  (calculat prenent com longitud característica la distància entre cares paral·leles de la base octogonal, és a dir, 12,8 cm), per tant també es compleix el segon criteri. Finalment la velocitat escollida és de 15 m/s.

Un altre dels factors que marquen el flux d'aire al voltant de l'edifici és la direcció amb la que el vent incideix sobre l'estructura. Per la necessitat d'acotar l'estudi s'han seleccionat les dues posicions relatives estructura-direcció del vent extremes, que poden donar-se entre ambdues infinites possibilitats. Tal com ja hem vist, les anomenare **posició radial i frontal**.

A les maquetes utilitzades a la part experimental de l'estudi s'han efectuat exploracions verticals de pressions i de velocitats a diferents alçades, ja que en models d'estructures tridimensionals és important tenir en compte la variació d'aquestes magnituds en funció de l'altura, també s'ha estudiat la part superior de l'edifici (sostre).

#### **4.4.2 Mesures experimentals de la pressió.-**

**Metodologia experimental.-** Les pressions que provoca l'aire sobre les cares de la maqueta han estat mesurades mitjançant una sèrie de presses de pressió col·locades sobre una de les cares i en el sostre de la maqueta tal com ja s'ha comentat en el Capítol 3 i tal com pot apreciar-es a la figura 3.4. No s'han col·locat sondes de pressió en totes les cares per la dificultat constructiva que provocaria un gran nombre de tubs piezomètrics, i també per la complicació que resulta a l'hora d'efectuar les lectures.

Les pressions s'obtindran girant la maqueta, de forma que la cara amb les sondes de pressió quedi localitzada en la posició en la que es pretén realitzar la mesura. Es defineix un angle  $\Theta$  tal com pot apreciar-se en la figura 4.19 i es fa variar  $\Theta$  des de  $0^\circ$  fins a  $180^\circ$ . Les



posicions restants fins els  $360^{\circ}$  s'obtenen per simetria, ja que es tracta d'un problema en el que existeix simetria, al menys, en el que fa referència els valors mitjans de les variables. Per tant,  $\Theta$  prendrà els valors  $22,5^{\circ}$ ,  $67,5^{\circ}$ ,  $112,5^{\circ}$  i  $157,5^{\circ}$  per a la posició radial, i  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$  i  $180^{\circ}$  per a la posició frontal.

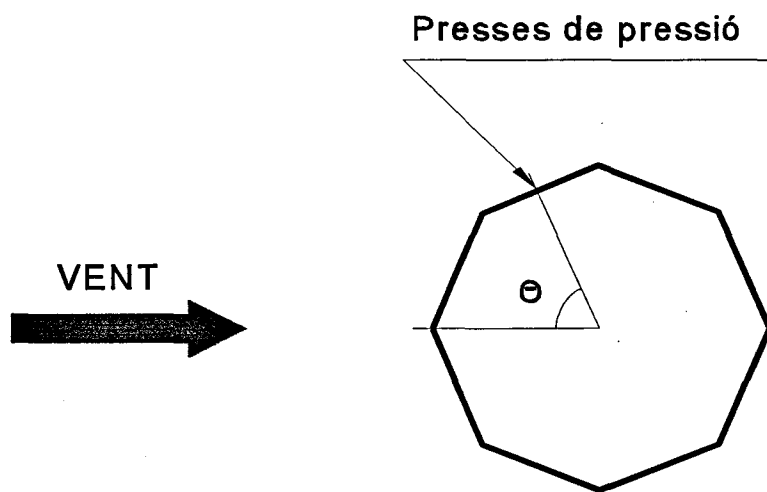


Figura 4.19: Posició relativa entre la direcció del vent i la cara de la maqueta equipada amb les presses de pressió

Els conductes de sortida de les sondes de pressió estan connectades a un multimanòmetre diferencial vertical que ens permetrà mesurar directament les pressions relatives en mil·límetres de columna d'aigua. Aquest sistema de presa de dades presenta dificultats en quant a les mesures en les zones on el comportament del fluid és inestable i, per tant, la pressió oscil·la dins de uns límits raonables. Aquest fet donà lloc a oscil·lacions en el nivell d'aigua del tub piezomètric, obligant a realitzar avaluacions més o menys fiables del valor mitja de la pressió, sobre tot si es treballa a velocitats elevades. Aquest tipus de procedir és el que suggereixen autors com Surry, Stathopoulos i Davenport [36].



És possible millorar la qualitat de les dades experimentals utilitzant captadors de pressió sobre la superfície de la maqueta i connectats a l'electrònica corresponent, de forma que siguin capaços de mesurar i magatzematge una gran quantitat de valors instantanis de pressió amb una freqüència de lectura elevada i amb ells calcular les estadístiques que permetin conèixer, no solament el valor mitja de la pressió, si no també, la distribució de la pressió instantània en un punt del camp fluidic. Aquest sistema s'ha tingut que desestimar per no disposar de captadors de pressió prou sensibles (pressions molt baixes).

Una vegada establerta la manera de mesurar la pressió, es passar a determinar els resultats pel prisma regular de base octogonal, per les dues posicions descrites.

**Resultats de les mesures experimentals de pressió.-** Els valors mitjans de la pressió mesurats en el túnel de vent per a una velocitat de l'aire de 15,4 m/s es presenten en la taula de l'Annex 4. Els números de les presses de pressió estan referits als que apareixen en la figura 3.11.

La pressió mesurada a l'entrada de la cambra d'assaig, és a dir, la pressió en el corrent d'aire lliure que es considera no pertorbada per l'obstacle,  $p_{\infty} = -3,8 \text{ mmca}$ .

S'han realitzat nombroses exploracions de pressions de les quals s'han desestimat aquelles que després de realitzades havia una variació de la velocitat de l'aire d'un 2% o una variació de la temperatura d'un grau centígrad.

Habitualment, per a analitzar i presentar els resultats de un camp fluidic al voltant d'un cos s'utilitza el coeficient de pressió,  $K_p$ , que ja hem definit anteriorment. No obstant, els valors de la pressió permeten treure una sèrie de conclusions sobre el comportament del fluid, que seran posteriorment confirmades i ampliades per la informació aportada pels coeficients de pressió i les mesures de la velocitat.



A continuació, es passa a analitzar els valors experimentals obtinguts, per separat per a les posicions radial i frontal, per a les presses de pressió de la 1 a la 5.

#### **. Posició radial**

Pot comprovar-se fàcilment, que el comportament del prisma octogonal per a aquesta posició, és molt semblant al del model cilíndric (Annex 2), ja que es detecta una uniformitat en els resultats obtinguts de les pressions. Si comparem els resultats obtinguts amb els del investigador Murakami [26] on l'obstacle era un cub, els resultats que apareixen en aquest cas, pot dir-se que qualitativament els camps fluidícs en ambdós casos són similars. Existeix la zona d'estancament, els despreniments en els laterals i en el sostre, el deixant en la part posterior i un possible reenganxament de la capa límit en el sostre (aquest necessita d'un estudi per separat).

Tenint en compte en primer lloc les presses de pressió de la 1 a la 5, situades en una cara lateral del prisma octogonal, pot apreciar-se que per a un angle de  $22,5^\circ$  apareixen sobrepressions en la cara de la maqueta, indicant que en aquesta zona es produeix un estancament. Ja a  $67,5^\circ$  les pressions són inferiors a la de referència, el que fa pensar que la capa límit pot haver-se després en l'aresta situada a  $45^\circ$ .

Pels angles de  $112,5^\circ$  i  $157,5^\circ$  es produeix una forta depressió i les lectures són pràcticament idèntiques en ambdues posicions, el que indica que estan en el deixant produït per l'edifici, que es caracteritza per recirculacions i elevada turbulència.

#### **. Posició frontal**

Les tendències són les mateixes que per a la posició radial encara que més accentuades. Així, en la cara que s'enfronta al flux són més grans i també les depressions en la part posterior. Així, en la part posterior, els valors de les depressions en les presses 1 i 8 valen respectivament - 21.5 i - 22.5 mm.c.a., és a dir són pràcticament les mateixes, això ens indica que en el sostre es produeix la separació i no reenganxament de les línies de corrent.

S'ha de fer notar que en les lectures a 45° la pressió és pràcticament la de referència, el que pot indicar que si la capa límit es desprèn en l'aresta situada a 22,5° torna a unir-se a la superfície de l'edifici per a desprendre-se definitivament en l'aresta situada a 67,5°.

Un estudi per separat requereix el sostre de l'edifici.

#### **. Sostre**

En incidir l'aire sobre la maqueta, es produeix una derivació del flux pels laterals i una concentració de les línies de corrent a la part superior dels edificis. Aquest fenomen provoca una sobrepressió per sobre del model, acompanyada per una acceleració del vent que fa que l'aire ascendeixi separant-se del cos, el resultat és la presència de una forta depressió amb el sostre amb una intensitat de turbulència elevada. Aquesta regió de baixa pressió detectades en el model indiquen un increment en la intensitat del vòrtex localitzat per sota, que és funció de l'increment d'aquestes pressions.

Per aquest motiu i per tal d'esbrinar quin és el comportament d'aquest fluid en el sostre, es van situar les presses de pressió 6, 7 i 8. De l'anàlisi de les seves lectures pot apreciar-se que, per a tots els angles apareixen depressions i que ambdós casos són molt semblants. Això indica en primer lloc, un desprendiment de la capa límit al trobar-se el corrent d'aire amb l'aresta formada pel sostre i les cares laterals. En segon lloc, apareix un augment de les pressions quant més a prop se està de la part posterior de la maqueta, la qual cosa podria provocar un reenganxament de la capa límit. També s'observen que aquests valors de les depressions en la posició RADIAL són inferiors els obtinguts per la posició FRONTAL entre els 0 i els 67,5°, és a dir, des del centre de la cara fins cap enrera, mentre que des dels 90° fins els 180° són pràcticament els mateixos i que corresponen a la part més propera d'on incideix el vent. Així, mentre que els valors màxims en ambdós són pràcticament els mateixos, no es així en els valors mínims que són més baixos en el cas RADIAL que en el FRONTAL. Hi ha un increment del valor mínim al màxim del 38 % en el cas RADIAL i del 21 % en el FRONTAL.



**Coefficients de pressió.-** Tal com ja s'ha vist en l'apartat d'anàlisi dimensional, el coeficient de pressió és el nombre adimensional que juntament amb el factor d'escala permet passar del model al prototipus. A nivell físic el coeficient de pressió és la relació entre les forces de pressió i les d'inèrcia i es defineix com:

$$K_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho c_\infty^2}$$

Aquest coeficient pren valors positius en les zones on apareixen sobrepressions i valors negatius en les zones on existeixen depressions. Segons la teoria potencial, és a dir, flux no viscos i incompressible, es compleix la igualtat:

$$K_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho c_\infty^2} = 1 - \frac{c^2}{c_\infty^2}$$

$c$  és la velocitat en el punt en el que se està calculant el coeficient de pressió. D'aquesta expressió es dedueix que  $K_p$  val 1 en els punts d'estancament, és a dir,  $c = 0$ .

En la figura 4.20 es representa el coeficient de pressió enfront al quocient entre l'altura de la pressió mesurada des de la base de la maqueta i l'altura de la maqueta,  $z/H$ . En la figura 4.21 apareix el coeficient de pressió enfront l'angle,  $\Theta$ , i en ambdues figures per a les posicions radial i frontal.

Analitzant les figures 4.20 i 4.21 poden treure-se algunes conclusions sobre el comportament de l'aire en la posició radial i frontal, i les diferències que apareixen entre ambdues posicions:

. En ambdós casos apareixen sobrepressions ( $K_p > 0$ ) en la part del davant de la maqueta. Aquestes sobrepressions són superiors en la part inferior degut a l'efecte del terra.

. En ambdós casos apareixen depressions ( $K_p < 0$ ) en la part posterior de l'edifici. El valor del coeficient pràcticament no varia amb l'angle a partir de cert valor. Això es així en les cares que queden dins del deixant.

. En les posicions radial i frontal el comportament del fluid és similar, essent els efectes, tant les sobrepressions com les depressions, superiors en la posició frontal. El fluid al trobar-se amb una superfície perpendicular al seu moviment en la posició frontal es veu més afectada que en el cas radial.

. Com era d'esperar, els desprendiments de la capa límit sembla que es produeixen en les arestes de l'edifici i, per tant, a diferents angles per a cada posició.

Respecte a els coeficients de pressió en el sostre de la maqueta, aquests no fan més que confirmar el que ja s'ha comentat a l'analitzar les lectures de pressió.



FIGURA 4.20: COEFICIENT DE PRESSIÓ A DIFERENTS ALTURES

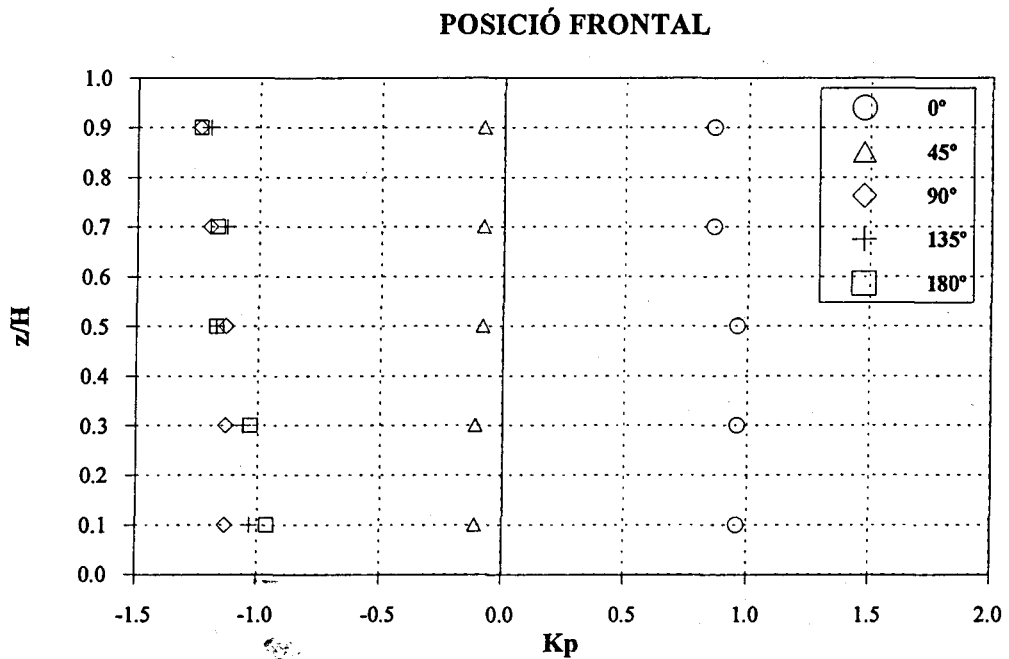
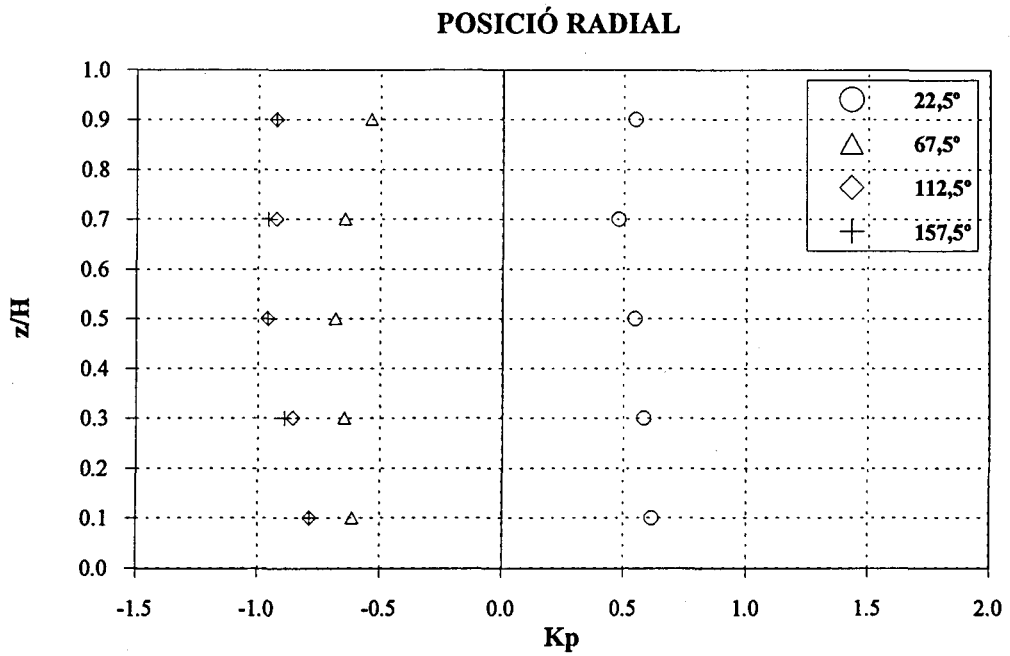
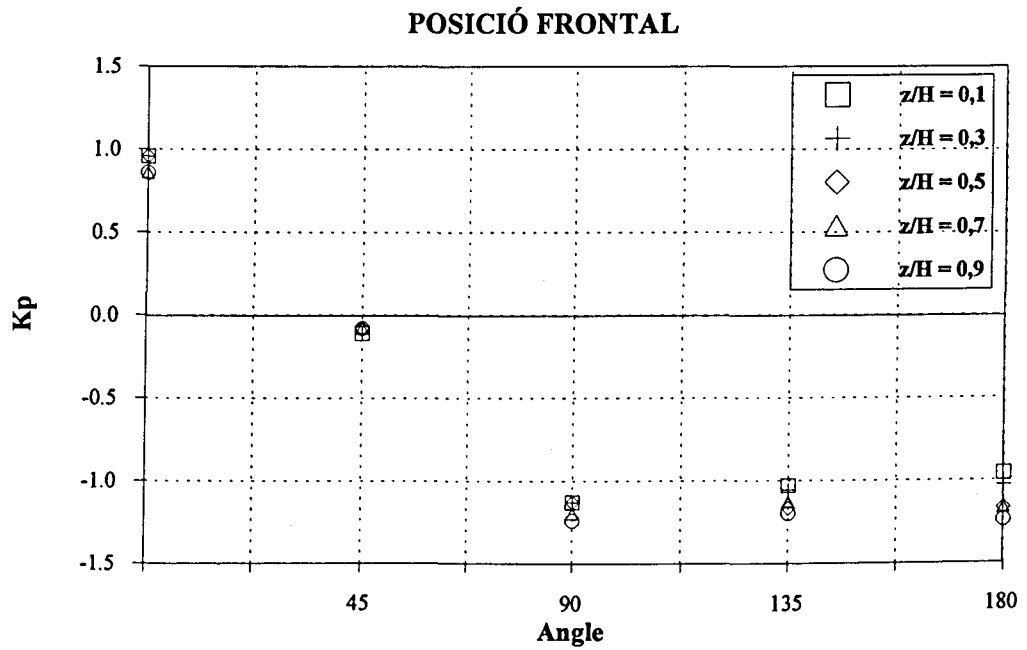
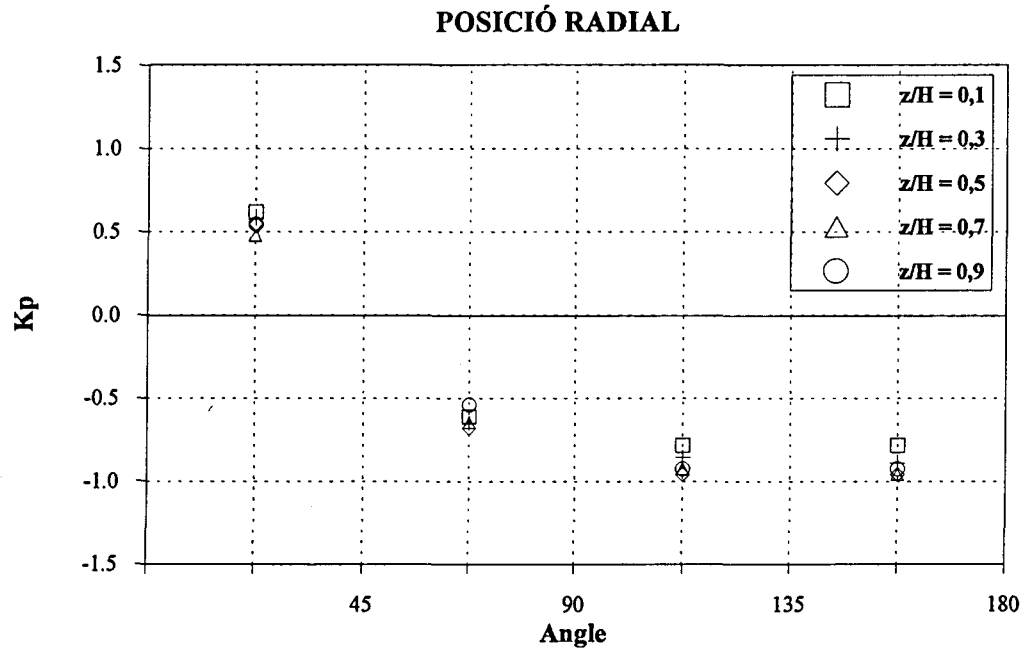


FIGURA 4.21: COEFICIENT DE PRESSIÓ EN FUNCIÓ DE L' ANGLE





#### **4.4.3 Mesures experimentals de velocitat.-**

**Metodologia experimental.-** Una de les variables més importants a l'hora de caracteritzar un camp fluídic és la velocitat. En aquest cas les velocitats permeten confirmar i ampliar la descripció del fenomen físic donat per les pressions.

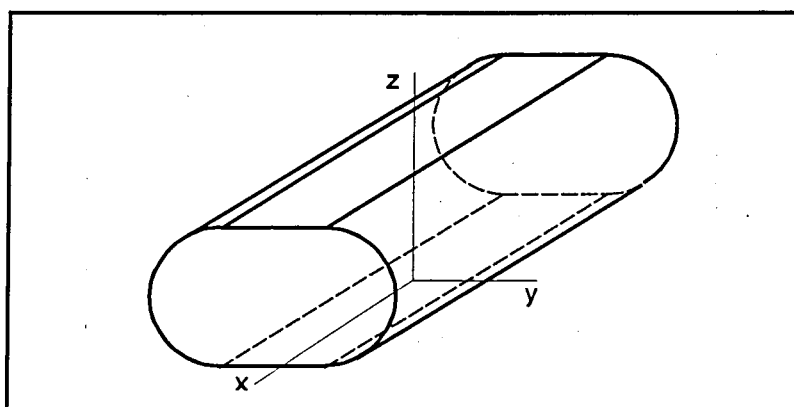
Per tractar-se d'un problema complexa amb recirculacions, desprendiments de capa límit, elevada turbulència en algunes zones, etc. no és possible conèixer per endavant la direcció de la velocitat en qualsevol punt. Això fa descartar aparells de mesura de velocitats senzills com la sonda de Prandtl i obliga a la utilització de dispositius més complexes en els que no resulta imprescindible conèixer la direcció de la velocitat abans de realitzar la mesura. Per tot això, s'ha decidit utilitzar per a mesurar les velocitats una sonda de pel·lícula calent.

Amb un equip complet d'anemometria de pel·lícula calent format per tres sondes és possible mesurar el mòdul i la direcció de la velocitat en un punt i per a un instant. Lamentablement l'equip anemomètric de que es disposa en aquest estudi està format per una única sonda de pel·lícula calent. Això representa certes limitacions en quant a la informació experimental que és possible recollir. Un equip d'aquestes característiques permet mesurar el mòdul de la projecció en un pla de la velocitat, essent necessari tenir-lo en compte a l'hora de plantejar les mesures a realitzar i l'anàlisi de les mateixes.

És necessari calibrar la sonda abans de cada sèrie de mesures. En el corresponent Annex 3, es presenten els resultats dels calibratges que s'han realitzat per a poder transformar els valors de tensió que donà l'equip anemomètric en valors de velocitat de l'aire. Cal destacar el bon ajust de la llei potencial corresponent a velocitats de l'aire superiors els 2 m/s en els tres calibratges, essent els errors en tots els casos prou inferior el 10 %. Ara bé, per a velocitats per sota dels 2 m/s els errors són en algun cas superiors el 50 %, el que obliga a limitar a 2 m/s la velocitat mínima que és possible mesurar amb garanties utilitzant aquesta sonda.

En cada punt de mesura s'han pres 512 mostres amb una freqüència de lectura de 1kHz, és a dir, un interval de temps entre la primera lectura i la última de 512 ms (que és el que recomana el fabricant de la sonda).

Per a poder presentar d'una manera clara les velocitats i les posicions dins del cas que se està estudiant, és necessari fixar un sistema de coordenades a partir de les quals estaran referides totes les variables i que coincideix amb el que es va utilitzar en la simulació numèrica. L'origen de coordenades coincideix amb el centre de la cambra d'assaigs del túnel i amb el punt on queda situat l'eix central de la maqueta. L'aire entra dins de la cambra segons la direcció x. Tot això pot apreciar-se en la figura 4.22.



**Figura 4.22: Coordenades de referència.**

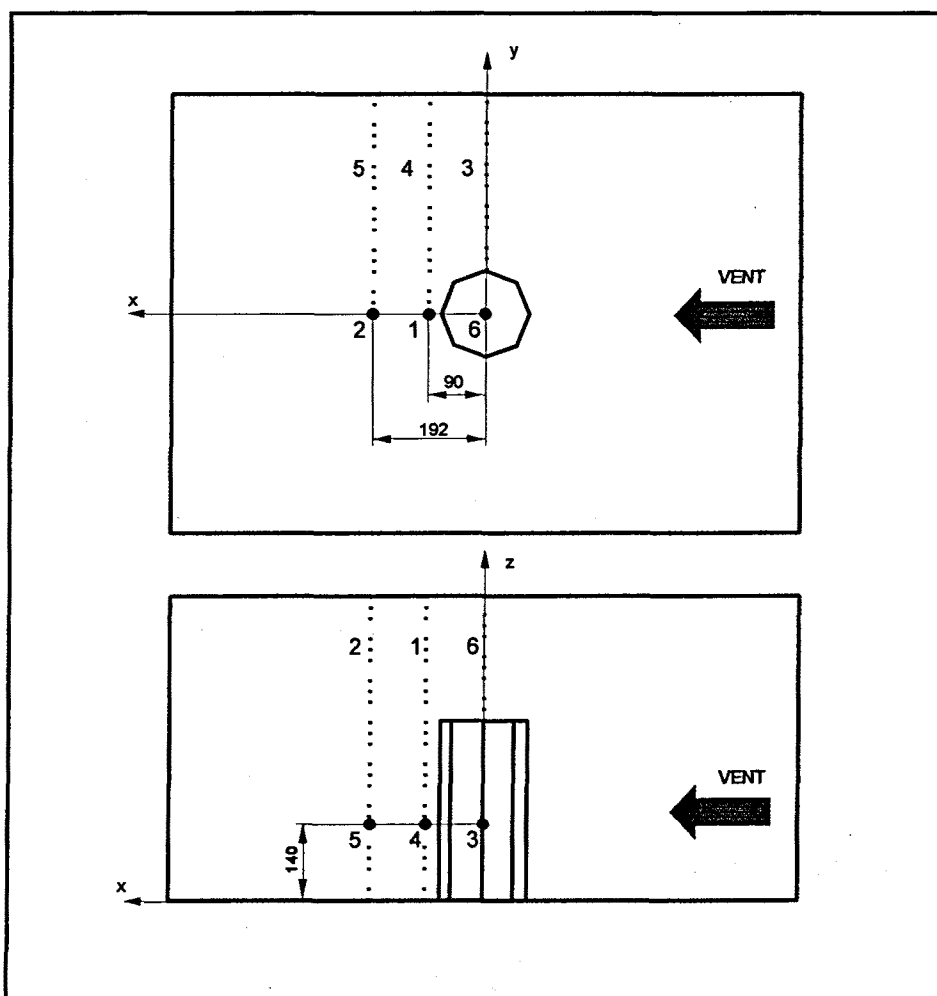
Utilitzant aquests eixos de coordenades les variables  $u$ ,  $v$  i  $w$  són les components de la velocitat en les direccions  $x$ ,  $y$  i  $z$  respectivament. Com l'equip anemomètric mesura projeccions de la velocitat en un pla, utilitzaríem la notació  $uv$  per a parlar de la projecció de la velocitat en el pla format per els eixos  $x$ - $y$ .

S'han realitzat sis sèries de mesures de velocitat per a la posició radial i sis per a la posició



frontal. En ambdós casos, tres sèries desplaçant la sonda al llarg de la direcció z i tres més al llarg de la direcció y, havent escollit les mateixes línies de desplaçament de la sonda per a les dos posicions de la maqueta. En la figura 4.23 pot apreciar-se les posicions de cadascuna de les sèries.

Quan la direcció de desplaçament de la sonda és la "z" es mesura la projecció de la velocitat  $u_v$ , mentre que quan s'utilitza la direcció "y" la projecció mesurada és la  $u_w$ .



**Figura 4.23: Posició de les sèries de mesures de la velocitat.**

Per a identificar cada sèrie s'ha utilitzat la numeració de la figura 4.23 precedida d'una lletra "R" o d'una lletra "F" per a indicar si és tracta de la posició radial o frontal respectivament.

**Resultats de les mesures experimentals de velocitat.-** En les taules de l'Annex 4 i en les figures 4.24 es presenten numèrica i gràficament els valors de la velocitat mesurades en el laboratori.

L'anemòmetre de pel·lícula calent únicament donà valors numèrics i no permet conèixer ni la direcció ni el sentit de la velocitat. Per això, és inevitable tenir que fer una suposició de quin és el sentit associat a aquest valor numèric. En les taules i en les gràfiques 4.24 s'ha tingut que donar un valor positiu o negatiu a les velocitats en funció del coneixement previ de fenòmens semblants (per exemple el cas d'un cilindre o un cub). També en aquest cas el model matemàtic pot ésser de gran ajut, aportant informació de la direcció i el sentit correcte de les velocitats mesurades en cada punt del túnel de vent.

Com criteri de signes s'han pres les projeccions de la velocitat  $u_v$  i  $u_w$  com negatives quan es creu que la component  $u$  de la velocitat ho és.

En les figures 4.24 pot apreciar-se la existència de vòrtex o recirculacions en la part posterior de la maqueta, tant per a la posició radial com per a la frontal. També es veu l'acceleració del fluid al tenir que passar al voltant de l'obstacle.

FIGURA 4.24: MESURES EXPERIMENTALS DE LA VELOCITAT

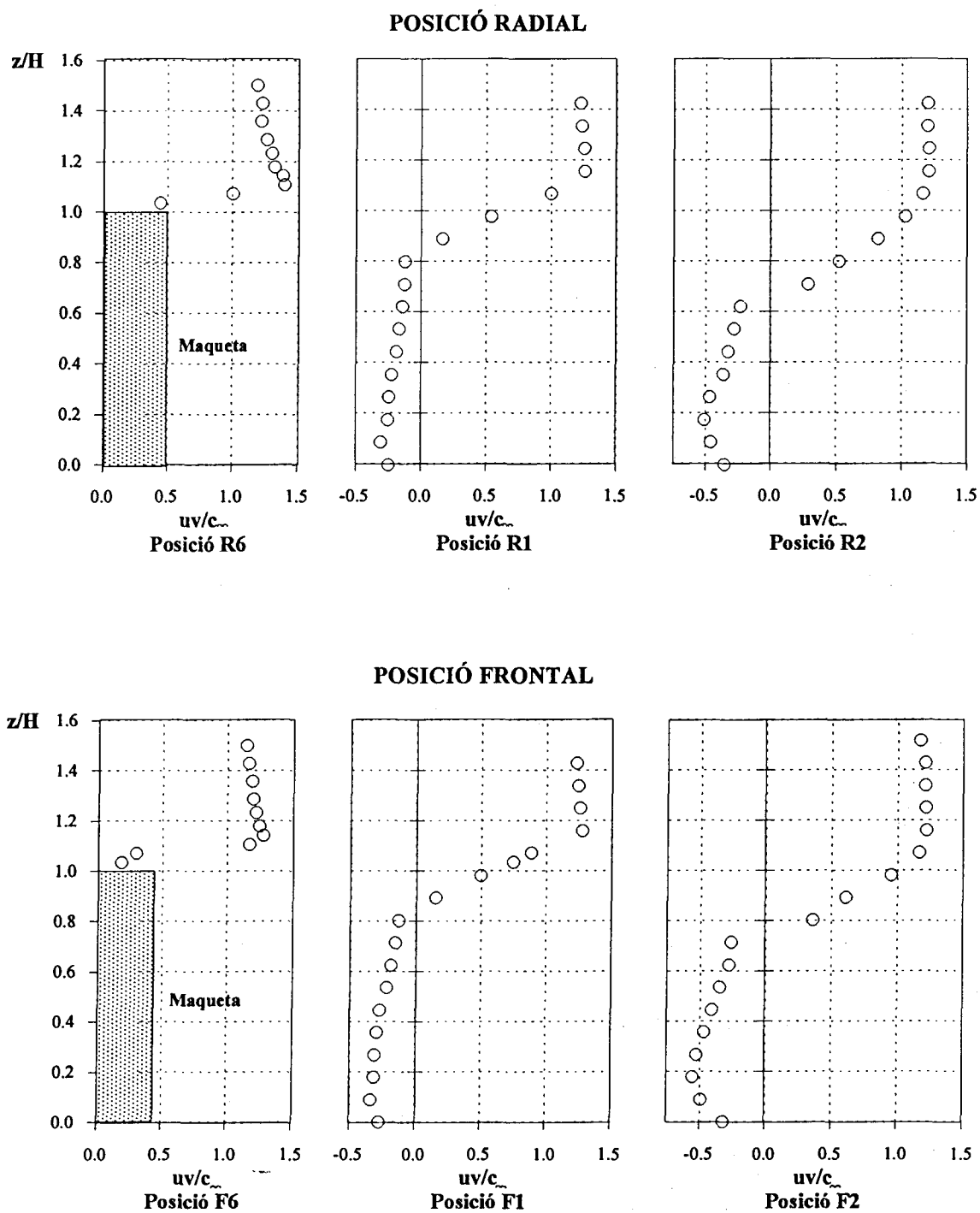
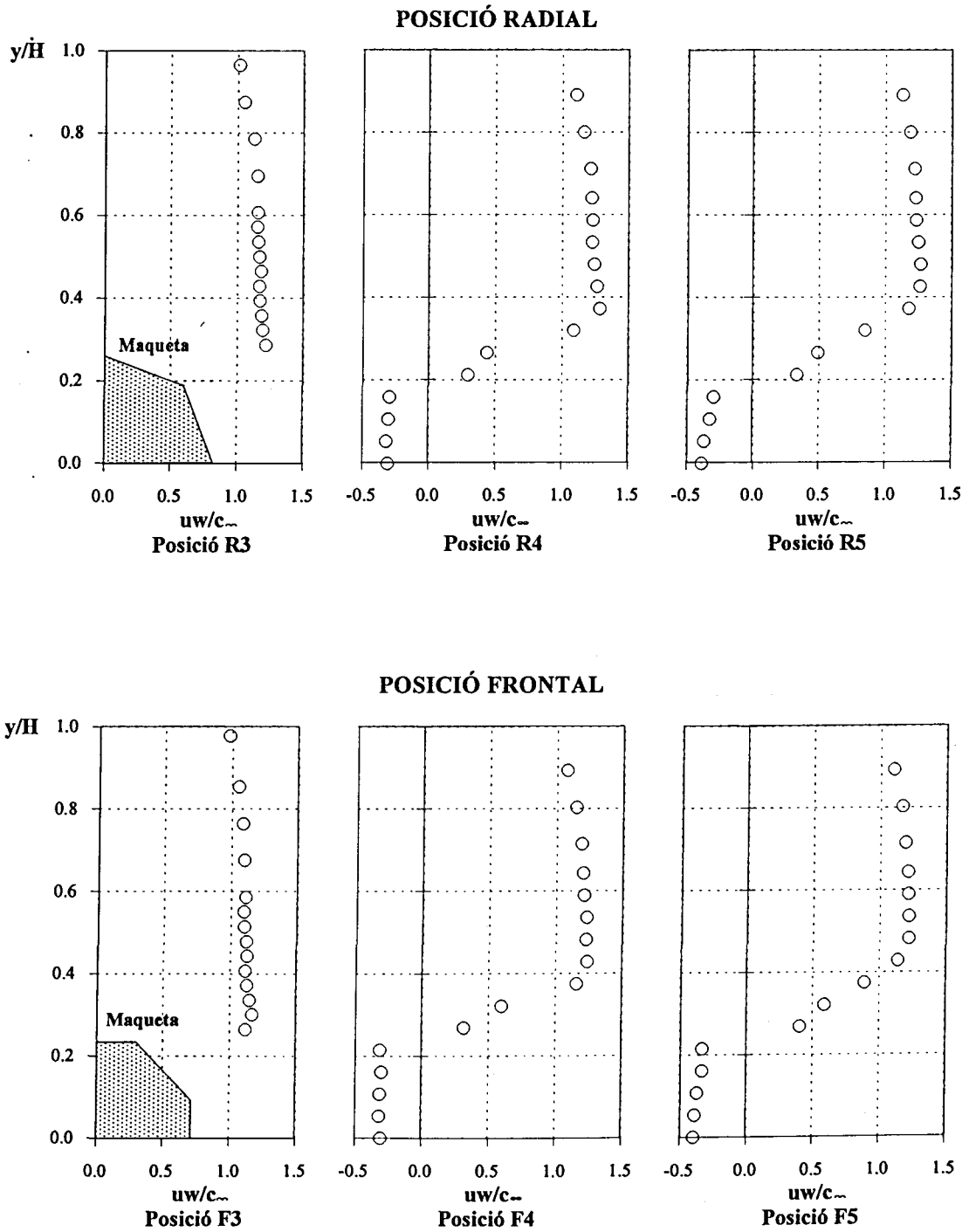




FIGURA 4.24 (Cont.): MESURES EXPERIMENTALS DE LA VELOCITAT



## **4.5 ANÀLISIS DELS RESULTATS ENTRE EL MODEL MATEMÀTIC I L'EXPERIMENTAL:**

En el capítol anterior s'han presentat els resultats de la presa de dades experimental i de la simulació numèrica. Una vegada es disposa d'aquesta informació ha arribat el moment de sotmetre ambdós resultats a comparació. Amb això, es compleix un dels objectius d'aquest estudi, consistent en validar el model matemàtic i posar de manifest les bondat i les limitacions de ambdós models.

La contrastació de resultats es realitza primer amb les velocitats i posteriorment amb els coeficients de pressió.

### **4.5.1 Velocitats.-**

En les figures 4.25 es presenten les mesures experimentals de la velocitat i els valors que per a les mateixes zones del camp fluidic dona el model matemàtic. En aquestes gràfiques s'aprecia un bon ajustatge entre ambdues distribucions de velocitat tant per al cas radial com per al frontal. Únicament, en el deixant que es forma en la part posterior de la maqueta, posicions R2, F2, R5 i F5, apareixen discrepàncies. El model matemàtic sembla infravalorar el vòrtex que es forma en aquesta zona, ja que els valors experimentals de la velocitat mostren una recirculació del fluid clarament més important.

Aquestes discrepàncies estan motivades pel model de turbulència disponible en el programa FIRE, el k- $\epsilon$ . Aquest model dona resultats molt bons en fluxs relativament simples, com flux en canonades, en canals, etc., on la turbulència és isòtropa o poc anisòtropa.

En ell flux al voltant d'un cos rom apareixen zones on les característiques del flux són molt diferents entre si, com són: estancament, separació de capa límit, reenganxament, zona

potencial, recirculació, etc., que dóna lloc a un flux amb turbulència fortament anisòtropa i que canvia molt de unes zones del flux a altres.

Quan la turbulència és fortament anisòtropa el model k- $\epsilon$  tendeix a sobrevalorar, en algunes zones, el terme de producció d'energia turbulenta, que dona lloc a una sobreestimació de la viscositat turbulenta ( $\mu_t$ ). Els efectes excessius de mescla produïts per la  $\mu_t$  eliminen o suavitzen els vòrtex o recirculacions que apareixen en el cas real.

Murakami [26] fa una comparació entre els models de turbulència k- $\epsilon$ , Algebraic Stress Model (ASM) i Large Eddy Simulation (LES), aplicats al flux al voltant d'un cos rom, i comparant-los amb valors experimentals. El seu autor arriba a la conclusió de que per a obtenir un resultat més precís és necessari treballar amb el model de turbulència ASM o encara millor amb el LES. S'ha de tenir molt present que aquests models estan basats en un nombre molt més gran d'equacions que el k- $\epsilon$ , això ens obliga a disposar de una major potència de càlcul i fa que el procés de convergència de tot el model matemàtic sigui més problemàtic.

Finalment, dir que el camp de velocitats obtingut amb el model matemàtic utilitzat, pot millorar-se canviant el model de turbulència, però és qualitativament en tot el camp fluidic i quantitativament en la major part d'aquest, similar al real, i per tant, de gran utilitat per a una comprensió total del fenomen físic que s'està estudiant.



FIGURA 4.25: MESURES EXPERIMENTALS DE LA VELOCITAT ENFRONT A LES VELOCITATS DEL MODEL MATEMÀTIC

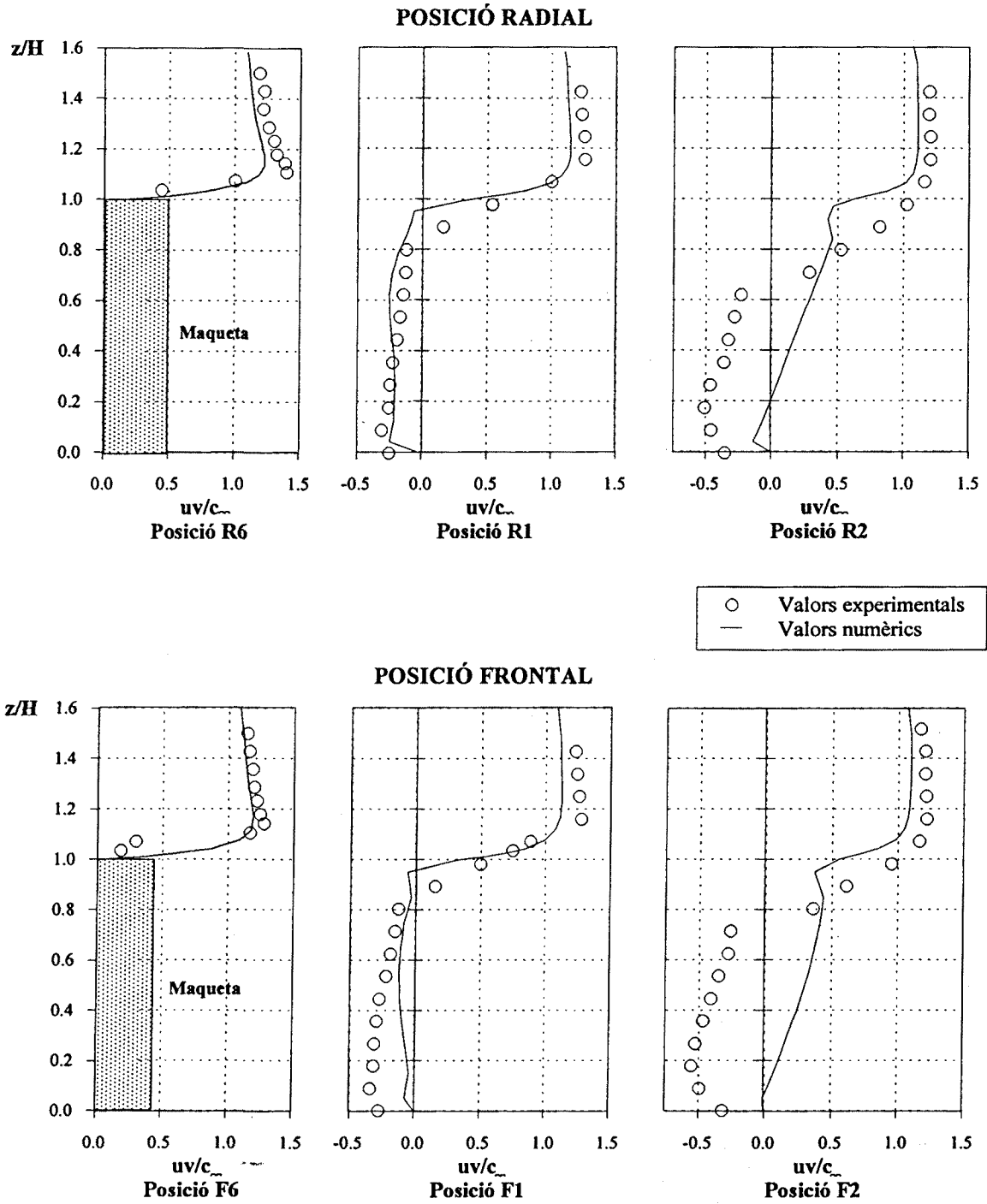
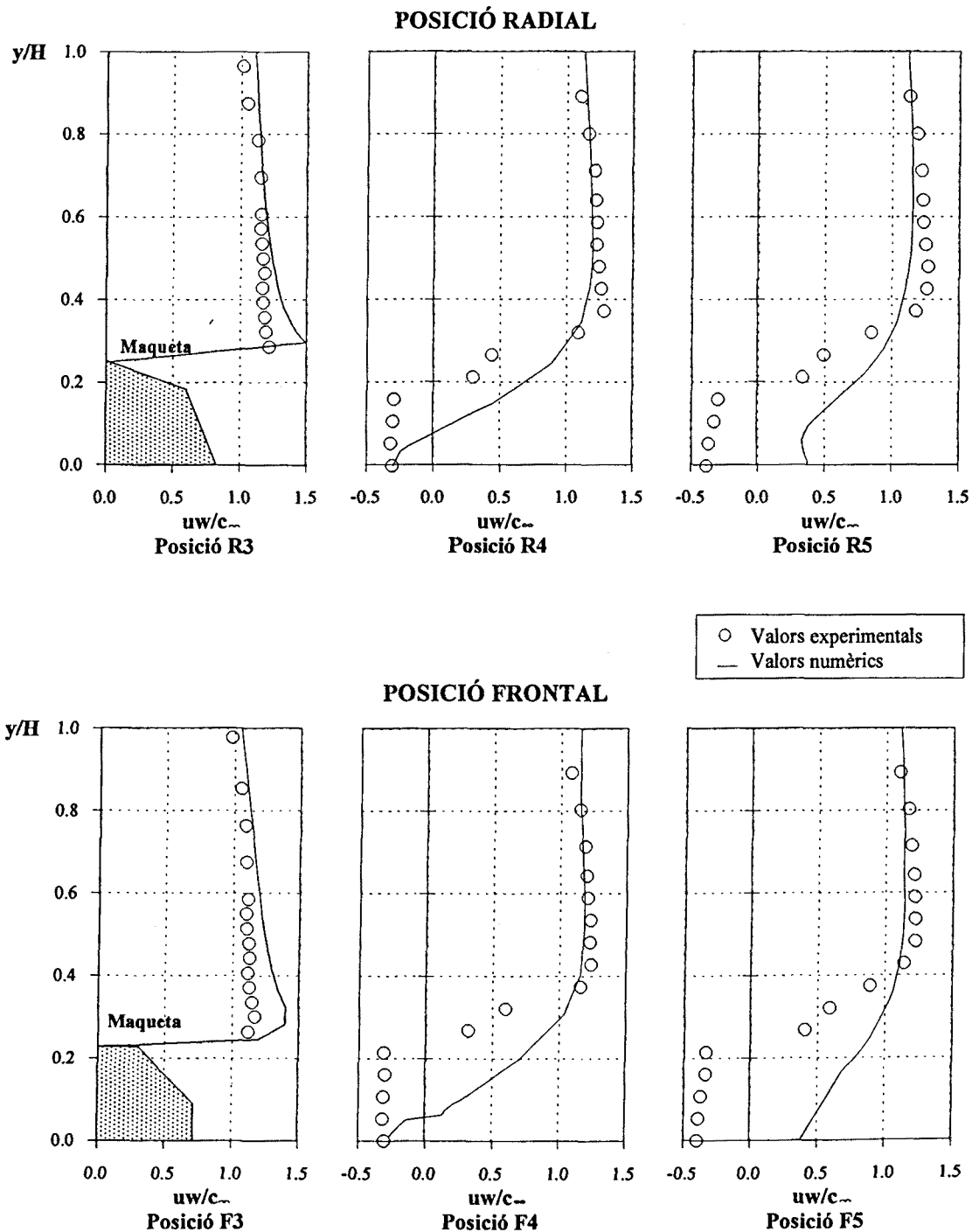


FIGURA 4.25 (Cont.): MESURES EXPERIMENTALS DE LA VELOCITAT ENFRONT A LES VELOCITATS DEL MODEL MATEMÀTIC



#### **4.5.2 Pressions. Coeficients de pressió.-**

Els coeficients de pressió experimentals en la superfície de la maqueta i els del model matemàtic apareixen en les gràfiques de les figures 4.26.

Analitzant primerament el cas radial es veu que les formes de les distribucions de pressions experimentals i del model matemàtic són molt semblants. Respecte als valors, s'aprecien certes discrepàncies, que són màximes en la cara de l'octògon situat a  $67,5^\circ$  i mínimes en la situat a  $157,5^\circ$ . Aquestes discrepàncies tenen dos motius fonamentals:

. En la figura 4.11 c es veu que el gradient de pressions és màxim en la cara de l'octògon situada a  $67,5^\circ$  i mínim en la situada a  $157,5^\circ$ . En les zones d'elevat gradient de pressió pot aparèixer un error en la lectura de les pressions experimentals, motivat per petites desviacions en l'angle a l'hora de posicionar la maqueta en el túnel de vent. També, degut a ésser elevat el gradient de pressions, un petit desplaçament de les isòbares introduïdes pel model matemàtic dona com conseqüència discrepàncies importants.

. Una segona causa és la sobreestimació de la viscositat turbulenta que introdueix el model de turbulència utilitzat.

En la posició frontal el camp de pressions del model matemàtic s'ajusta a l'experimental de forma similar que en la posició radial i igual que succeeix en el cas radial les majors discrepàncies es donen en la cara on el gradient de pressions és més elevat, és a dir, la situada a  $90^\circ$  tal i com pot apreciar-se en la figura 4.15 c.

Finalment, pot dir-se que al igual que en la distribució de velocitats, el camp de pressions té un molt bon ajust qualitatiu i un acceptable ajust quantitatiu, que ens fa pensar en un ampli i profitós ús del model matemàtic, però hem d'ésser conscients del nivell de precisió dels resultats que ofereix.



FIGURA 4.26: COEFICIENTS DE PRESSIÓ EXPERIMENTALS ENFRONT ALS DEL MODEL MATEMÀTIC

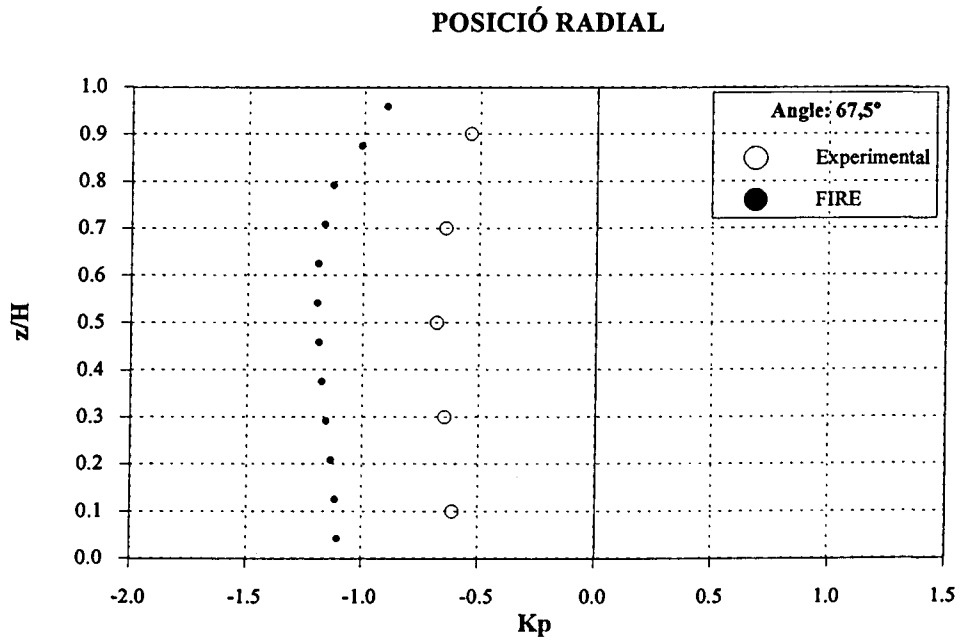
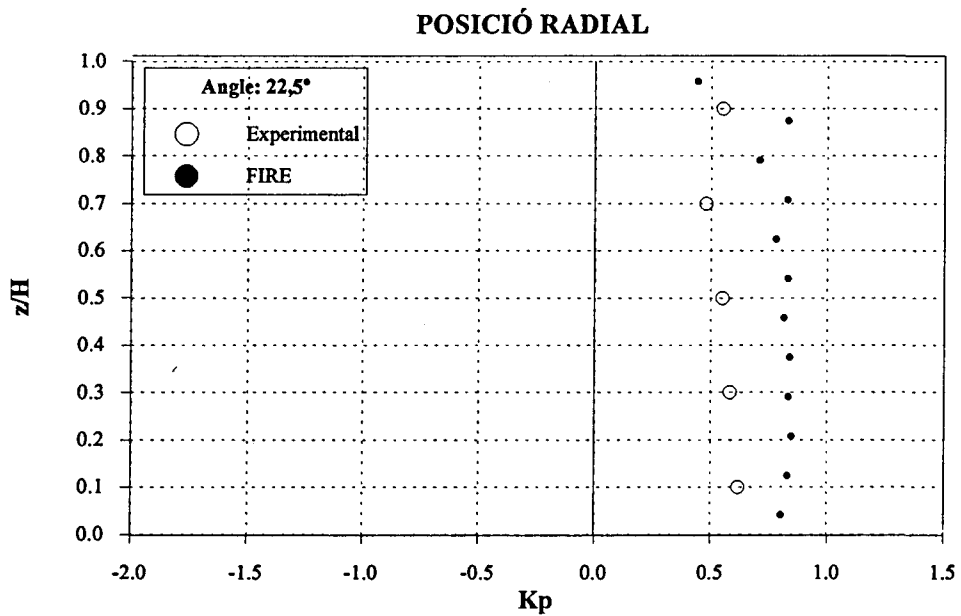


FIGURA 4.26 (Cont.): COEFICIENTS DE PRESSIÓ EXPERIMENTALS ENFRONT ALS DEL MODEL MATEMÀTIC

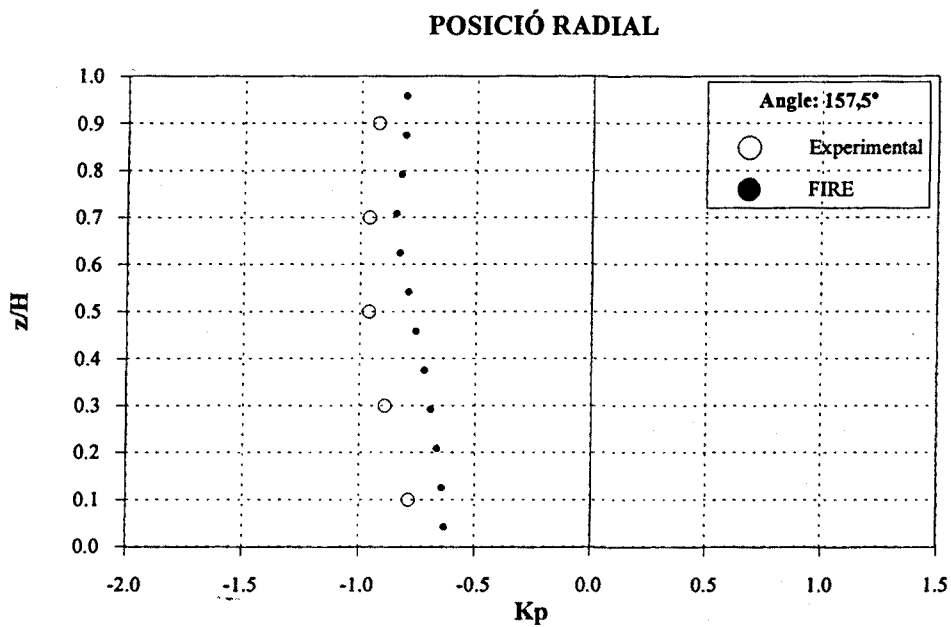
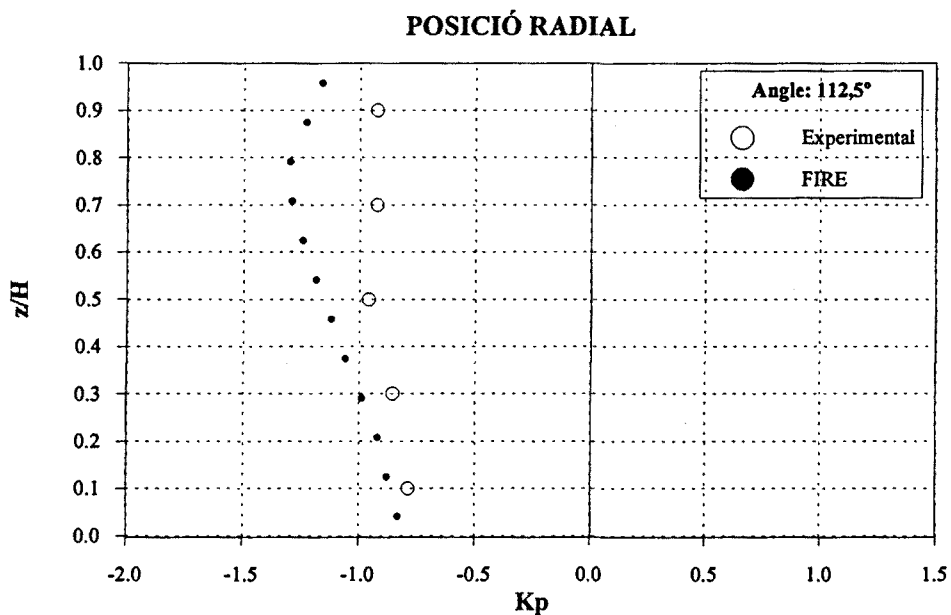


FIGURA 4.26 (Cont.): COEFICIENT DE PRESSIÓ EXPERIMENTALS ENFRONT ALS DEL MODEL MATEMÀTIC

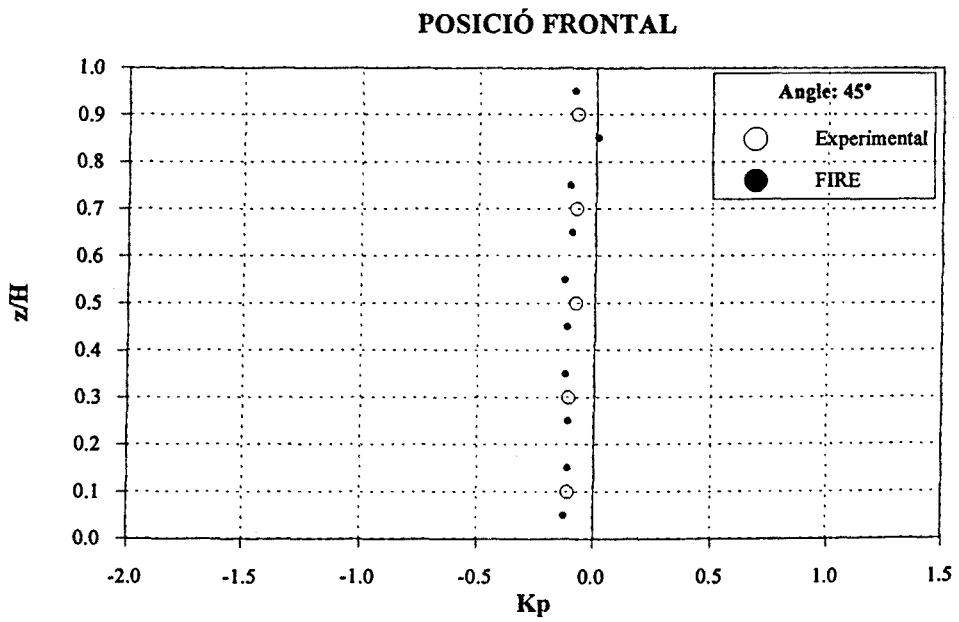
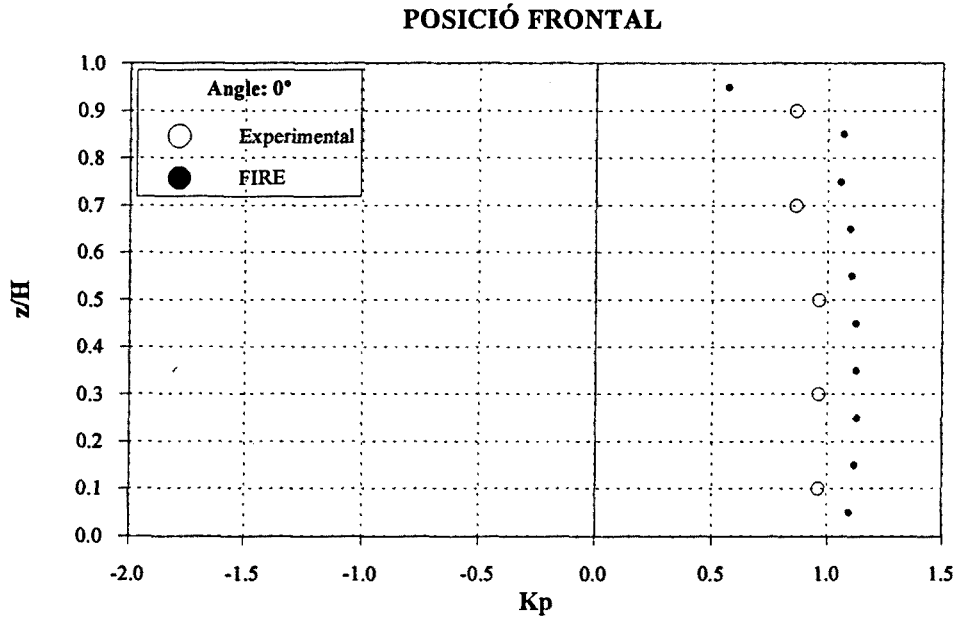




FIGURA 4.26 (Cont.): COEFICIENTS DE PRESSIÓ EXPERIMENTALS ENFRONT ALS DEL MODEL MATEMÀTIC

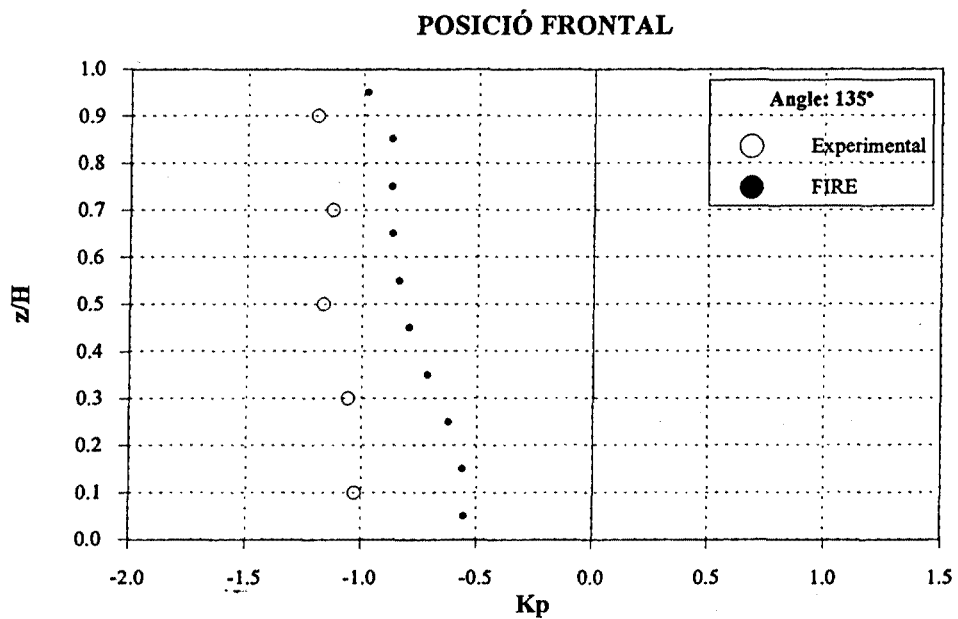
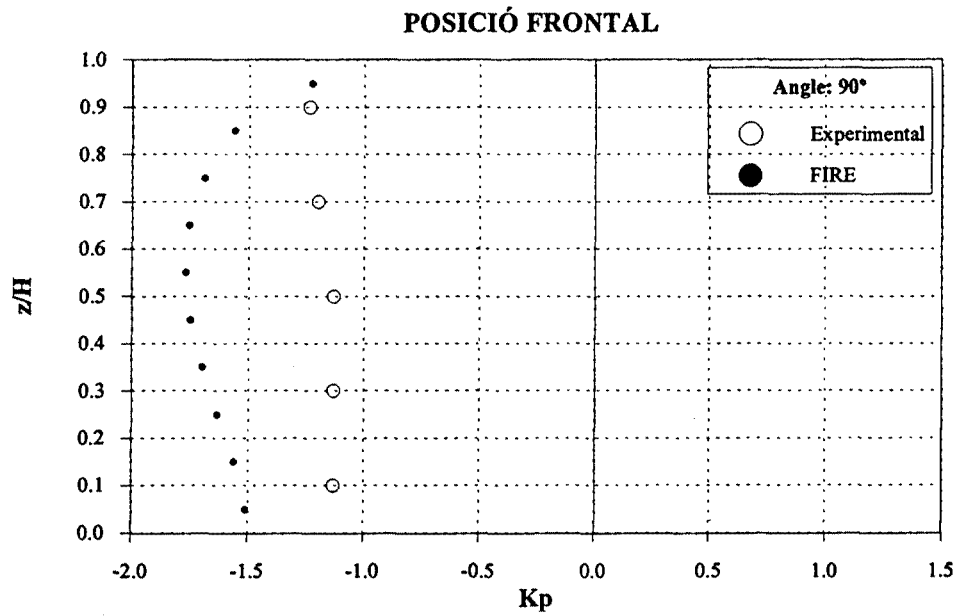
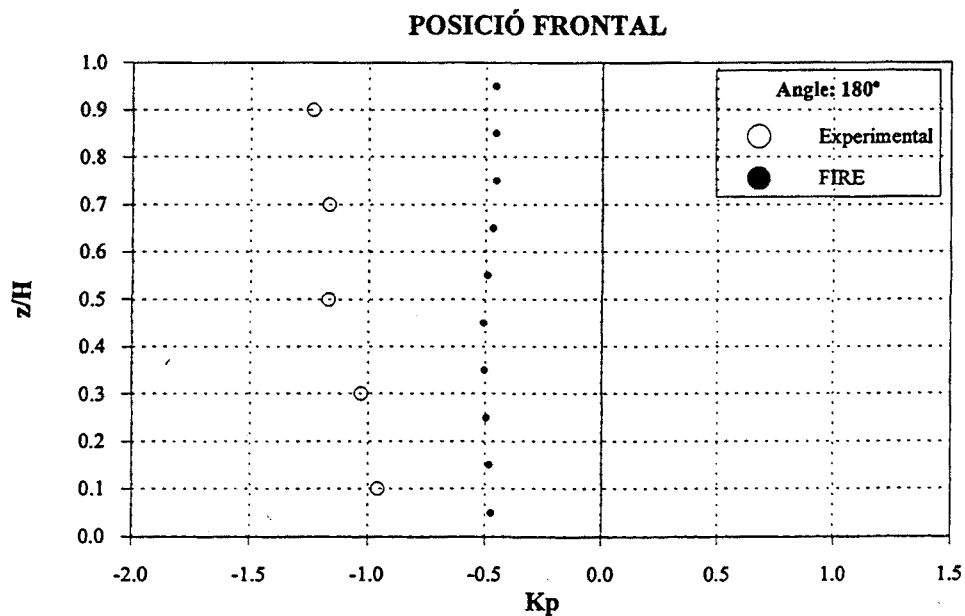


FIGURA 4.26 (Cont.): COEFICIENTS DE PRESSIÓ EXPERIMENTALS ENFRONT ALS DEL MODEL MATEMÀTIC



CAPÍTOL V

**ESTUDI TEÒRIC I  
EXPERIMENTAL RÈGIM  
NO ESTACIONARI**

## V ESTUDI TEÒRIC I EXPERIMENTAL RÈGIM NO ESTACIONARI

### 5.1 INTRODUCCIÓ:

**E**n els capítuls anteriors s'ha considerat que l'efecte del vent es pot assimilar a una acció de tipus estàtic, però això no és del tot cert, doncs aquest efecte es canvia. Des del punt de vista de la mecànica racional és dinàmic, amb totes les implicacions específiques que això comporta entre d'altres, vibracions i ressonància dels elements sol·licitats. Així, un flux com l'aire té una turbulència (de petita o gran escala), que al trobar-se amb un obstacle pot generar tota una sèrie d'estructures coherents dinàmiques (remolins estructurats i generació de vòrtexs).

Sempre que una estructura està exposada al flux d'un fluid s'estableix un camp dinàmic de pressions, que pot excitar vibracions d'amplituds inacceptables. Tradicionalment les estructures sotmeses a aquesta acció estaven construïdes amb molta rigidesa, i per tant es presentaven pocs casos conflictius per vibracions. No obstant en els últims anys, la constant millora dels mètodes de construcció, tenint en compte les innovacions en el domini dels materials, la seva concepció i les noves tècniques de càlcul amb elements finits, s'ha traduït en coeficients de seguretat més petits. Tot això fa que les estructures siguin més lleugeres, més flexibles i més altes, conseqüentment és d'esperar majors deflexions i freqüències pròpies de vibració més baixes. (allò que abans en les estructures més rígides no vibrava ara si ho fa). Aquests factors combinats donen lloc a una gran varietat de vibracions fluidodinàmiques que mai s'havien experimentat en el passat.

Donat que la vulnerabilitat de les estructures als efectes dinàmics del vent ha augmentat, juntament en el fet de que la percepció humana a aquests efectes és molt bona, no ens hem d'arriscar realitzant uns dissenys inadequats, que poden produir problemes de confort Chang [7], Chen & Robertson [8]. Per aquest motiu tenim la necessitat d'estudiar en túnel de vent o "in situ" les característiques dinàmiques, tot observant la resposta estructural. Una

vegada conegudes aquestes, es poden millorar les condicions de disseny de les estructures, de manera que aquestes operin amb una alta fiabilitat, tot evitant trencadisses catastròfiques.

S'han desenvolupat diferents metodologies que, a la llarga, ens permetran efectuar millores en les normatives actuals. Diferents investigadors com Davenport, Simiu [32], Harris, Hertig [19] donen algunes recomanacions per tal d'estudiar aquests efectes dinàmics del vent, i que ja es troben contemplades en algunes normatives ISO [22]:

- 1) Què s'han de tractar separatament a les normes els efectes estàtics dels dinàmics.
- 2) Què aquestes accions s'han de contemplar quan la fluctuació natural del vent sigui elevada, i quan hi hagi possibilitats de ressonància.

En aquesta part de la tesi s'analitzarà la *sistemàtica* (teòrica i experimental) per tal de determinar les accions dinàmiques més comuns que poden actuar sobre les estructures. En primer lloc es descriuen breument quins són els principals tipus de vibració i els mecanismes d'excitació fluidodinàmics.

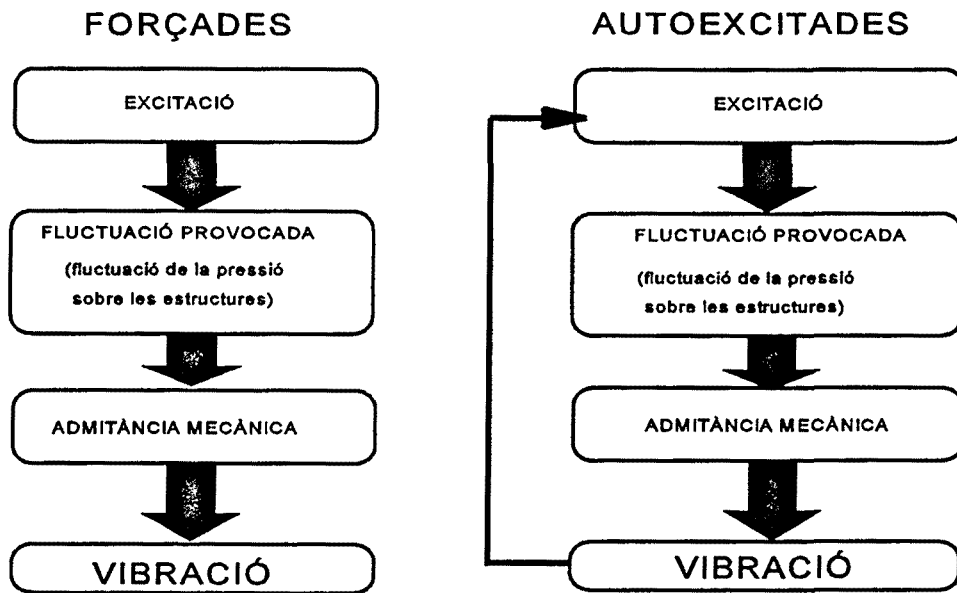
## **5.2 TIPUS DE VIBRACIONS FLUIDODINÀMIQUES:**

Resulta difícil, descriure correctament la disposició del flux abordant un obstacle de forma complexa amb unes cares a pressió, unes zones a depressió i desenganxaments locals més o menys estacionaris. Per aquest motiu, per a representar el procés de les vibracions de les estructures excitées pel vent, assimilariem l'estructura a un sistema on l'entrada serà l'excitació del vent i la sortida les vibracions considerades com la resposta de l'estructura.

Generalment les vibracions d'origen fluidodinàmic es poden classificar segons l'esquema següent (esquema 5.1.)



**Esquema 5.1: Tipus de vibracions fluidodinàmiques**



Moltes vegades l'excitació que produeix la vibració, és externa a l'estructura i independent del seu moviment, en aquest cas tenim vibracions fluidodinàmiques forçades. Altres cops la fluctuació de fluid associada al flux al voltant de l'estructura dona lloc a inestabilitats.

L'excitació generada es pot veure afectada pel moviment estructural que pot modificar les forces del fluid. Un exemple típic és el "vòrtex shedding" d'una estructura cilíndrica, on l'excitació inicial pot ser amplificada per la coincidència de la freqüència del vortex shedding i la pròpia del cilindre (lock-in process). En absència de "lock-in" les forces són únicament

funció del temps, però en canvi si ni ha, es produeix un fenomen de realimentació on el desplaçament estructural controla l'excitació del fluid. Les forces de fluid depenen del temps i del desplaçament, en aquests casos com les amplituds són limitades es denominen vibracions autocontrolades.

Finalment hi han casos on les forces del fluid són induïdes pel desplaçament estructural; en la seva absència no hi ha excitació del fluid. Possibles exemples poden ser el "bending-torsion flutter" i el "galloping". Aquestes són vibracions autoexcitades que poden produir fàcilment trencadisses en l'estructura.

### 5.2.1 Mecanismes d'excitació.- Aquests mecanismes es descriuen a continuació:

\* **Excitació per turbulència.**-El flux turbulent es caracteritza per fluctuacions aleatòries dels camps de velocitat i de pressió, i per una mescla interna del fluid. Per tant, es pot assegurar que la turbulència és rotacional i tridimensional, i està caracteritzada pels alts nivells de vorticitat fluctuant (Tennekes & Lumley [37]). Com ja hem vist, es pot definir la velocitat instantània  $v$  com la suma de la velocitat mitjana  $\bar{v}$  més la component fluctuant de la velocitat  $v'$

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

$$\text{Essent } \bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt$$

L'existència d'un ampli espectre de grandàries de remolins i l'espectre corresponent de freqüències de fluctuació, són les principals característiques dels fluxs turbulents. Els remolins més grans, que estan associats amb les fluctuacions de baixa freqüència, queden determinats per les condicions de contorn del flux i la seva grandària és del mateix ordre de

magnitud que la del domini ocupat pel fluid en moviment. Els remolins més petits, associats amb les fluctuacions d'alta freqüència estan determinats per les forces viscoses.

\* **Despreniment de vòrtexs.**- De les observacions efectuades per Roshko (1993), es pot dir que “la problemàtica de l'estudi del flux al voltant d'un cos queda quasi en l'empíric, en el domini descriptiu del coneixement”, encara que el coneixament d'aquest flux és extens. aquest tema ha adquirit una importància rellevant. En el nostre cas, amb règims de nombres de Reynolds alts, les estructures tridimensionals dels vòrtexs es desenvolupen i són l'origen de les ja clàssiques mesures de Strouhal de la freqüència del soroll produït pel trasllat d'aquest remolins a través de l'aire. És en aquest domini de nombres de Reynolds on apareix la nomenada inestabilitat dels vòrtexs, detectant-se valors de nombres de Strouhal elevats de l'ordre de 0,4 segons Bearman (1969) i Roshko (1993) [41]. Aquests valors alts venen identificats per la contracció del deixant, produït per l'endarreriment del punt de separació. Per aquest motiu la freqüència de despreniment de vòrtexs al deixant d'un cos produeix una excitació característica que depèn del punt de separació, de la velocitat del corrent lliure ( $Re$ ), de la forma del cos i dels contorns que l'envolten.

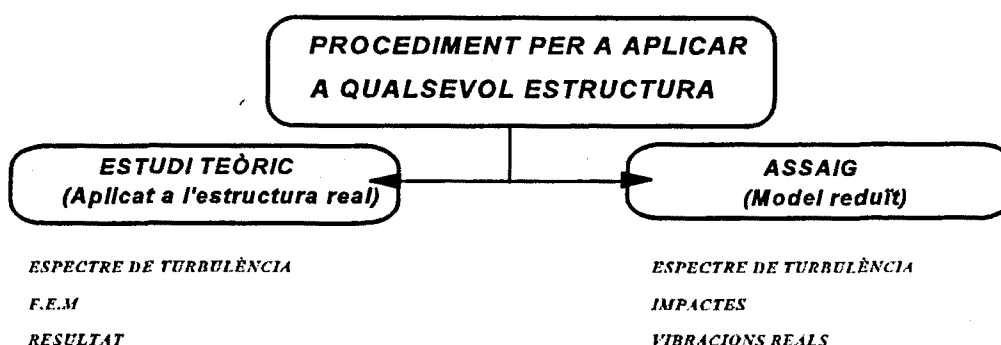
### **5.2.2 Resposta estructural.-**

Per a saber a l'etapa de disseny, si és previsible algun tipus de ressonància que pugui incrementar la vibració estructural, ja sigui en una vibració forçada o en una autoexcitada, s'ha de conèixer la resposta estructural, en particular interessa saber quins són les freqüències pròpies de l'estructura. Aquesta resposta, per construccions senzilles, pot calcular-se teòricament d'una manera aproximada mitjançant fórmules. Per a estructures més complexes es sol utilitzar el mètode dels elements finits.

### 5.3 METODOLOGIA D'ESTUDI:

El procediment per a l'estudi d'un flux no estacionari sobre una estructura, pot ésser el indicat en l'esquema 5.2.

**Esquema 5.2: Procediments a utilitzar**



#### 5.3.1 Mètodes teòrics.-

Per a les accions estàtiques, l'experiència adquirida ens permet establir unes normes i unes regles senzilles per a la seva utilització en el disseny d'estructures. En canvi, les accions dinàmiques exercides pel vent són encara poc conegudes, ja que el càlcul en sí, és relativament complex i totes les situacions no poden ser resoltes. Tot i això, poden justificar-se diferents metodologies, disposicions i regles a la vista dels resultats obtinguts teòrica i experimentalment.

Mitjançant mètodes estadístics es pot aproximar el comportament de les accions del vent i es pot determinar el rang de freqüències d'excitació produïdes per la turbulència. Fent la simulació per mètodes d'elements finits es pot determinar el comportament dinàmic de les estructures calculant les freqüències pròpies i modes vibratoris.

El pioner en l'establiment dels mètodes teòrics de càlcul d'estructures sotmeses a l'acció del vent és en Davenport [11]. Aquests estudis es descomponen en tres grans grups:

- el coneixement de les característiques del vent i la descripció dels esforços que indueix sobre l'estructura;
- l'estudi de la resposta de l'estructura a aquests esforços;
- l'estudi a la fatiga.

Els edificis de dimensions excepcionals que són susceptibles a oscil·lacions, no entren dins de les prescripcions generals de les regles. Per a concretar el seu comportament, sota l'acció dinàmica de les ràfegues del vent, s'han de determinar a partir d'assaigs efectuats en un túnel de vent, simulant correctament tots els factors de contorn (rugositat del terreny, direccions predominants del vent, etc.)

### **5.3.2 Mètodes experimentals.**

***Assaig en túnel de vent.***- Encara que es puguin determinar les càrregues del vent sobre les estructures, la comprensió dels mecanismes de la turbulència amb els seus nombrosos efectes sobre una estructura no estan suficientment clars com per poder-los aproximar analíticament. Cal per això, fer una modelització en un túnel de vent i realitzar l'estudi experimental de les interaccions *vent-estructura*.



Perquè els resultats obtinguts siguin comparables als de l'estructura real, s'ha de complir la similitud del vent.

**Similitud del vent:** Els assaigs en túnel de vent s'han de fer segons els criteris de semblança adequats, a fi de determinar els esforços mitjans i dinàmics sobre l'estructura de grandària real. Per aquest motiu l'aproximació del flux en la capa límit atmosfèrica suposa l'obtenció experimental del gradient vertical de velocitats, el qual ha d'ésser idèntic el que hi ha a la realitat.

En les proves en un túnel de vent les fluctuacions de la velocitat jugan un paper important, per poder-ho extrapolar a la realitat, i també per a la comparació dels resultats obtinguts en altres túnels. La magnitud d'aquestes fluctuacions en el túnel aerodinàmic està determinada decisivament per l'amplada de les malles i dels tamissos del túnel. A una certa distància darrere del tamís reina l'anomenada turbulència isòtropa, és a dir, un corrent turbulent en el que la fluctuació mitjana és la mateixa en totes les direccions.

#### **5.4 MÈTODES TEÒRICS ESTADÍSTICS:**

Per tal de realitzar aquest apartat, primer haurem de caracteritzar el vent i després veure quina és la resposta de l'estructura, descrivint diferents metodologies estadístiques (Davenport, Simiu, etc.) per a determinar les característiques dinàmiques del vent provades a partir de diferents estudis experimentals.

Els estudis realitzats per en Davenport, Harris, Simiu, Soize [34] i d'altres investigadors ens permeten caracteritzar el procés aleatori de la turbulència del vent d'una manera teòrica, sense necessitat d'obtenir els registres a una determinada alçada i en un lloc geogràfic determinat, ni estudiar l'autocorrelació, la variància, ni l'espectre d'aquest.

En funció d'aquests estudis, es pot assumir que els processos no estacionaris del vent es poden classificar en dos grups, segons si fan referència al *domini del temps* o al *domini de la freqüència*. Essent les funcions principals que s'utilitzen:

- Dins del primer grup, la funció d'autocorrelació

$$R_u(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T u(t) \cdot u(t+\tau) \cdot dt$$

- Dins del segon grup, la funció de densitat espectral de potència

$$S_v(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi \cdot T} |F_T(\omega)|^2$$

on  $F_T$  és la funció transformada de Fourier, i T el temps.

## CARACTERITZACIÓ DEL VENT

La circulació atmosfèrica i la distribució estadística dels diferents camps (pressió, velocitats, etc.) són poc coneguts. Així, per a una alçada compresa entre els 0 i els 600 metres, és a dir en la zona on cal tenir en compte la capa límit atmosfèrica, el vent es troba alentit pels fregaments sobre la superfície del terra, la qual cosa genera fluctuacions en el flux (turbulència). Es fa necessari per tant estudiar la velocitat i la pressió.

**ESTUDI DE LA VELOCITAT.**- Al llarg de la vida d'un edifici la seva estructura es sotmesa a l'acció del vent, que bé es pot estudiar en un període de temps (període de retorn) a *curt termini* (entre 10 minuts i una hora) o a *llarg termini* ( $\geq 1$  any).

*A curt termini*, es consideren cadascun dels valors de la velocitat com una variable aleatòria contínua i s'estudien les conseqüències de la seva llei de distribució, admetent que, per tractar-se d'un fenomen natural segueix una llei de distribució normal caracteritzada pel seu valor mitjà i la seva desviació tipus; a més a més cal conèixer la correlació o dependència estadística de les velocitats en dos punts dins d'aquest període per d'aquesta manera considerar els efectes de la variació de la pressió.

*A llarg termini*, cal veure la distribució dels valors màxims de la velocitat mitjana horària del vent en el transcurs dels anys.

**Velocitat mitjana horària màxima.**- Els paràmetres estadístics de la velocitat oscil·lant  $v'$  poden trobar-se a partir de les característiques de la zona on es troba la construcció i de la velocitat mitjana horària màxima del vent, en forma de termes de risc i prenen com a base les velocitats registrades durant un període de temps  $T$ . Per tant ens interessa conèixer entre d'altres:

Estudi teòric i experimental règim no estacionari

- a) quina és la velocitat mitjana horària màxima ( $\bar{v}_{\text{màx}}$ )?
- b) quina és la probabilitat P de que cada any es produeixi una  $\bar{v}_{\text{màx}}$ ?
- c) quina és la probabilitat de que  $\bar{v}_{\text{màx}}$  es produeixi en el temps T?
- d) quina és la probabilitat de que  $\bar{v}_{\text{màx}}$  no es vegi sobrepassada en un temps T?

Freqüentment és suposa una distribució exponencial d'aquestes velocitats en un any, però aquesta no és necessàriament una distribució normal (gaussiana), sinó que segueix una distribució de Gumbel acumulada, del tipus:

$$F_v(\bar{v}) = \int_0^{\bar{v}} f_v(\bar{v}) \cdot d\bar{v}$$

on  $f_v$  és la distribució de Gumbel de les velocitats mitjana horàries màximes.

El període de retorn T ve relacionat amb  $\bar{v}_{\text{màx}}$  per:

$$T = \frac{1}{P \left| \bar{v} > \bar{v}_{\text{màx}} \right|} = \frac{1}{1 - F_v(\bar{v}_{\text{màx}})}$$

expressió que ens permetrà obtenir el valor de  $F_v(\bar{v}_{\text{màx}})$  i contestar l'apartat a)

$$P_2 = P \left[ \bar{v} \geq \bar{v}_{\text{màx}} \right] = 1 - F_v(\bar{v}_{\text{màx}})$$

expressió que ens permetrà contestar a l'apartat b)

$$P_3 = 1 - \left[ F_v(\bar{v}_{\text{màx}}) \right]^T$$

expressió que ens permetrà contestar a l'apartat c)

$$P_4 = 1 - \left[ F_v(\bar{v}_{\text{màx}}) \right]^T$$

expressió que ens permetrà contestar a l'apartat d)

**Variació de la velocitat mitjana del vent amb l'alçada.-** Per tal de definir el perfil de la velocitat mitjana del vent amb funció de l'alçada hi han diferents lleis, les més utilitzades són la potencial i la logarítmica.

Segons Davenport (1975), es pot expressar com una llei potencial:  $\bar{v}(z) = v_g(z/z_g)^\alpha$ ; on  $\alpha$  és un nombre adimensional que caracteritza la rugositat del terreny,  $v_g$  és la velocitat de referència i  $z_g$  indica una alçada de referència. Valors que depenen del tipus de terreny (més o menys exposat).

Segons Prandtl, i altres autors com A.K.Blackader, H. Tennekes [37], N.C. Helliwell (1973), també pot expressar-se com una llei logarítmica

$$\bar{v}(z) = 2,5 \cdot v_* \cdot \ln \left| \frac{z - z_d}{z_0} \right|$$

on  $z_0$  és la longitud de rugositat,  $z_d$  un paràmetre de referència i  $v_*$  la velocitat de fricció, que val:  $V_* = 0,0806 \cdot p \cdot V(10)$ . Valors que són funció també del tipus de terreny. Aquests autors han demostrat que per a velocitats del vent elevades, aquesta llei es pot aplicar a tot el rang d'altures pròpies del disseny estructural.

**Velocitat oscil·lant.-** Per a determinar la velocitat de fluctuació (oscil·lació), es pot suposar que la component de ràfega que origina aquesta velocitat té una durada de 2 a 3 segons, entenen per factor de ràfega ( $G^*$ ) la relació entre la màxima velocitat de fluctuació i la velocitat mitjana horària.

Els efectes generalment dinàmics de la velocitat oscil·lant del vent sobre una estructura s'estudien a partir de la teoria de les vibracions aleatòries. Per això, és precís conèixer prèviament les propietats estadístiques de les velocitats segons les hipòtesis: -  $v'$  és independent del temps (procés estacionari), -  $v'$  és independent de l'interval de temps considerat (procés ergòdic).



### Estudi teòric i experimental règim no estacionari

Estudis empírics, han demostrat que no només és possible establir un espectre per a un punt concret si no que aquest espectre pot ser generalitzat per a diferents condicions, introduïnt les següents variables:

- $v(z)$  velocitat mitjana horària del vent per a una altura  $z$  sobre el terra
- $v(10)$  velocitat mitjana horària del vent per a una altura de 10 m sobre el terra
- rugositat del terreny

Utilitzant les expressions que a continuació es descriuen trobem l'espectre de les velocitats fluctuants del vent. Així, Davenport i Harris (1961) per tal de determinar l'espectre generalitzat del vent, donen com expressió, la següent:

$$\frac{f \cdot S_v(f)}{K_v \bar{v}^2(10)} = \frac{4 \cdot \chi^2}{(1 + \chi^2)^{4/3}}$$

on  $f$  és la freqüència en Hz,  $S_v(f)$  l'espectre de potència de fluctuació de velocitats,  $K_v$  el coeficient de rugositat i  $\chi$  val:

$$\chi = \frac{1200 \cdot f}{\bar{v}(10)}$$

Aquesta equació no reproduïx correctament la dependència de l'altura sobre el terra a la part de l'espectre corresponent a les freqüències elevades. Simiu (1974) proposa:

$$\frac{f \cdot S_v(f, z)}{v_*^2} = \frac{2 \cdot \omega \cdot \Omega}{(1 + 50 \cdot \Omega)^{5/3}}$$

essent,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , i  $\Omega$  la freqüència màxima o densitat espectral de potència. A més a més, com  $\Omega = f z / \bar{v}(z)$ , queda:

$$S_v(f, z) = 2 \cdot \pi \cdot S_v(\omega, z)$$

De totes aquestes consideracions resulta una equació que és semblant a la obtinguda per en Davenport i Harris.

$$\frac{f \cdot S_v(f, z)}{v_*^2} = \frac{4 \cdot \Omega^2}{(1 + \Omega^2)^{4/3}}$$

**ESTUDI DE LES PRESSIONS.**- En aquest subapartat s'ofereix una panoràmica dels factors que influeixen en la determinació del coeficient eòlic  $C_D$ , així com intentar entendre les causes que motiven l'aparició de pressions en un obstacle, quan el vent xoca contra ell.

**Factors que influeixen en el valor del coeficient eòlic.**- En un flux estacionari la relació entre la pressió estàtica i la velocitat en una línia de flux, ve donada per l'equació de Bernouilli  $q + 1/2 \rho v^2 = C_t$ , on  $q$  és la pressió estàtica,  $\rho$  la densitat del fluid i  $v$  la velocitat, la pressió màxima  $q_{m\grave{a}x} = 1/2 \rho v^2$ .

Al incidir el vent en una superfície qualsevol, tenim una distribució de pressions (positives o negatives) en cada punt que valen  $q = 1/2 K_p \rho v^2$ , on  $K_p$  és el coeficient de pressió que depèn del nombre de Reynolds.

En el fenomen de generació d'aquestes pressions, les línies de corrent són desviades formant-se vòrtexs en el deixant. L'energia generada per aquests remolins, crea succions en la part posterior de l'obstacle contribuïnt en la força en conjunt que el vent fa sobre el cos.

Les forces de pressió actuen normalment a les superfícies del cos, integrant els vectors de pressió, que actuen perpendicularment a la superfície del cos, en la direcció del vent i en la

perpendicular sobre tota la superfície del cos, tenim les forces d'arrossegament i les forces normals, a més a més de les forces de fricció causades per la viscositat del fluid i que actuen tangencialment a la superfície.

La pressió mitjana  $q = 1/2 C_D \rho v^2$  és funció del coeficient d'arrossegament, coeficient eòlic o de resistència a l'avanç  $C_D$ . Aquest coeficient val  $C_D = K \cdot C_{D\infty}$ , on  $C_{D\infty}$  és el coeficient eòlic per a un cos de longitud infinita i  $K$  un coeficient corrector que depèn de l'esveltesa de l'edifici i del fet de que un dels extrems de l'estructura està recolzat al terra i té una longitud finita (Canet 1984 [6]).

**Espectre de les pressions produïdes pel vent.**- La següent expressió ens indica que les pressions es poden convertir en una pressió mitjana  $q^- = 1/2 \rho C_D v^-^2$  i en una oscil·lant al voltant de la mitjana del valor  $q' = \rho C_D v^- v'$ .

$$q = 1/2 \rho C_D v^2 = 1/2 \rho C_D (v^- + v')^2 \approx 1/2 \rho C_D v^-^2 + \rho C_D v^- v'$$

Igualment que en el cas de les velocitats es pot trobar la funció de correlació-creuada de les pressions oscil·lants del vent en dos punts  $i, j$ . Prenent transformades de Fourier, s'obté l'expressió del cross-espectre de les pressions oscil·lants.

$$S_{q'iq'j} = \rho^2 \cdot C_{Di} C_{Dj} S_{v'iv'j}$$

## RESPOSTA DE L'ESTRUCTURA

Ens proposem en aquest subapartat, i en funció dels elements estudiats en els apartats anteriors, arribar a determinar una sèrie de paràmetres estadístics amb els que poder determinar la resposta estructural.

**Espectre de potència dels desplaçaments horitzontals.-** Donada una estructura qualsevol en absència d'amortiment, aquesta vibra lliurement en una sèrie de modes (autovectors del sistema  $\Phi$ ).

$$\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_r$$

A cadascun d'aquests modes estan associats uns autovalors ( $\omega$ ) nomenats freqüències pròpies circulars del sistema  $\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r$

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_r$$

Durant una vibració, el desplaçament en qualsevol punt  $\bar{z}_g$  de l'estructura es pot escriure com:

$$u_g(t) = u(\bar{z}_g, t) = \sum_r \Phi_r(\bar{z}_g) y_r(t)$$

on  $y_r(t)$  és la coordenada generalitzada del mode  $r$ .

Quan el sistema amb amortiguament està sotmès a una càrrega depenent del temps, el desplaçament en cadascun dels modes de vibració està governat pel mateix tipus d'equació que els sistemes amb un grau de llibertat. Partint de consideracions d'energia del sistema, cadascuna d'aquestes equacions s'escriu, segons Beards (1983) [3]:

$$M_r \ddot{y}_r + C_r \dot{y}_r + K_r y_r = F_r(t)$$

On cadascun dels coeficients valen:

$$M_r = \int_A m A \Phi_r^2(z) dA$$

$$C_r = 2\xi_r M_r$$

$$K_r = \omega_r^2 M_r$$

on  $(mA)$  és la massa per unitat d'àrea i  $\zeta_r$  és el tant per un d'amortiguament. Per tant la força, val:

$$F_r(t) = \int_A q(\bar{z}, t) \Phi_r z dA$$

i  $q(\bar{z}, t)$  són les pressions dinàmiques aplicades sobre l'estructura.

Podem calcular la densitat espectral de potència del desplaçament horitzontal en un punt qualsevol calculant la funció d'autocorrelació del desplaçament.

$$R_{u_g u_g}(\tau) = \sum_r \sum_s \phi_r(\bar{z}_g) \phi_s(\bar{z}_g) R_{y_r y_s}(\tau)$$

**Desplaçaments mitjans i màxims. Factor de pic i de ràfaga.**- Ens interessa trobar el desplaçament màxim que es produeixi en qualsevol punt, independentment del temps  $t$  en el que aquest valor s'assoleix. Segons Davenport pot expressar-se el desplaçament màxim en termes de factor de pic.

$$u_{m\grave{a}x}(\bar{z}_g) = G^*(\bar{z}_g) \bar{u}(z_g)$$

$$u_{m\grave{a}x}(\bar{z}_g) = \bar{u}(\bar{z}_g) + g_u(\bar{z}_g) \cdot \sigma_u(z_g) = \bar{u}(\bar{z}_g) \left| 1 + g_u(\bar{z}_g) \frac{\sigma_u(z_g)}{\bar{u}(\bar{z}_g)} \right|$$

essent  $g_u(\bar{z}_g)$  el factor de pic de la part oscil·lant dels desplaçaments  $u(\bar{z}_g)$  i  $\sigma_u(\bar{z}_g)$  l'arrel quadrada de la variança dels desplaçaments  $u(\bar{z}_g)$ .



De comparar les últimes expressions es dedueix que:

$$G^*(\bar{z}_g) = 1 + g_u(\bar{z}_g) \frac{\sigma_u(z_g)}{\bar{u}(\bar{z}_g)}$$

El problema queda per tant reduït en trobar el valor del factor de pic  $g_u(\bar{z}_g)$ , en aquest cas Davenport (1967) proposa:

$$g_u(\bar{z}_g) = \left| 2 \ln |f_c(\bar{z}_g)T| \right|^{1/2} + \frac{0,5772}{\left| 2 \ln |f_c(\bar{z}_g)T| \right|^{1/2}}$$

On  $T = 3600$  s i  $f_c = f_1$ , essent  $f_1$  la freqüència fonamental de l'estructura.

Aquest és el procediment general per a obtenir els desplaçaments màxims de l'estructura. La idea és realitzar una sèrie de hipòtesis per a poder simplificar les equacions mostrades anteriorment. Hi han dues metodologies ven diferenciades per a estudiar de manera estadística els efectes dinàmics del vent sobre les estructures i que són: *La metodologia de Davenport i la de Simiu (veure Annex 5).*

### **5.5 MÈTODES EXPERIMENTALS:**

Donat que les aproximacions teòriques no donen els resultats adients i tenen unes certes limitacions, moltes vegades es fa necessari una investigació experimental en un túnel de vent.

**Introducció.-** S'ha de conèixer quina és la interacció que fa el vent sobre l'estructura i determinar les freqüències pròpies i de despreniment de vòrtexs. Tot comprovant que no hi hagi cap tipus de coincidència, és a dir, que la freqüència pròpia de l'estructura ha d'ésser molt diferent de la del fluid, d'aquesta manera evitaríem tenir problemes; si no, hem d'aconseguir amortir-la per tenir-la fora de la mateixa banda de freqüència, ja sigui fent l'estructura més rígida, canviar el disseny o col·locar elements absorbents.

Per a portar a terme experimentalment tot això, necessitem fer una descripció del banc d'assaig, de les maquetes i de la instrumentació utilitzada, així com descriure els mecanismes necessaris per a realitzar l'assaig dinàmic.

**Banc d'assaig i tipus de maquetes.-** Per porta a terme la part experimental de l'estudi dinàmic s'ha utilitzat el banc d'assaig ja descrit (apartat 3.4), format bàsicament pel túnel de vent i les maquetes. S'ha utilitzat la mateixa maqueta octogonal que en l'estudi experimental estacionari en dos tipus diferents de subjecció, una rígida per poder estudiar les vibracions forçades i una altre de flexible per a estudiar els fenòmens d'instabilitat.

En els apartats següents es descriuen l'instrumentació i les proves realitzades.

### **5.5.1 Instrumentació utilitzada.-**

**Descripció.-** La instrumentació utilitzada en les mesures experimentals dinàmiques consisteix en el conjunt d'aparells que són necessaris per tal de captar i enregistrar diferents paràmetres de les vibracions pel seu posterior anàlisi.

Els elements bàsics que s'hi poden observar són:

Sensors.

Amplificadors de senyal.

Equip d'enregistrament.

Martell d'impactes.

**Sensors.** Els sensors o transductors són els primers components de la cadena de mesura i són els aparells que es col.loquen sobre l'estructura per tal de mesurar-hi les vibracions transformant-les en senyal elèctric (normalment en tensió), de manera que sigui possible enregistrar-les i tractar-les posteriorment. Hi ha tres tipus bàsics de sensors:

- Sensors de desplaçament.
  
- Sensors de velocitat.
  
- Acceleròmetres.

En una vibració mecànica es poden mesurar el seu desplaçament, la seva velocitat o la seva acceleració. La forma i el període de vibració no varien tant si tractem amb desplaçament, velocitat o acceleració. L'elecció de quin dels tres paràmetres és preferible mesurar inicialment dependrà del contingut freqüencial del senyal a analitzar.

Dels tres tipus exposats, els acceleròmetres són els més utilitzats degut a diverses raons:

- Cobreixen el rang de freqüències més elevat dels tres tipus de sensors.
- Tenen un pes relativament petit.
- Un sistema de muntatge simple.
- Són captadors de gran precisió i robustesa.

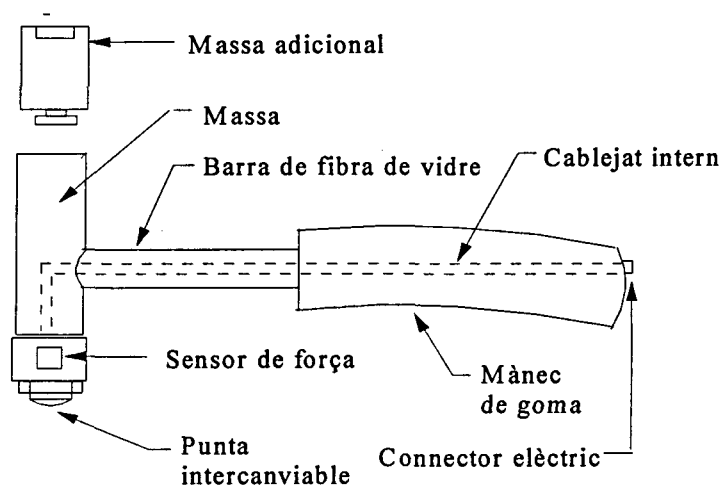
El seu principi de funcionament és el següent, la massa de l'acceleròmetre rep la vibració i transmet una força sobre el cristall piezoelèctric que produeix una diferència de potencial en els seus extrems proporcional a aquesta força. El seu rang operacional està limitat per la seva freqüència natural en la qual les mesures no serien vàlides ja que estaríem mesurant la ressonància del propi acceleròmetre.

**Amplificadors i filtres.** Els acceleròmetres ens proporcionen un senyal elèctric proporcional al senyal de càrrega que estan captant. Però la magnitud d'aquesta senyal és massa petita perquè pugui ésser reconeguda pels analitzadors i enregistrada. Per aquest motiu es fa precís condicionar i amplificar el senyal. A més a més, els propis equipaments amplificadors incorporen altres funcions com la de filtrat i integració del senyal. Els "filtres passa alt" i "passa baix", analògic i regulable, permeten limitar el marge de freqüències amb el que treballarà l'amplificador. L'operació d'integració s'utilitza per obtenir l'amplitud de la velocitat a partir de l'acceleració.

La unió entre captador i amplificador es realitza amb un cable curt coaxial de baix soroll, ja que la utilització de cables llargs pot afavorir l'entrada de soroll elèctric romanent en l'ambient que pot emascarar el senyal detectat.

**Equip d'enregistrament. Gravadora.** Un cop el senyal és captat per l'acceleròmetre i el transductor de pressió i amplificat, s'enregistra en cintes magnètiques de video o àudio en una gravadora de senyals per tal de poder-la analitzar.

**Martell d'impactes.** Per a poder obtenir els modes propis de la maqueta és necessari excitar-la mitjançant les freqüències i d'impactes puntuals (intensa però no duradora). En el nostre cas hem utilitzat un martell d'impactes, ja que mesurem freqüències baixes de banda estreta (freqüències periòdiques molt constants). L'estructura d'un d'aquests martells és la que es pot observar en la figura 5.1.



**Figura 5.1: Martell d'impactes**

El sensor transforma la força de l'impacte en un senyal que, a través del cable intern del martell, s'envia a l'amplificador i d'ell a la gravadora. La punta del martell és una massa intercanviable que pot ésser de tres tipus de materials diferents segons el rang de freqüències que es vulguin excitar: goma, plàstic o acer.

En les properes taules es complementen les característiques d'aquests instruments.

**Taula 5.1: Sensor tipus acceleròmetre**

Sensibilitat de càrrega	31.5 pc/ms <sup>-2</sup>
Sensibilitat de voltatge	24.9 mv/ms <sup>-2</sup>
Capacitància	1266 pF
Màxima sensibilitat transversal	0.2 %
Freqüència típica natural no danyada	13 kHz
Freqüència típica de ressonància transversal	3.8 kHz
Sensibilitat típica magnètica	0.5 ms <sup>-2</sup> /T
Sensibilitat típica acústica	0.002 ms <sup>-2</sup> /με
Sensibilitat típica transitòria tèrmica	0.001 ms <sup>-2</sup> /°C

**Taula 5.2: Martell d'impactes**

Sensibilitat de referència a 159,2 Hz	3.87 pc/N	
Sensibilitat estàtica	3.90 pc/N	de 0 a 1000 N tensió
	4.05 pc/N	de 0 a 5000 N compressió
Linealitat	± 1 %	
Sensibilitat	1 pc/N	

	Rang de força (N)	Duració del rang (ms)	Aprox. del rang de freqüència -10 dB (Hz)
<b>Punta de goma</b>	100-700	5-1.5	0-500
<b>Punta de plàstic</b>	300-1000	1-0.5	0-2000
<b>Punta d'acer</b>	500-5000	0.25-0.2	0-7000

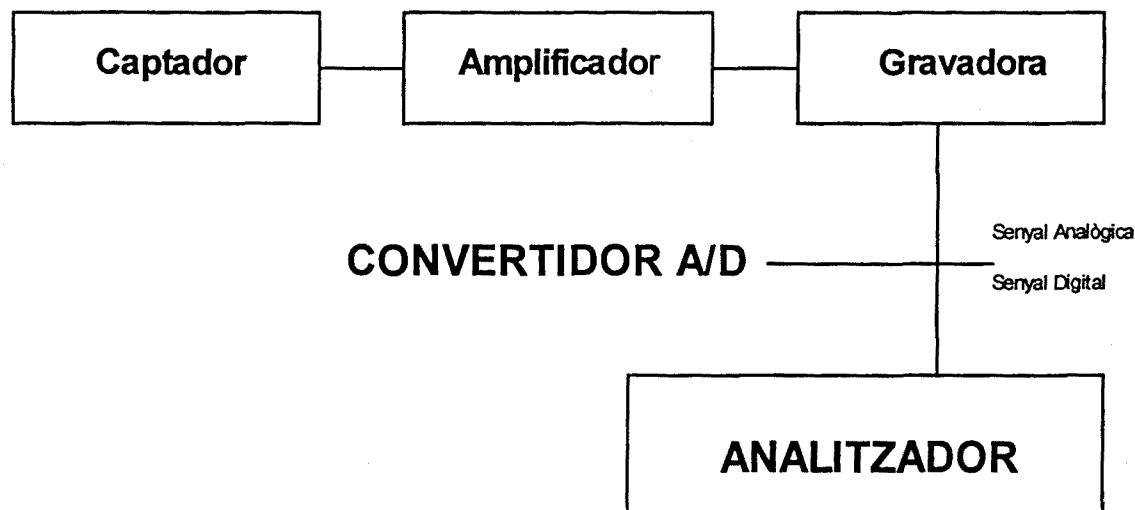
**Calibratge.**- Un cop instal·lada la cadena de mesura, amb els acceleròmetres, cables i amplificadors connectats a la gravadora, és precís procedir a enregistrar una primera sèrie per a realitzar el calibratge dels aparells. Aquest, s'aconsegueix gravant un senyal de referència proporcionat per un generador de senyals de vibració patró (Brüel & Kjaer Type 4294), que vibra a una freqüència fixa de 159,2 Hz i que proporciona una amplitud de l'acceleració de la vibració de  $10 \text{ m/s}^2$  rms.

Una vegada s'ha enregistrat el senyal de calibratge dels acceleròmetres, cal regular l'amplitud del senyal elèctric a gravar, mitjançant l'amplificació proporcionada per l'amplificador i l'atenuació aplicada per la gravadora, fins que s'aconsegueix que quedi dins del rang d'amplituds acceptables per la mateixa, de manera que no es produeixi saturació ("overload") del senyal, cosa que invalidaria les mesures. Els valors d'atenuació i d'amplificació han de ser anotats, i/o enregistrats a la mateixa cinta aprofitant el canal de veu de la gravadora, per poder quantificar l'amplitud de les vibracions enregistrades en el moment de fer el seu anàlisi.

Una vegada realitzades aquestes operacions, ja es pot procedir a la realització de les mesures. Ara bé, abans de la presa de dades s'ha de realitzar l'elecció dels punts de la maqueta on s'han d'efectuar les mesures, determinar els paràmetres a recollir, l'organització dels mateixos i la seva posterior adquisició, per tant és precís establir una metodologia d'actuació per a la realització d'aquests proves

**Metodologia.**- Aquesta metodologia pot ser la que es comenta a continuació i que es pot veure en l'esquema 5.3. Una vegada el senyal és captat pels acceleròmetres i amplificat, s'enregistra en cinta magnètica utilitzant una gravadora de senyals i posteriorment és analitzada. També hem d'anar molt en compte de no fer servir maquetes petites de poca massa, ja que la massa afegida pels acceleròmetres afecta a la massa total i per tant pot provocar errors en els resultats. Aquest no és el nostre cas, doncs la massa de la maqueta es prou important com perquè la massa afegida pels acceleròmetres tingui importància.





**Esquema 5.3: Metodologia experimental**

### **5.5.2 Proves realitzades.-**

S'han realitzat diferents tipus de proves, unes per a estudiar les vibracions forçades i unes altres per a determinar fenòmens d'instabilitat. També s'han fet proves per a determinar la freqüència pròpia de l'estructura. L'estudi d'aquesta part està estructurat de la següent manera:

- A) Estudi de la fluctuació del vent**
- B) Estudi dels impactes (martell)**
- C) Estudi de la vibració**
- D) Estudi de les instabilitats**

## **A) FLUCTUACIÓ DEL VENT:**

**Espectres sonda de pel·lícula calent.-** Aprofitant que el software de la pel·lícula calent permet realitzar els espectres instantàniament al mateix temps que analitzar les velocitats, s'ha efectuat una exploració horitzontal amb la sonda a una distància de 192 mm del centre del cos, a una altura constant de 140 mm i per a una velocitat constant de 15 m/s, d'aquesta manera es pot estudiar el deixant de la maqueta per a les dues posicions. En total s'han efectuat 32 espectres (16 per a cada posició) des de l'eix central de la maqueta en la direcció de la paret horitzontal de la cambra d'assaig del túnel, però sense arribar a la paret propiament, concretament fins a 95 mm d'aquesta doncs el deixant provocat per l'acció del vent sobre les diferents posicions no arribarà tant lluny. D'aquest 16 punts de mesura, els 13 primers estan separats cadascun d'ells 15 mm, que fan un total de 180 mm, els altres tres estan separats 20, 25 i 25 mm respectivament.

A partir dels espectres obtinguts, s'han agafat els valors de densitat espectral màxims i posteriorment s'han representat conjuntament en una única gràfica per d'aquesta manera poder comparar ambdues posicions. Tal com es pot apreciar a la figura 5.2, a l'hora d'unir tots els valors s'ha utilitzat una aproximació dels trams per corbes (spline smoothing). Encara que les dues representacions segueixen tendències semblants, cal distingir-les:

**Posició radial.-** Els punts de mesura més propers (0, 1 i 2) tenen un valor de la densitat espectral mitjana, produint-se un petit increment en el punt 2, en el 3 disminueix una mica i és aleshores quan el increment és fa molt important assolint el valor màxim pel punt 6 (aproximadament a 90 mm). A partir d'aquest els valors cauen espectacularment fins assolir valors molt baixos, excepte en el últim dels punts que té un cert increment.

**Posició frontal.-** Aquí la corba està desplaçada cap a la dreta, essent el seu comportament semblant a la del cas radial, però en valors molt més grans excepte en el màxim, doncs no queda tant definit el màxim, aquí tenim valors semblants pels punt 5, 6 i 7. A partir d'aquest

últim la tendència és la mateixa que pel cas radial .

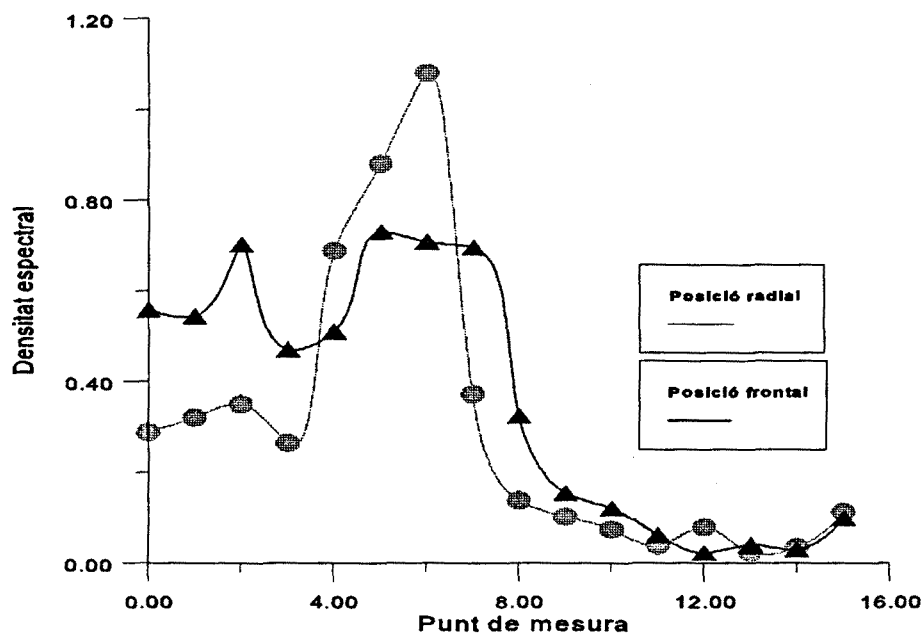
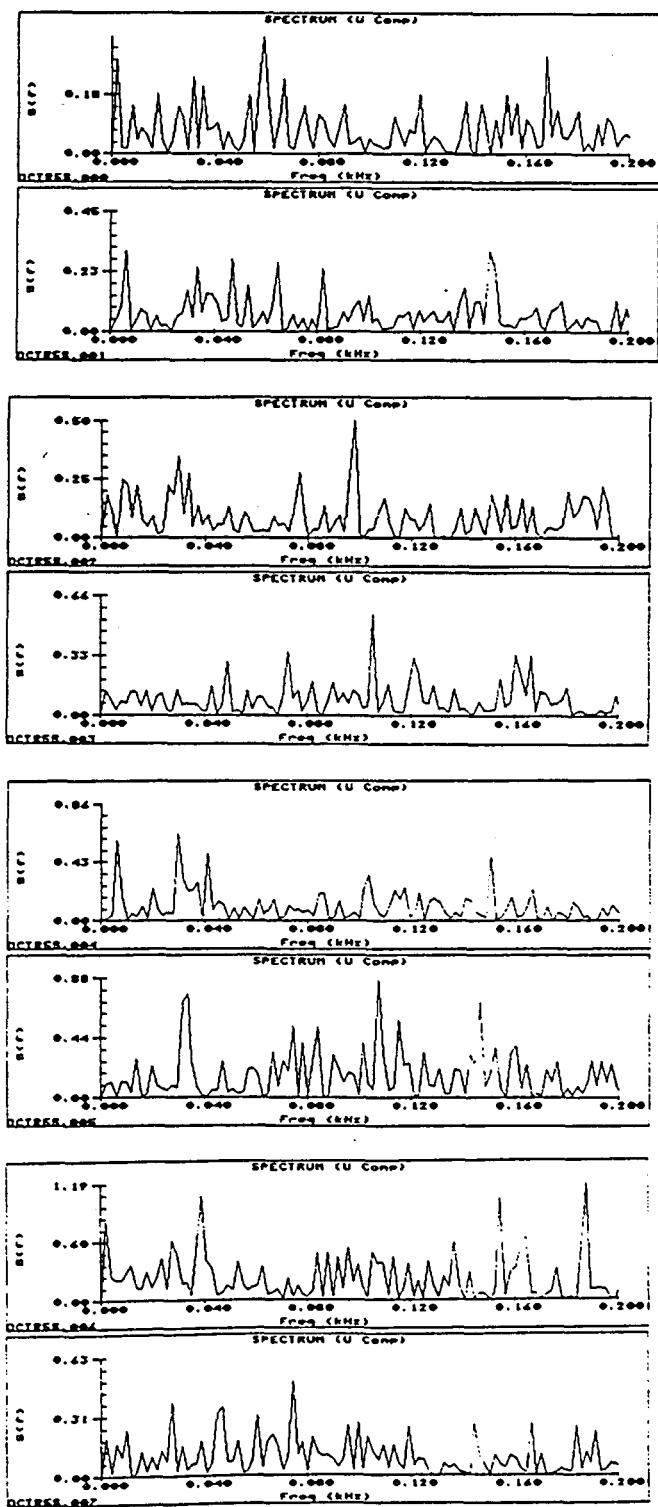


Figura 5.2: Posició radial versus frontal

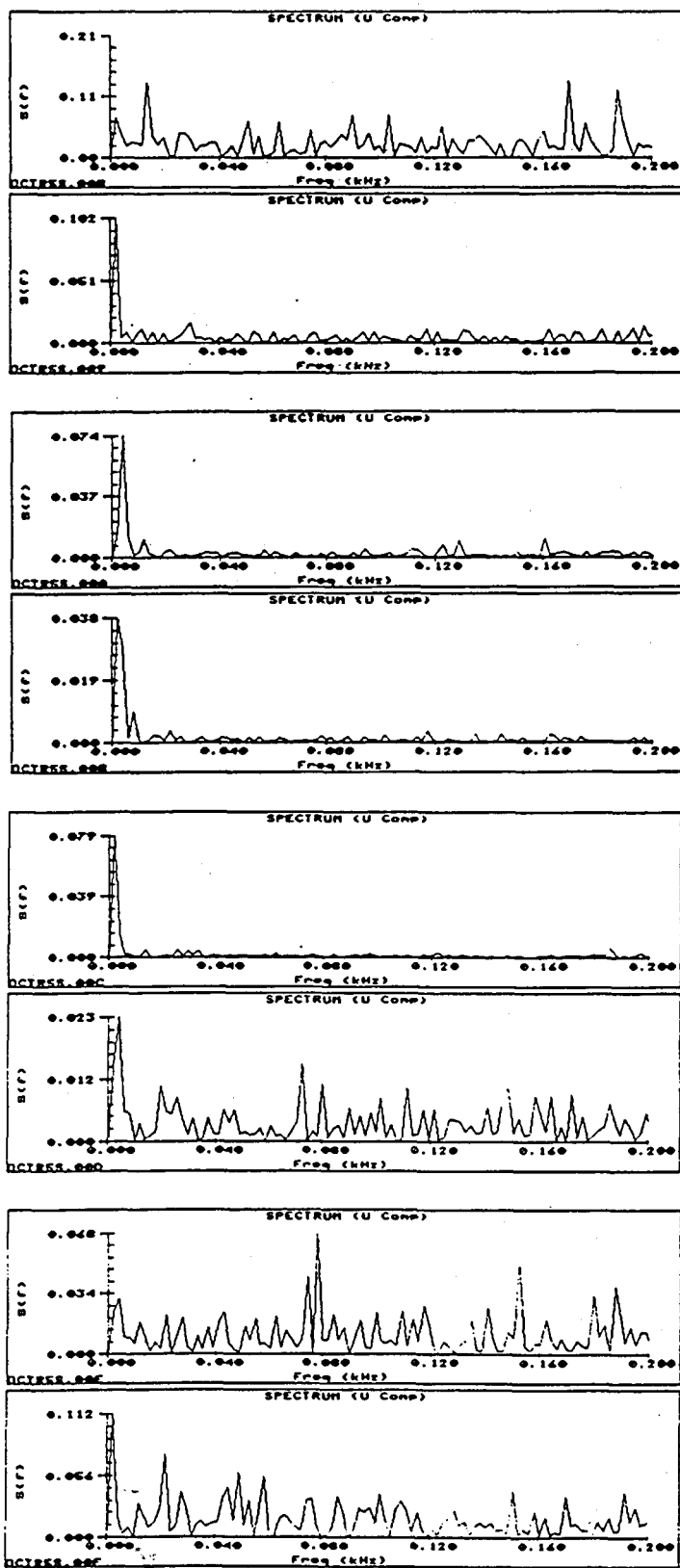
A la figura 5.2 s'ha representat el valor de la densitat espectral mitjana de cada punt de mesura. Es pot apreciar com la intensitat és màxima dins del deixant i com desapareix ràpidament a mida que ens anem allunyant del cos.

En les properes pàgines es troben els 32 espectres abans esmentats, En aquestes figures es pot observar la diferència d'intensitat de la turbulència en funció de la posició i que degut a la baixa resolució dels espectres no es pot identificar cap freqüència que destaquï sobre la resta. Per a millorar aquesta resolució es van fer una sèrie de amitjanaments per a una posició davant de la maqueta i per a un altre al darrera .

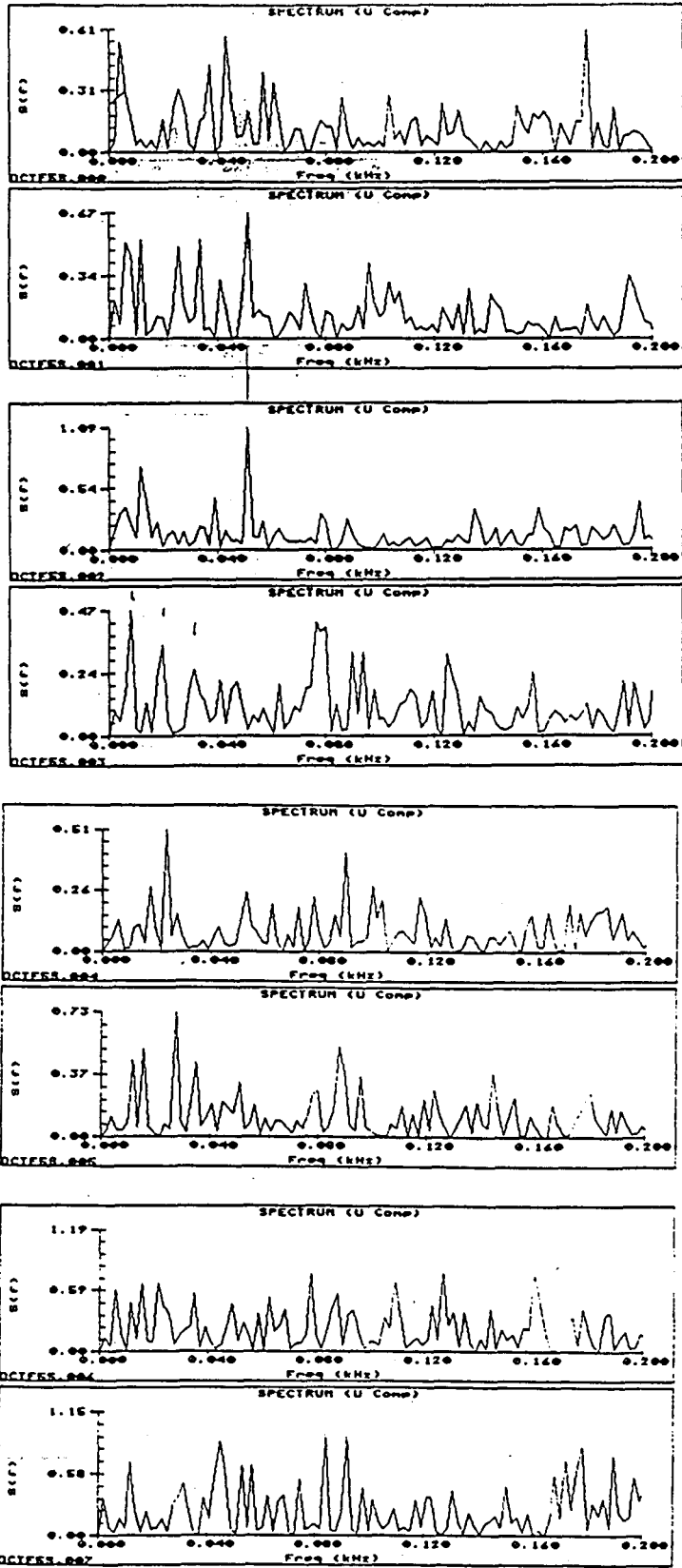
Figura 5.3: Espectres instantanis de la sonda de pel·lícula calent



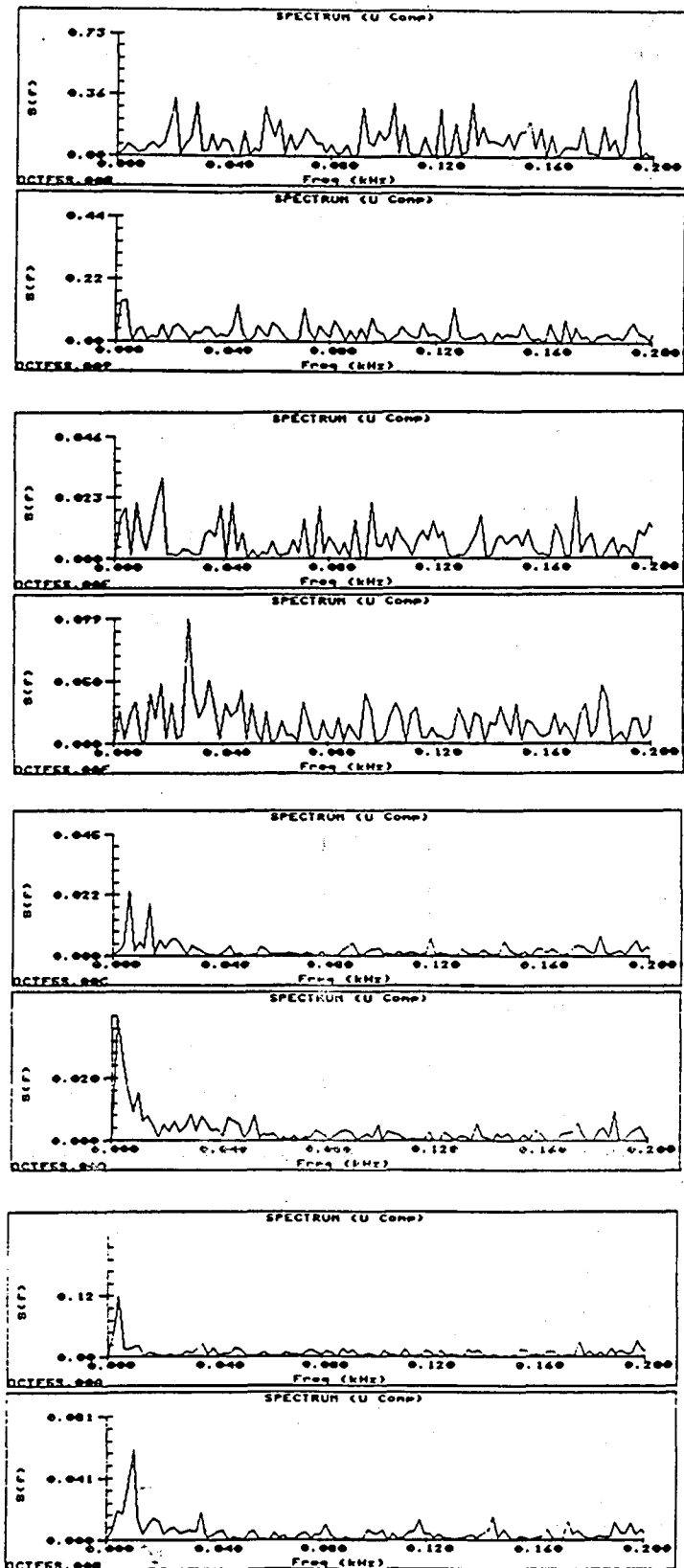
*Estudi teòric i experimental règim no estacionari*



*Estudi teòric i experimental règim no estacionari*



*Estudi teòric i experimental règim no estacionari*







Sonda de pel·lícula calenta davant.- En el canal 1 de la gravadora havia la sonda, en el 2 l'acceleròmetre situat a 180°, en el 3 l'acceleròmetre situat a 90° i el canal 4 era el de veu.

Es van realitzar quatre proves amb velocitats de gir del ventilador del túnel de vent de:  
Prova 1: 280 rpm (9,51 m/s); Prova 2: 402 rpm (14,29 m/s); Prova 3: 502 rpm (18,21 m/s);  
Prova 4: 723 rpm (26,87 m/s), amb un temps mitjà de pressa de dades de 180 segons.

Les amplificacions i l'atenuació de la cinta són les mostrades en la taula 5.3.

**Taula 5.3: Amplificació i atenuació de la cinta**

APARELL	CANAL	AMPLIFICACIÓ				ATENUACIÓ			
		Proves				Proves			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Sonda de pel·lícula calenta	1	0				5			
Acceleròmetre 180°	2	100				1	2	2	2
Acceleròmetre 90°	3	100				2	5	5	5
Canal de veu	4								

Donat que les proves es van fer en un túnel tancat a més de les excitacions pròpies de la turbulència del vent hi havien excitacions pròpies del túnel tancat. Per a identificar totes i cadascuna de les excitacions i eliminar les que no són pròpies del fenomen a estudiar, es van identificar les excitacions periòdiques produïdes pel ventilador ( $f_r$ ,  $f_b$ ,  $f_v$ ) i les produïdes per ressonàncies acústiques existents a l'interior del túnel.

Per tal d'identificar les freqüències, s'ha construït la següent taula:

**Taula 5.4: Identificació de les freqüències**

Velocitat n (rpm)	$f_r$ (Hz)	$f_b$ (Hz)	$f_v$ (Hz)
280	4.666	46.66	37.33
402	6.700	67.00	53.60
502	8.366	83.66	66.93
723	12.05	120.5	96.4

On  $f_r$  és la freqüència de rotació del ventilador  $f_r = n/60$  (n nombre de voltes que gira el ventilador),  $f_b$  la freqüència de pas d'àlep  $f_b = z_b \cdot f_r$  ( $z_b$  número de pales del ventilador = 10), i la  $f_v$  la de pas de directrius  $f_v = z_v \cdot f_r$  ( $z_v$  número d'àleps directrius = 8).

Els harmònics de cadascuna d'aquestes freqüències, per a cadascuna de les velocitats són:

n = 280 rpm:  $f_b = 46.66, 93.33, 140.00, 186.66$  Hz

$f_v = 37.33, 74.66, 112, 149.33, 186.66$  Hz

n = 402 rpm:  $f_b = 67, 134, 201$  Hz

$f_v = 53.6, 107.2, 160.8$  Hz

n = 502 rpm:  $f_b = 83.66, 167.32$  Hz

$f_v = 66.93, 133.86$  Hz

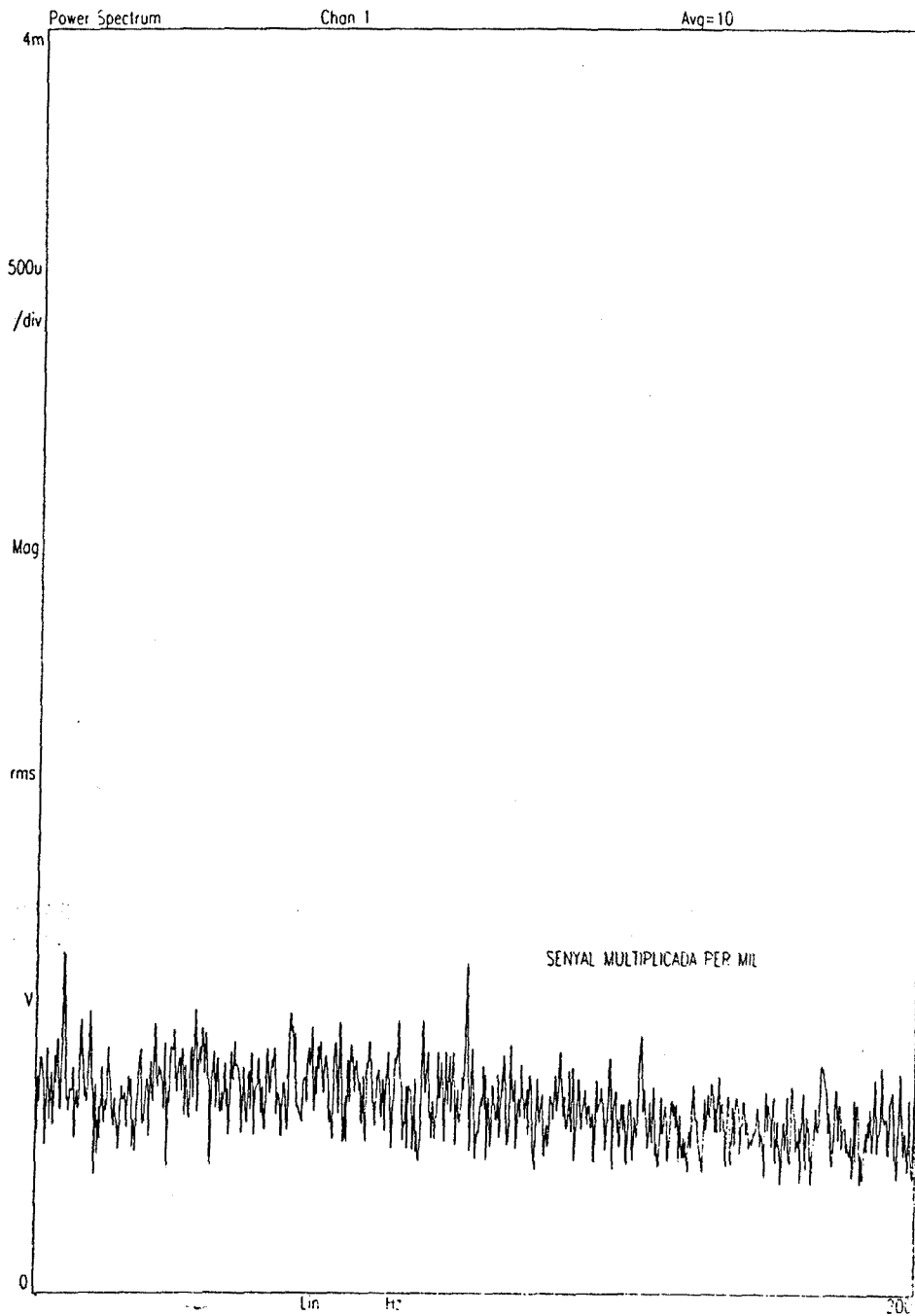
n = 723 rpm:  $f_b = 120.5$  Hz

$f_v = 96.4, 192.8$  Hz

Aquestes freqüències s'han de filtrar dels espectres obtinguts. A la figura 5.5 es mostra l'espectre obtingut per la sonda de pel·lícula calent davant del cos, apreciand-se que el nivell de turbulència és baix.

Figura 5.5: Espectre fluctuació del vent

402 rpm; TUNEL DE VENT; SFCDAVANT, A180; A90



***Estudi teòric i experimental règim no estacionari***

**Sonda de pel·lícula calenta darrera.-** En aquesta situació, els canals de la gravadora eren els mateixos que pel cas anterior. Realitzant-se cinc proves en velocitats de gir del ventilador del túnel de vent de:

Prova 1: 283 rpm (9,63 m/s); Prova 2: 402 rpm (14,29 m/s); Prova 3: 502 rpm (18,21 m/s); Prova 4: 723 rpm (26,87 m/s); Prova 5: 932 rpm (35 m/s), amb un temps mitjà de presa de dades d'aproximadament 180 segons.

**Taula 5.5: Amplificació i atenuació de cinta**

APARELL	CANAL	AMPLIFICACIÓ					ATENUACIÓ				
		Proves					Proves				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sonda de pel·lícula calenta	1	0					5				
Acceleròmetre 180°	2	100					1	2	2	2	5
Acceleròmetre 90°	3	100					2	5	5	5	10
Canal de veu	4										

De la mateixa manera que en el cas anterior es pot construir una taula (taula 5.6) on es reflecteix les freqüències produïdes per les excitacions periòdiques del ventilador així com les ressonàncies acústiques.

**Taula 5.6: Identificació de les freqüències**

Velocitat n (rpm)	$f_r$ (Hz)	$f_b$ (Hz)	$f_v$ (Hz)
283	4.716	47.16	37.73
402	6.700	67.00	53.60
502	8.366	83.66	66.93
723	12.05	120.5	96.4
932	15.533	155.33	124.26

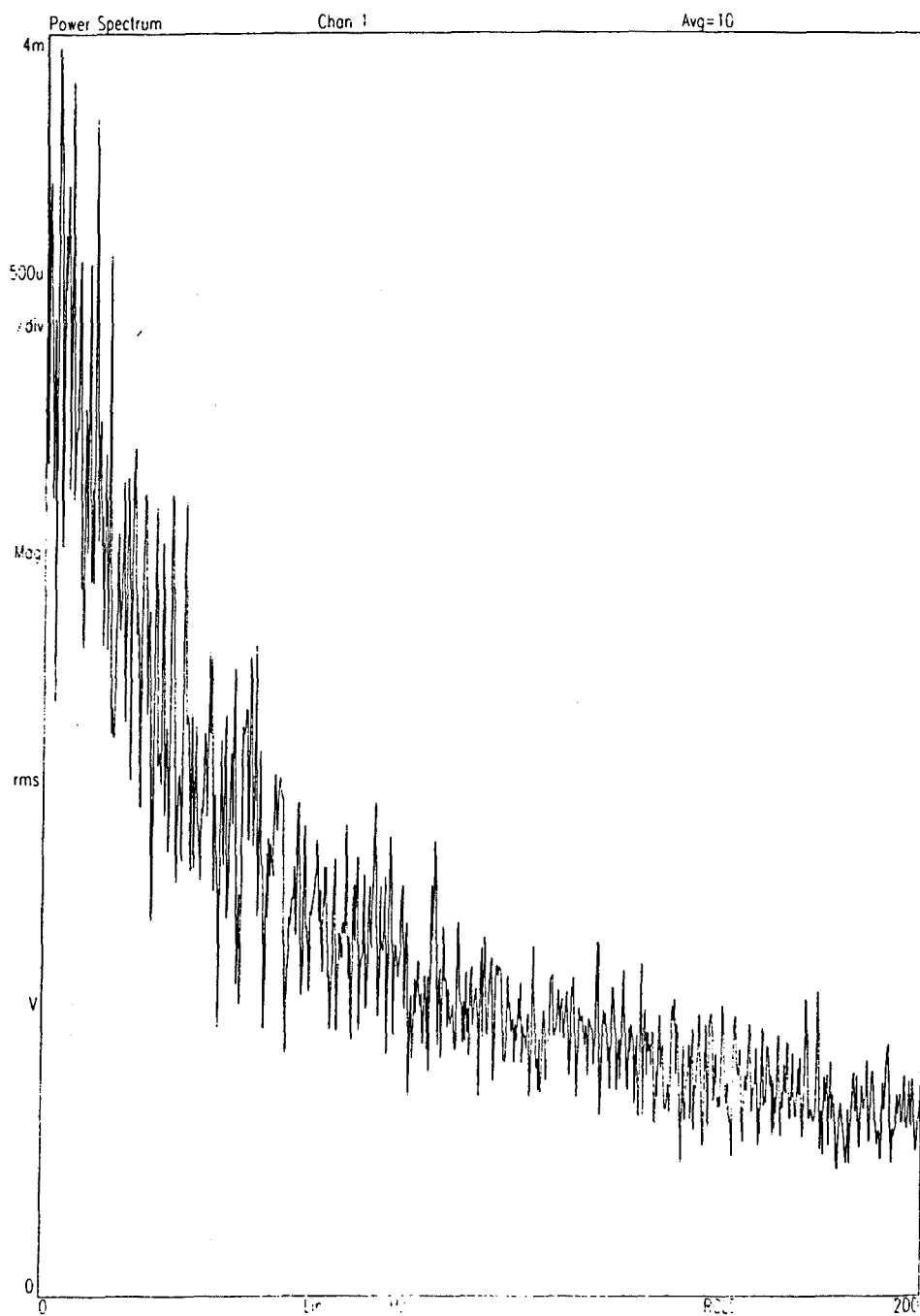
Els harmònics de cadascuna d'aquestes freqüències són:

- n = 283 rpm:  $f_b = 47.16, 94.33, 141.5, 188.66$  Hz  
 $f_v = 37.73, 75.46, 113.2, 150.93, 188.66$  Hz
- n = 402 rpm:  $f_b = 67, 134, 201$  Hz  
 $f_v = 53.6, 107.2, 160.8$  Hz
- n = 502 rpm:  $f_b = 83.66, 167.32$  Hz  
 $f_v = 66.93, 133.86$  Hz
- n = 723 rpm:  $f_b = 120.5$  Hz  
 $f_v = 96.4, 192.8$  Hz
- n = 932 rpm:  $f_b = 155.33$  Hz  
 $f_v = 124.26$  Hz

Repetint el mateix procediment que abans, a la figura 5.6 es mostra una de les mesures realitzades, es pot observar com l'amplitud de la fluctuació és molt més gran i actua bàsicament en un rang de freqüències entre 0 i 100 Hz. No detectant-se amb claredat les excitacions generades pel ventilador.

Figura 5.6: Espectre fluctuació del vent darrera de la maqueta

402 rpm; TUNEL DE VENT; SFCDARRERA, A180; A90



## **B) IMPACTES:**

Per a determinar la freqüència pròpia, es va portar a terme una prova amb el martell d'impactes sobre la mateixa maqueta, essent el material necessari per a realitzar la prova el següent: un martell d'impactes, que és l'element amb el qual excitaríem la maqueta, un amplificador igual que els utilitzats pels sensors, així com un sistema per enregistrar tant el senyal dels acceleròmetres com el de la força excitatriu.

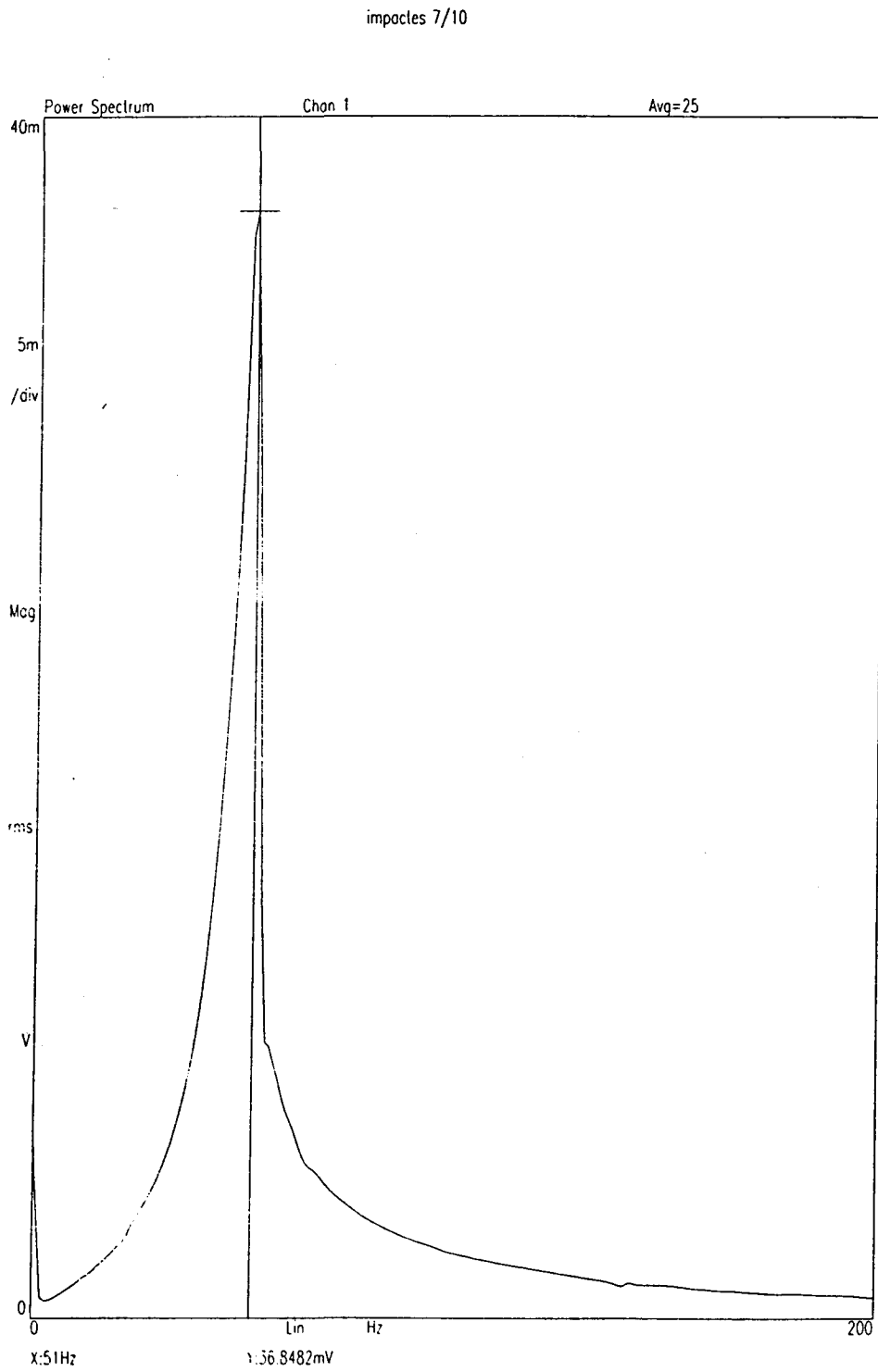
Una vegada fet el calibratge, es procedeix a realitzar la prova en concret. Així, amb el martell en la seva punta més tova tipus 8202, s'impacta amb la cèl·lula de càrrega que porta incorporat sobre la maqueta de l'edifici, en successius impactes de diferents intensitats, de manera que la resposta es recollida en un acceleròmetre tipus Brüel & Kjaer 4384-S, col·locat en sentit oposat al del impacte, en la mateixa secció longitudinal.

Tots aquest resultats eren gravats en suport magnètica, per la gravadora SONY PC 208A i monitoritzats mitjançant un analitzador d'espectres portàtil HP 3560 A. En el canal 1 de la gravadora tenim el registre del martell, en el 2 l'acceleròmetre i el 3 era el de veu.

S'han fet tres proves consecutives en diferents atenuacions de cinta, en cadascuna d'aquestes proves es van realitzar nombrosos impactes, amb un temps de presses de dades d'aproximadament 150 segons. Finalment amb aquesta cinta gravada es va procedir al seu tractament mitjançant l'analitzador i amb el software adient i es van treure els resultats en forma d'espectres. En la figura 5.7 es mostra un d'aquests espectres, on es pot apreciar clarament que la freqüència pròpia de l'estructura més significativa és a 51 Hz.



Figura 5.7: Espectre dels impactes del martell sobre l'estructura



### C) VIBRACIONS:

S'ha utilitzat la mateixa maqueta que en la prova anterior afegint una sonda d'intensimetria de la casa Brüel & Kjaer tipus 3520 amb una gama de freqüències de 20 a 5000 Hz amb dos micròfons tipus 4178 de la mateixa casa. Una vegada efectuat el calibratge dels instruments es procedeix a realitzar la prova, que consisteix en treure els espectres de la sonda i dels acceleròmetres per a una determinada gamma de velocitats compreses aproximadament entre 8 i 34 m/s (14 proves en total).

Una vegada realitzat l'escombratge de velocitats, la resposta de l'estructura és recollida pels tres acceleròmetres equidistants tipus Brüel & Kjaer 4384-S i per la sonda d'intensimetria situada al darrera de la maqueta en al lloc on es detectava millor l'excitació generada pel deixant (165 mm del centre d'aquesta i a una altura de 210 mm respecte al terra). Tots aquests resultats eran gravats per la gravadora de senyals Racal V-Store de 24 canals. El canal 3 era la veu, el 6, 7 i 8 els acceleròmetres i el 9 i 10 els micros de la sonda d'intensimetria.

Prova: 1: 250 rpm (8.25 m/s); 2: 305 rpm (10.40 m/s); 3: 335 rpm (11.58 m/s); 4: 365 rpm (12.75 m/s); 5: 480 rpm (17.26 m/s); 6: 641 rpm (23.56 m/s); 7: 651 rpm (23.96 m/s); 8: 685 rpm (25.29 m/s); 9: 723 rpm (26.78 m/s); 10: 765 rpm (28.42 m/s); 11: 790 rpm (29.40 m/s); 12: 824 rpm (30.73 m/s); 13: 859 rpm (32.10 m/s); 14: 900 rpm (33.71 m/s).

La figura 5.8 mostra una cascada d'espectres d'un dels micros (canal 4). Cadascun d'aquests espectres per a una velocitat del vent de les mencionades anteriorment. Es pot observar una excitació de banda ampla a freqüències baixes generada per la turbulència i una excitació diferent generada per a una estructura coherent del deixant.

La figura 5.9 mostra la resposta de l'estructura per a un acceleròmetre (canal 1). Es pot observar com la vibració creix quan l'excitació coincideix amb la freqüència pròpia de l'estructura ("lock-in"). Aquesta és la situació més desfavorable i per tant s'haurà d'evitar.

Figura 5.8: Cascada dels espectres de la sonda d'intensimetria

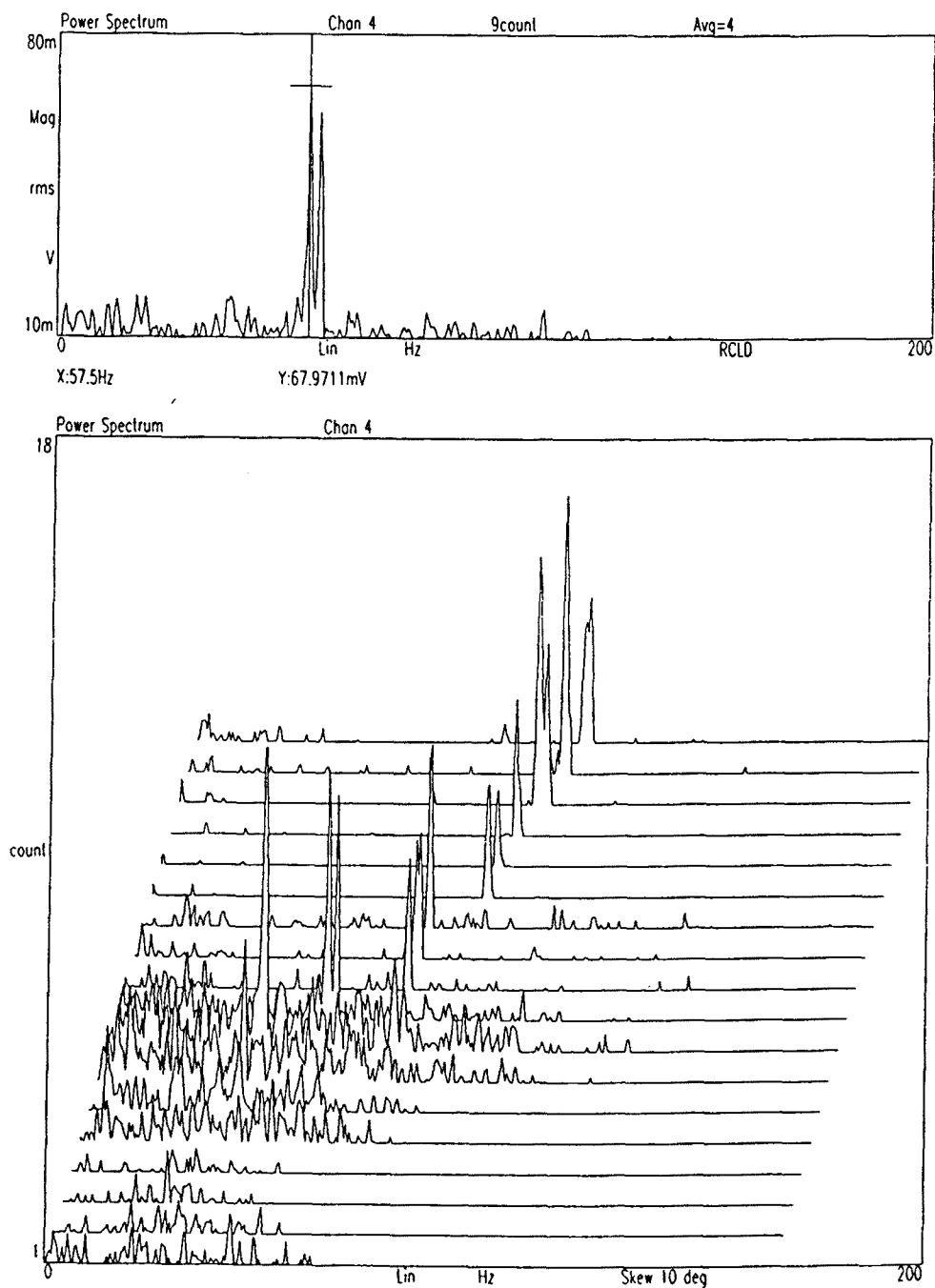


Figura 5.9: Cascada dels espectres de la resposta de l'estructura

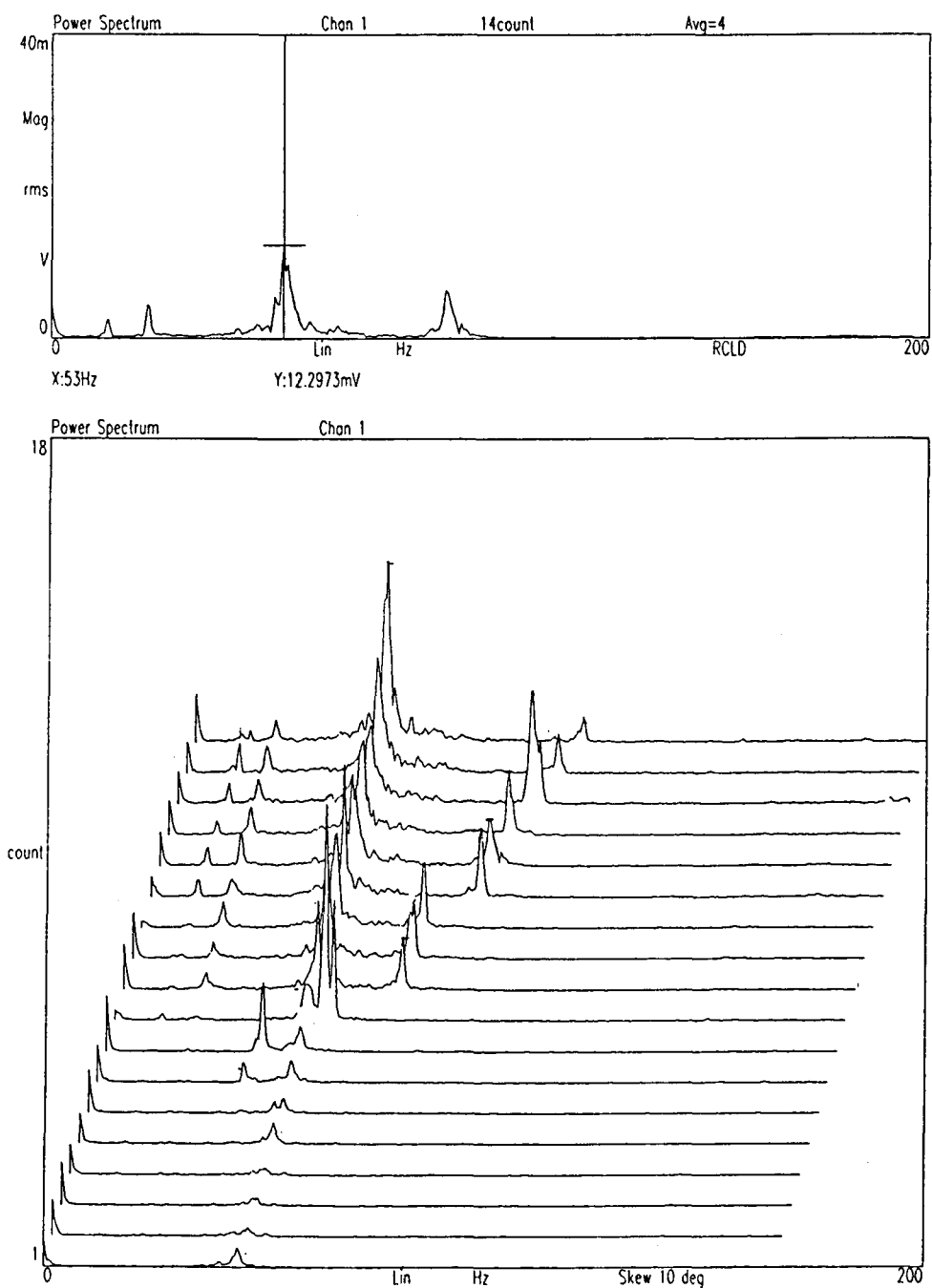
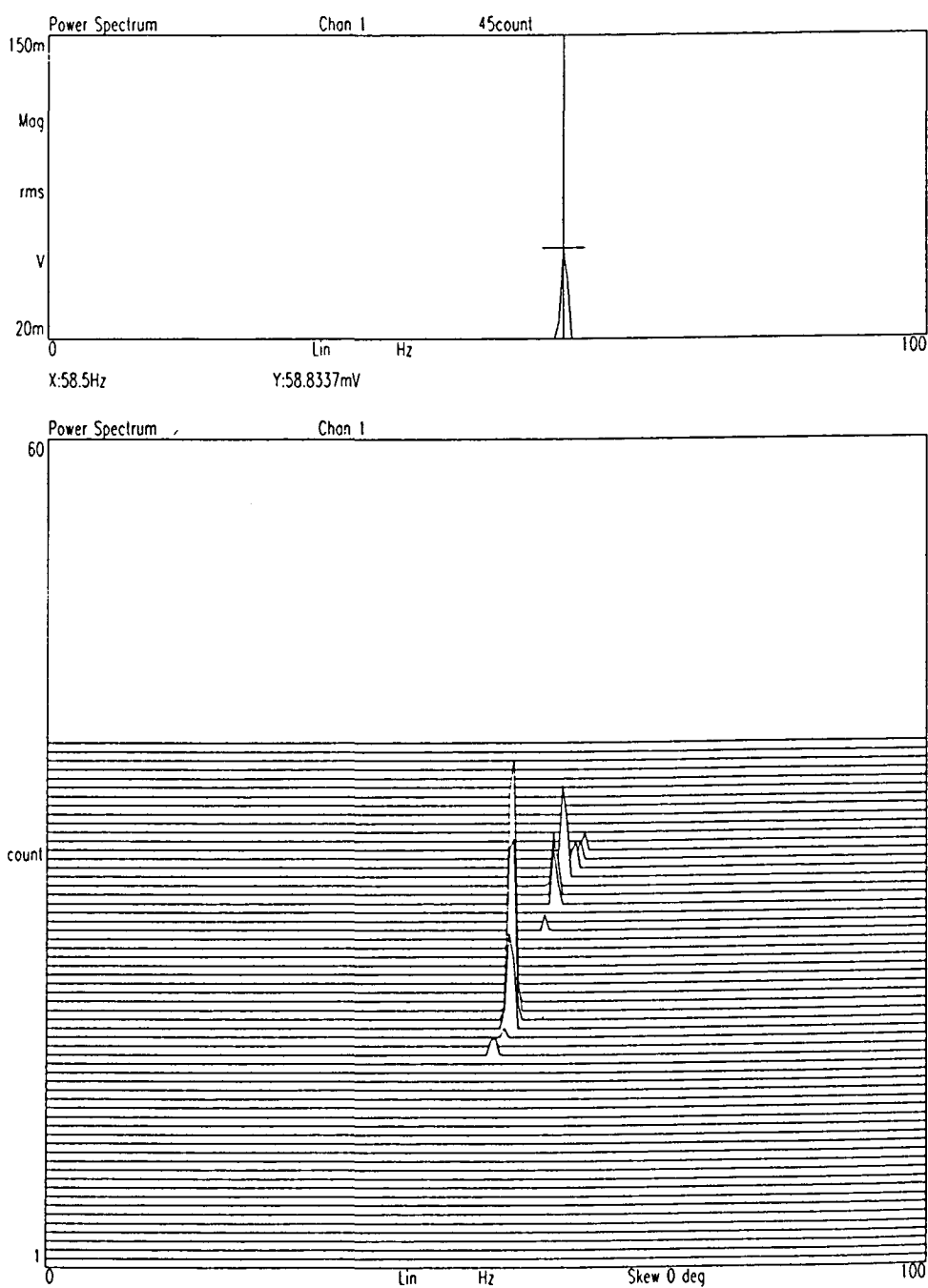


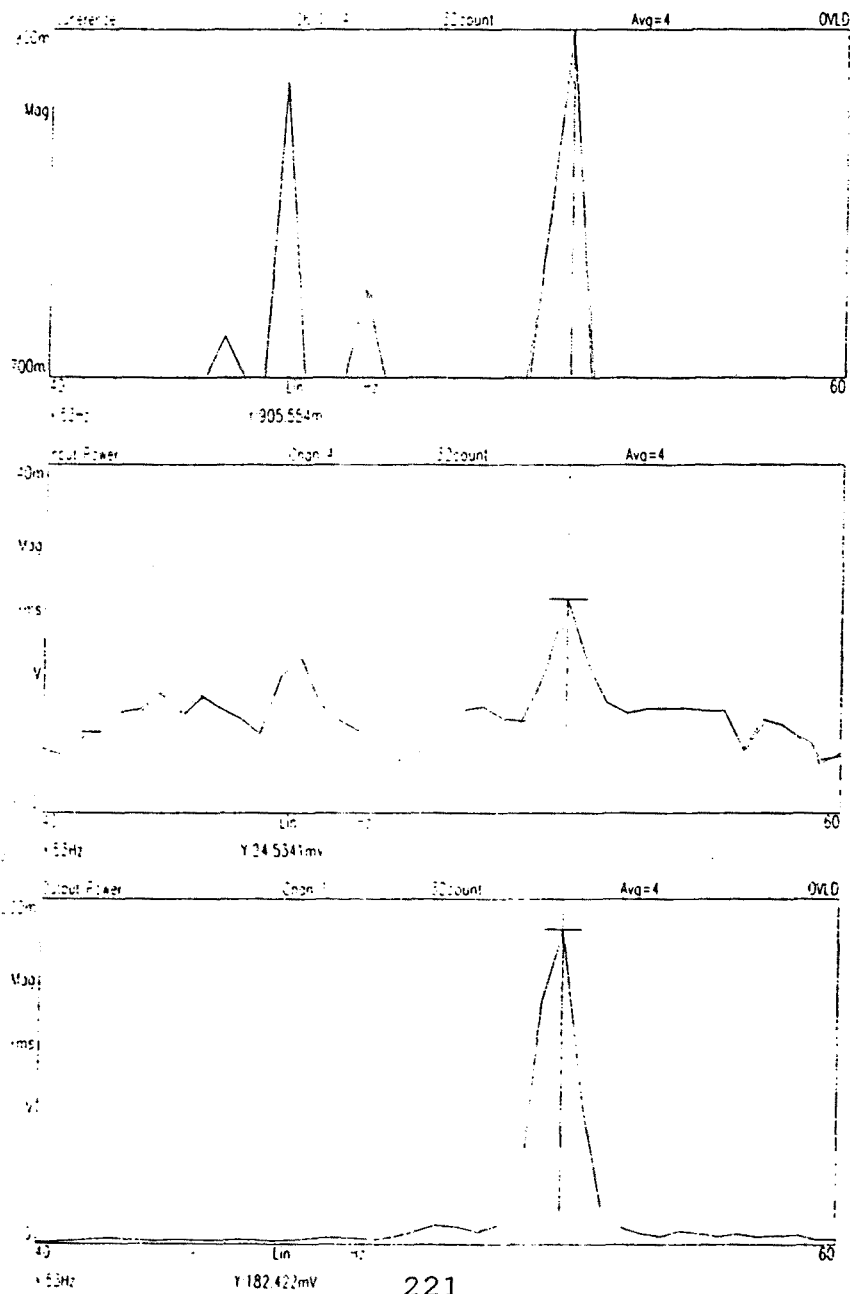
Figura 5.10: Cascada dels espectres de la resposta de l'estructura més fina



*Estudi teòric i experimental règim no estacionari*

Tal com ja s'ha pogut apreciar a les figures 5.9 i 5.10 hi ha una velocitat on coincideixen ambdues freqüències, per tal de determinar aquesta es va procedir a realitzar una exploració entre 365 i 485 rpm, trobant-se que aquesta coincidència es produïa al voltant dels 423 rpm. A més a més, utilitzant la funció de transferència entre la senyal de la sonda d'intensimetria i la vibració, es pot veure en la figura 5.11 que la coherència es al voltant d'1. Això indica que la vibració està generada per aquesta excitació.

Figura 5.11: Coherència entre la senyal de la sonda i la vibració



#### **D) INESTABILITATS:**

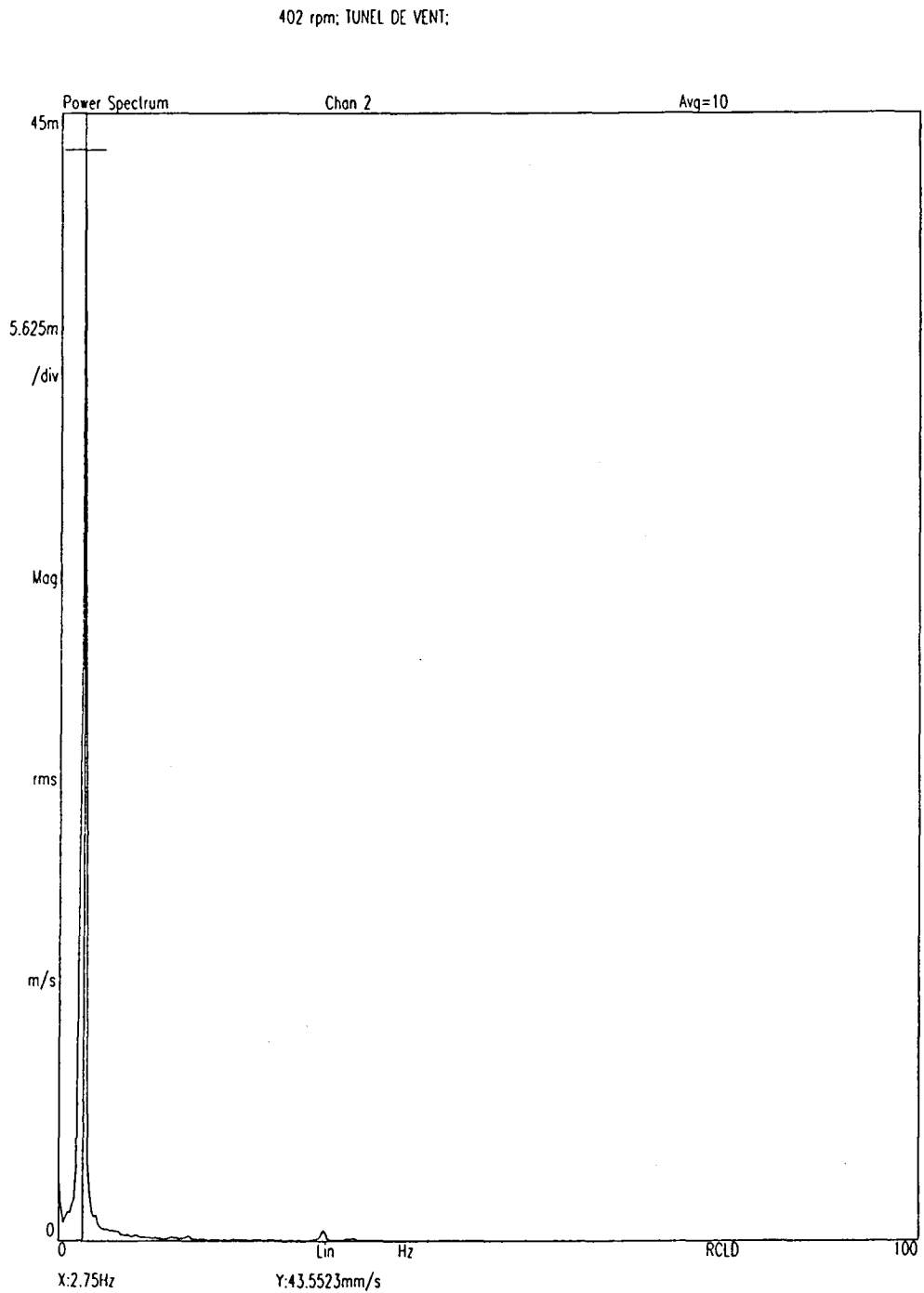
S'han realitzat les proves per a determinar les possibles inestabilitats fluidodinàmiques, amb la maqueta flexible (subjectada amb una molla) descrita en l'apartat 3.4, els acceleròmetres amb plaqueta enganxada a la maqueta del tipus Brüel & Kjaer 4384-S estaven col·locats a 90 i 180° de la direcció del vent, i la sonda de pel·lícula calenta. Aquesta, primer es va col·locar davant de la maqueta i després darrera, ambdós casos situada a 192 mm del centre de la maqueta i a una alçada de 140 mm. Tots aquests resultats van ser gravats en un suport magnètic per la gravadora de senyals SONY PC 208 A.

Totes les característiques d'aquestes proves són les descrites en l'apartat A) FLUCTUACIÓ DEL VENT, i concretament en les taules 5.3, 5.4, 5.5 i 5.6. Essent els resultats els que es mostren en les figures 5.12, 5.13, 5.14 i 5.15.

L'objectiu era veure (visualitzar) la possibilitat de que existís algun tipus d'inestabilitat, doncs la maqueta en aquest cas era molt elàstica (es va aconseguir reduir considerablement la freqüència pròpia de l'estructura que va passar a ser de 2.75 Hz). Incrementant la velocitat del vent progressivament es va arribar a una certa velocitat crítica on a partir d'una petita excitació es produïa un fenomen d'inestabilitat i les vibracions augmentaven ràpidament arribant a produir desplaçaments molt importants a l'estructura, sintonitzant-la amb la freqüència pròpia.

L'extrapolació al cas real ens indicaria quines són les velocitats inacceptables per l'estructura.

Figura 5.12: Espectre per a l'estudi de les inestabilitats amb l'acceleròmetre col·locat a 90°.





*Estudi teòric i experimental règim no estacionari*

Figura 5.13: Espectre per a l'estudi de les inestabilitats amb l'acceleròmetre col·locat a 180°.

402 rpm; TUNEL DE VENT;

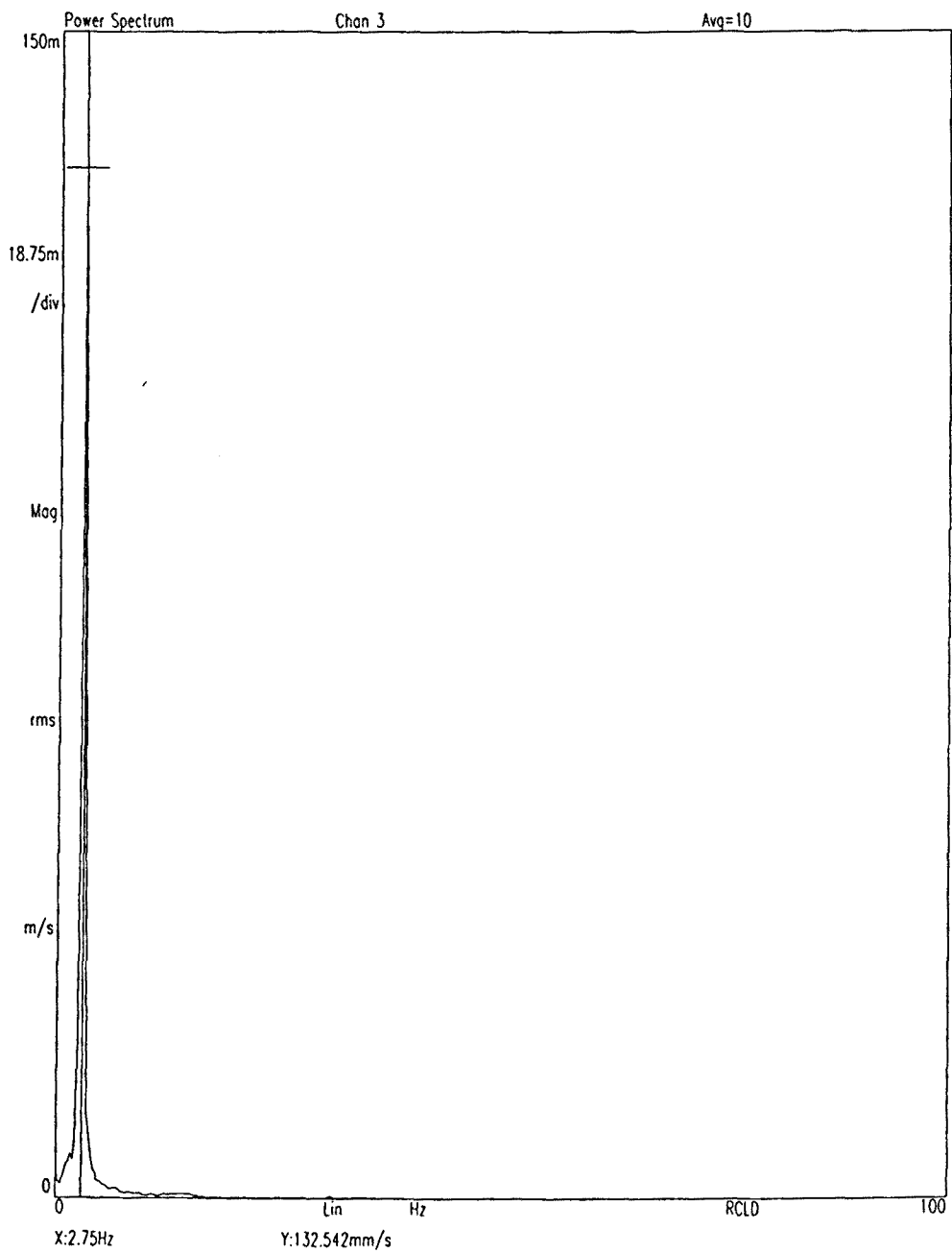


Figura 5.14: Espectre per a l'estudi de les inestabilitats amb l'acceleròmetre col·locat a 90°.

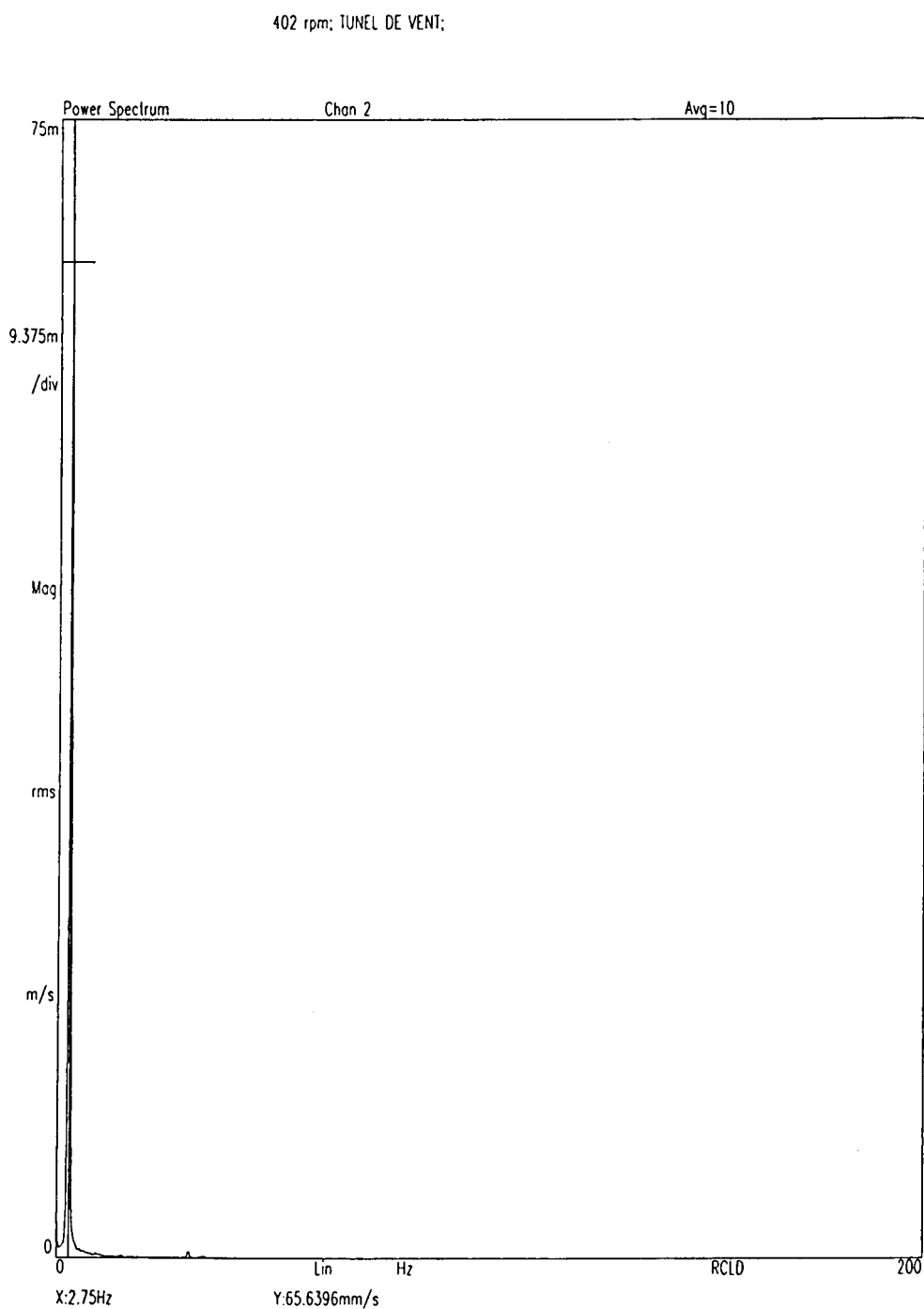


Figura 5.15: Espectre per a l'estudi de les inestabilitats amb l'acceleròmetre col·locat a 180°.

