

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

CAPÍTOL VI

CONCLUSIONS

VI CONCLUSIONS:

En aquesta tesi s'ha portat a terme la sistemàtica per tal d'analitzar teòrica i experimentalment el comportament d'una estructura sota l'acció d'un corrent d'aire. L'estudi en concret s'ha realitzat tant des del punt de vista estacionari com del no estacionari, esbrinant els efectes estàtics i dinàmics. Aquesta sistemàtica s'ha aplicat a una estructura prismàtica octogonal, en dues posicions diferents una frontal i l'altre radial, dins d'un túnel de vent tancat, doncs era l'únic disponible en el laboratori.

En una primera part de la tesi s'han estudiat els efectes estacionaris, tant des del punt de vista teòric com experimental, per a la determinació del camp de velocitats i de pressions al voltant de l'edifici octogonal, amb la consegüent contrastació dels resultats teòrics amb els experimentals.

Per a l'estudi teòric s'ha utilitzat una simulació fluidodinàmica (CFD) amb un codi FIRE, introduint com a condicions de contorn la pròpia estructura i les parets de la cambra d'assaig del túnel (l'únic túnel disponible era tancat). Això, és fonamental per tal d'analitzar les característiques del flux sobre l'estructura. Concretament s'ha utilitzat una malla desestructurada de 39.684 cel·les per a l'octògon en la posició radial i de 25.160 cel·les per a la posició frontal, en un nombre màxim de 100 cicles i 1.000 passos. Aquest fet, fa que aquesta simulació sigui laboriosa i que l'obtenció dels resultats sigui lenta, és per tot això que cal realitzar millores en les malles i en les tècniques d'acceleració de la convergència dels resultats numèrics.

En la simulació, l'estudi de les pressions a l'igual que el de les velocitats, té un molt bon ajust qualitatiu i un acceptable ajust quantitatiu respecte als valors experimentals, 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, ja que s'ha utilitzat un model simple de turbulència com és el model K- ϵ .

Per tal de contrastar els resultats teòrics, es van realitzar una sèrie de mesures experimentals, per després poder comparar ambdós resultats, ja que pocs investigadors estudien simultàniament els

resultats obtinguts experimentalment amb els teòrics de la simulació numèrica, així com, treballar en la simulació numèrica amb les mateixes condicions de contorn del túnel de vent que en la investigació experimental. En concret es van fer una sèrie de proves experimentals amb la maqueta situada en les dues posicions, una frontal i l'altre radial. Inicialment per a cadascuna de les posicions es van mesurar el camp fluidodinàmic per a diferents velocitats del vent, per finalment realitzar tot l'experiment per a una única velocitat de 15 m/s.

Les mesures de les pressions es van realitzar mitjançant 8 presses de pressió, 5 en una cara lateral i 3 en el sostre. A més a més s'han efectuat exploracions verticals i horitzontals de velocitat amb una sonda de pel·lícula calent. Els resultats obtinguts indiquen, que el comportament fluidodinàmic en la posició frontal de l'octògon, a nivell qualitatiu, és molt semblant al de la posició radial si exceptuem els laterals de l'edifici. També, en el cas frontal es produeix una alteració del flux lliure d'aire més brusca, el que es tradueix en pressions més elevades en la zona d'estancament i velocitats també més grans al voltant de l'octògon. Tot això, produeix inevitablement uns més gran empenta del fluid sobre l'edifici i per tant, a l'hora de tenir en compte l'acció del vent sobre un edifici en la fase de disseny, s'ha de considerar com a cas més desfavorable quan el corrent d'aire incideix perpendicularment a una de les cares laterals.

De la contrastació dels resultats numèrics amb els experimentals es pot dir que, en quant a les velocitats hi han certes discrepàncies en el deixant, ja que el model matemàtic infravalora el vòrtex que es forma al darrera de la maqueta, doncs els valors experimentals de les velocitats mostren una recirculació del fluid més important. En quant a les pressions s'aprecia que la seva distribució tant l'experimental com la del model matemàtic són molt semblants. Encara que s'aprecien certes discrepàncies que són màximes en la cara de l'octògon en posició radial a $67,5^\circ$ i mínimes en les situades a $157,5^\circ$, i per l'octògon en posició frontal són màximes per a 90° . Aquesta desigualtat bé motivada principalment per dues situacions. Primer a petites desviacions en el posicionament de l'angle a l'hora de situar la maqueta dins del túnel de vent o de la pròpia construcció de la maqueta, i segon al fet de que el model de turbulència utilitzat fa una sobreestimació de la viscositat turbulenta.

Aquesta sistemàtica ens permet analitzar el comportament de qualsevol edifici, coneixent les velocitats del vent i les condicions de contorn, per tant aquest procediment es pot aplicar a qualsevol cas real.

La simulació també ens ha permès visualitzar l'existència d'un deixant turbulent i d'estructures vorticals, que com es conegut poden produir excitacions sobre l'estructura, i que per tant implica tot una sèrie de fenòmens no estacionaris, que s'han estudiat en una segona part de la tesi i que tot seguit es comenten.

Per tal d'estudiar aquests fenòmens no estacionaris s'han portat a terme una sèrie de proves amb la mateixa maqueta i túnel que en el cas estacionari a fi de verificar experimentalment les vibracions fluidodinàmiques esperades. Concretament s'ha analitzat la cadena de generació de vibracions des de l'excitació fins a la vibració final passant per la resposta de l'estructura.

En primer lloc s'ha realitzat un anàlisi sobre les principals excitacions que poden generar vibracions fluidodinàmiques en l'estructura sotmesa a l'acció turbulenta del vent. A continuació, a partir d'aquest anàlisi s'ha realitzat una investigació experimental per tal de provocar i mesurar les esmentades vibracions fluidodinàmiques.

De les excitacions generades pel vent, la més important és la turbulència que produeix vibracions forçades sobre l'estructura. Aquest fenomen s'ha reproduït al túnel de vent on s'ha analitzat la cadena de generació de vibracions utilitzant una maqueta rígida, ara bé degut a que l'únic túnel de vent disponible era un túnel tancat s'ha hagut d'implementar una sistemàtica per a separar les excitacions pròpies del túnel tancat de les del vent, determinant les freqüències i els harmònics de rotació del ventilador (f_r), de pas d'àlep (f_b) i de pas de directrius (f_v). L'equip utilitzat permetia mesurar les fluctuacions del vent (sonda de pel·lícula calent) i les vibracions estructurals (cadena d'acceleròmetres). De les mesures s'han obtingut els espectres de la turbulència (excitació) i la vibració de l'estructura. Així, davant del cos el nivell de turbulència és baix, al darrera l'amplitud de la fluctuació és molt més gran i actua bàsicament en un rang de freqüències entre 0 i 100 Hz. En el cas de no disposar de l'espectre de l'excitació turbulenta, es proposa un procediment

d'aproximació teòrica, mitjançant l'estadística i la teoria de probabilitats, per tal d'obtenir aquest espectre teòricament amb la qual cosa es podrà aplicar aquesta metodologia a qualsevol edifici.

Mitjançant l'anàlisi d'impactes es va obtenir la resposta de l'estructura, efectuant 3 proves les quals mostren varies freqüències pròpies però on predomina una a 51 Hz.

Una vegada determinades les fluctuacions i les freqüències pròpies es passa a analitzar les vibracions fluidodinàmiques pròpiament, per a realitzar aquestes proves s'ha utilitzat a més a més dels acceleròmetres corresponents una sonda d'intensimetria. Realitzant-se les mesures per a velocitats entre 10 i 35 m/s. Dels espectres obtinguts en les 14 proves realitzades, en velocitats compreses entre 8 i 34 m/s aproximadament, s'aprecia una excitació de banda ampla a freqüències baixes generada per la turbulència i una excitació diferent generada per a una estructura coherent del deixant. També, s'han matisat diferents situacions, unes generals on la freqüència del deixant no coincideix amb cap freqüència pròpia i una particular de sintonització, on s'ha observat que quant una de les freqüències pròpies està dins del rang d'excitació de la turbulència, la vibració s'incrementa notablement, situació que s'ha d'evitar sempre en un cas real.

També, es va generar un fenomen d'autoexcitació per la qual cosa es va muntar una maqueta flexible incorporant-li una molla a fi de que la freqüència pròpia fos baixa i amb uns desplaçaments importants i es van mesurar aquestes, comprovant com l'estructura s'excitava sense haver-hi cap excitació fluidodinàmica en aquest rang de freqüències.

Per a concloure aquest segon apartat de la tesi, dir que bàsicament disposant de l'espectre de l'excitació i de la resposta de l'estructura es pot determinar el comportament vibratori de qualsevol estructura.

Crec que s'han assolit els objectius marcats d'establir tota una sistemàtica d'estudi tant des del punt de vista del règim estacionari com del no estacionari de l'acció del vent sobre un edifici.

CAPÍTOL VII

**REFERÈNCIES
BIBLIOGRÀFIQUES**

VII REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES:

[1] ANTONIOU, J. ; BERGELES,G.

"Development of the reattached flow behind surface-mounted two-dimensional prisms"

Journal of Fluids Engineering, 1988

[2] BAKER, C.J.

"The theory of flow between two buildings experimental verification of the assumption of Britter [5]" theory

J. Wind Eng. Ind. Aerodynamic, 6, 169-174, 1980

[3] BEARDS, C.F.

"Structural Vibration Analysis"

Ellis Horwood Limited. Chichester England, 1983

[4] BLEVINS, R.D.

"Applied fluid dynamics handbook"

VNR, 1984

[5] BRITTER, R.E.; HUNT, J.C.R.

"Velocity measurements and order of magnitude estimates of the flow between two buildings in a simulated atmospheric boundary layer"

J. Ind. Aerodynamic, 4, 165-182, 1979

[6] CANET, J.M.

"Cálculo de los esfuerzos producidos por el viento en las estructuras"

Monografía Instituto Eduardo Torroja N° 379 (CSIC), 1984

[7] **CHANG, F.K.**

"Human response to motions in tall buildings"

J. Struct. Div., ASCE, 98 N° ST6, 1973

[8] **CHEN, P.W.; ROBERTSON, L.E.**

"Human perception thresholds of horizontal motion"

J. Struct. Div., ASCE, 97 N° ST8, 1972

[9] **COUNIHAN, J.; HUNT, J.C.R.; JACKSON, P.S.**

"Wakes behind two dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers"

Journal of fluid mechanics, Vol.64, 1974

[10] **DALGLEISH, W.A.**

"Comparison of model/full-scale wind pressures on a high-rise building"

J. Ind. Aerodynamic, 1, 1975

[11] **DAVENPORT, A.G.**

"Gust loading factors"

Proceedings ASCE 93, 11, 1967

[12] **DAVENPORT, A.G.; TSCHANZ, T.**

"The response of tall buildings to wind: Effects of wind direction and the direct measurements of force"

Proceedings, 4 th U.S. National Conference on wind Engineering Research, Seattle, 1981

[13] **DAVENPORT, A.G.; ISYUMOV, N.**

"The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading"

Proceedings of the International Research Seminar on wind effects on buildings and structures. Ottawa. University of Toronto Press., Toronto, 1987

[14] DAVENPORT, A.G.; VICKERY, B.S.; HERTIG, J.A.

"The application of wind engineering principles to the design of structures"

ZACE, Lausanne, 1987

[15] FRANK, W.

"The flow field in the neighbourhood of high building, in flow visualization"

Proceedings of the third International Symposium on flow visualization. Ed. W.J. Yang, 553-557, Hemisphere Washington, 1985

[16] FRIC, T.F.; ROSHKO, A.

"Structure in the near field of the transverse jet"

VII Symposium turbulent shear flows, Spring-Verlag, 1991

[17] GHAZI, M.A.; MOHSEN, M.A.; OLWI, I.A.

"Comparative study of air flow in and around buildings"

Experiments in Fluids, 1990

[18] HERTIG, J.A.

"Peak pressure coefficient distribution around low-rise buildings"

Journal of wind Eng. Ind. Aero. Vol 23, 1986

[19] HERTIG, J.A.

"Dynamic response of structures code approche"

ZACE, Lausanne, 1987

[20] HOLMES, J.D.; LEWIS, R.E.

"Optimization of dynamic-pressure measurement systems"

CSIRD. Division of Building Research, 1986

[21] **ISHIZAKI, H.; CHIU, N.A.L.**

"Wind effects on structures"

University of Tokyo. Press., 1976

[22] **ISO "A 406.1 Y A 406.2 Proposal for wind loading Standard"**

ISO wind load committee ISO TC98/SC3/WG2, 1986

[23] **KATSURA, J.**

"Fluctuating wind pressure on the side surfaces on models with long rectangular sections"

Hiroshima University, 1976

[24] **MATTINGLY, S.A.**

"An experimental study of the flow around a circular cylinder"

Raport N° BN 295 Institute for fluid Dynamics and applied mathematics. University of Maryland College Park, Md, 1972

[25] **MORI, T.; ISHIZAKI, H.**

"Wind tunnel studies of wind excited oscillations of tall buildings"

Kamazawa Institute of Technology Kyoto University, 1976

[26] **MURAKAMI, S.**

"Comparison of various turbulence models applied to a bluff body"

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47
Elsevier 1993 21-36

[27] **PETERKA, J.A.; CERMAK, J.E.**

"Peak pressure duration in separated regions on a structure"

Colorado State University, 1976

[28] ROACHE, P.J.

"Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics"

Annu. Rev. Fluid Mech. 1997: 29:123-60

[29] SAKAMOTO, H.; HANIU, H.

"Effect of free-stream turbulence on characteristics of fluctuating forces acting on two square prisms in tandem arrangement"

Transactions of the ASME, Vol. 110, Junio 1988

[30] SCHUELLER, W.

"High-rise building structures"

Robert Krieger Publishing Company, 1986.

[31] SHIOTANI, M.; IWATANI, Y.

"A study of wind flow at the base of buildings"

Nikon University, 1976

[32] SIMIU, E.; LOZIER, D.W.

"The buffeting of tall structures by strong winds"

Building Science Series 74, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1975

[33] SIMIU, E.; SCALAN, R.H.

"Wind effects of structures. An introduction to wind engineering"

John Wiley & Sons. New York, 1978

[34] SOIZE, C.

"Probabilistic safety of structures"

Speciality Conference 8/9/80. Stochastic Approaches in wind and ocean wave engineering, CTICM, Francia, 1980

[35] SURRY, D.

"Some effects of intern turbulence on the aerodynamics of a circular cylinder at subcritical Reynolds number" J.F.M, N° 52, 1972

[36] SURRY, D.; STAHOPOULOS, T.; DAVENPORT, A.G.

"Simple measurement techniques for area wind loads"
J.F.Mechanics Vol.109 N° 4, 1983

[37] TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L.

"A first course in turbulence"
MIT Press Cambridge Mass., 1972

[38] VICKERY, B.J.

"On the reliability of gust loading factors"
Proceedings of the technical meeting concerning wind loads of building and structures.
Building Science Series 30. National Bureau of standards. Washington D.C., 1970

[39] VICKERY, B.J.

"Aeros-wind vibrations of structures of circular cross-section"
Journal of Wind Engineering, 1983

[40] VICKERY, B.J.; DAVENPORT, A.G.

"Comparison of the theoretical and experimental determination of the response of elastic structures to turbulent flow. Wind effects"
ZACE, Lausanne, 1987

[41] WILLIAMSON, C.H.K.

"Vortex Dynamics in the Cylinder Wake"
Annu. Rev. Fluid. Mech. 1996 28:477-539

[42] WOTTON, L.R.; SCRUTONM, C.

"Aerodynamic stability in the modern design of wind-sensitive structures"

Constr.Inds. Research and Information Ass., Londres, 1971

[43] YAMADA, M.; GOTO, T.

"Criteria for motions in tall buildings"

College of Engineering Hosei University Koanei, 1975

[44] YANG, W.J. (EDITOR)

"Handbook of flow visualization"

Hemisphere, 1989

ANNEXOS

ANNEX 1:

Caracterització del flux d'aire en la cambra d'assaig

ANNEX 1: CARACTERITZACIÓ DEL FLUX D'AIRE EN LA CAMBRA D'ASSAIG

Al no disposar inicialment de la informació necessària sobre les característiques del flux d'aire en la cambra d'assaig del túnel, apareix la necessitat de caracteritzar aquest flux. Per això s'han portat a terme dos tipus d'experiències:

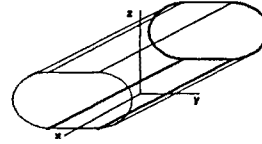
Primer: Utilitzant una sonda de Prandtl s'ha realitzat una exploració de la cambra d'assaig, amb l'objectiu de conèixer els perfils de velocitats i poder quantificar el gruix de les zones properes a les parets on apareix la capa límit i definir les zones on el flux és uniforme (perfil de velocitats pla).

Segon: Mitjançant la utilització de la sonda de pel·lícula calent descrita en l'apartat 3.5.1, s'han quantificat els nivells de turbulència.

En ambdós casos s'han realitzat les exploracions per a velocitats de l'aire en la cambra d'assaig properes els 10, 15 i 20 m/s. Per a cadascuna d'aquestes velocitats s'han portat a terme tres sèries de mesures desplaçant la sonda en direcció vertical (a, b i c en la figura A1.1) i una en direcció horitzontal (d). Els punts d'escombratge vertical s'han localitzat sobre l'eix central de la cambra d'assaig, seguint la direcció del vent, i a 0,25, 0,5 i 0,75 m de l'entrada de la mateixa. L'escombratge horitzontal s'ha localitzat a 0,5 m de l'entrada i a l'altura mitjà. En la figura A1.1 pot apreciar-se la posició de les presses de dades, essent x la direcció del vent. En les taules de la A1.1 a la A1.12 apareixen els valors de les velocitats presses en els assaigs realitzats.

Taula A1.1: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

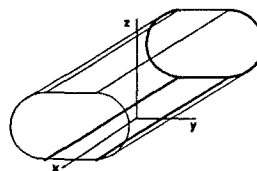
Posició de pressa de dades: c

 $T_{\text{amb}}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 767 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.220 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	3.2	7.2
5	3.8	7.8
7	4.3	8.3
9	4.5	8.5
11	4.8	8.8
13	5.0	9.0
15	5.2	9.1
17	5.3	9.2
19	5.5	9.4
21	5.7	9.6
23	5.8	9.7
25	5.8	9.7
30	5.8	9.7
35	5.8	9.7
45	5.8	9.7
65	5.8	9.7
85	5.8	9.7
105	5.8	9.7
125	5.8	9.7
174	5.8	9.7

Taula A1.2: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

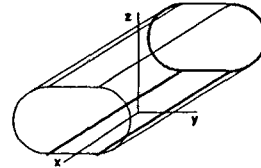
Posició de pressa de dades: c

 $T_{\text{amb}}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	7.0	10.6
4	7.8	11.2
6	8.2	11.5
8	9.2	12.1
10	9.8	12.5
12	10.7	13.1
14	11.2	13.4
16	11.6	13.6
18	12.1	13.9
20	12.3	14.0
22	12.4	14.1
24	12.7	14.3
26	12.6	14.2
28	12.6	14.2
34	12.7	14.3
54	12.7	14.3
84	12.7	14.3
134	12.7	14.3
179	12.7	14.3

Taula A1.3: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

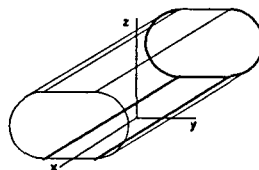
Posició de pressa de dades: c

 $T_{amb}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{amb}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{aire}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
4	11.7	13.7
5	13.0	14.4
7	14.5	15.3
9	15.2	15.6
11	16.5	16.3
13	17.5	16.8
15	18.0	17.0
17	20.0	17.9
19	20.5	18.1
21	20.8	18.3
23	21.4	18.5
25	21.8	18.7
27	22.5	19.0
29	22.5	19.0
35	22.5	19.0
85	22.5	19.0
135	22.5	19.0
175	22.5	19.0

Taula A1.4: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

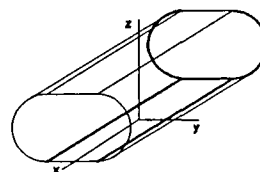
Posició de pressa de dades: a

 $T_{amb}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{amb}: 767 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{aire}: 1.220 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	3.6	7.6
5	4.0	8.0
7	4.4	8.4
9	4.6	8.6
11	4.9	8.9
13	5.1	9.1
15	5.4	9.3
17	5.6	9.5
19	5.6	9.5
21	5.6	9.5
25	5.6	9.5
29	5.7	9.6
35	5.7	9.6
45	5.7	9.6
55	5.7	9.6
75	5.7	9.6
95	5.7	9.6
135	5.7	9.6
180	5.7	9.6

Taula A1.5: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

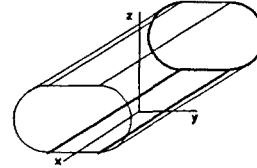
Posició de presa de dades: a

 $T_{\text{amb}}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	7.3	10.8
5	8.0	11.3
7	8.7	11.8
9	9.5	12.3
11	10.4	12.9
13	11.0	13.3
15	12.0	13.9
17	12.0	13.9
19	12.2	14.0
21	12.5	14.2
25	12.5	14.2
29	12.5	14.2
35	12.5	14.2
45	12.5	14.2
55	12.5	14.2
75	12.5	14.2
95	12.5	14.2
135	12.5	14.2
180	12.5	14.2

Taula A1.6: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

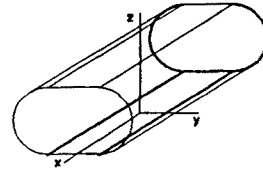
Posició de pressa de dades: a

 $T_{\text{amb}}: 19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	12.5	14.2
5	14.2	15.1
7	15.5	15.8
9	17.0	16.5
11	18.5	17.2
13	19.7	17.8
15	21.0	18.4
17	21.5	18.6
19	22.0	18.8
21	22.5	19.0
25	22.5	19.0
29	22.5	19.0
35	22.5	19.0
45	22.5	19.0
55	22.5	19.0
75	22.5	19.0
95	22.5	19.0
135	22.5	19.0
180	22.5	19.0
174	22.5	19.0

Taula A1.7: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

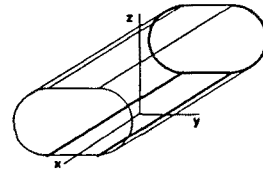
Posició de pressa de dades: b

 $T_{amb}: 20^{\circ}\text{C}$ $P_{amb}: 767 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{aire}: 1.216 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	3.2	7.2
5	3.6	7.6
7	3.9	7.9
9	4.2	8.2
11	4.5	8.5
13	4.7	8.7
15	5.0	9.0
17	5.1	9.1
19	5.4	9.3
21	5.4	9.3
23	5.6	9.5
25	5.6	9.5
30	5.6	9.5
35	5.6	9.5
55	5.6	9.5
75	5.6	9.5
95	5.6	9.5
135	5.6	9.5
175	5.6	9.5

Taula A1.8: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

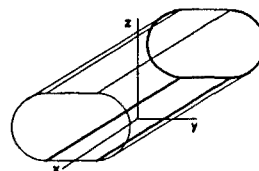
Posició de pressa de dades: b

 $T_{\text{amb}}: 20^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
4	7.5	11.0
5	8.5	11.7
7	8.3	11.5
9	8.8	11.9
11	9.8	12.5
13	10.4	12.9
15	10.9	13.2
17	11.2	13.4
19	11.4	13.5
21	11.8	13.8
23	12.0	13.9
25	12.4	14.1
27	12.7	14.3
29	12.7	14.3
35	12.8	14.3
45	12.8	14.3
75	12.8	14.3
95	12.8	14.3
135	12.8	14.3
180	12.7	14.3

Taula A1.9: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

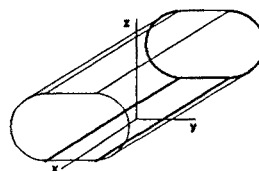
Posició de pressa de dades: b

 $T_{\text{amb}}: 20^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 769 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.223 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
3	12.5	14.2
5	13.0	14.4
7	14.5	15.3
9	15.5	15.8
11	16.0	16.0
13	18.0	17.0
15	19.0	17.5
17	19.5	17.7
19	19.5	17.7
21	20.5	18.1
23	21.5	18.6
25	21.5	18.6
27	22.5	19.0
29	22.5	19.0
35	22.5	19.0
45	22.5	19.0
75	22.5	19.0
95	22.5	19.0
135	22.5	19.0
175	22.5	19.0

Taula A1.10: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

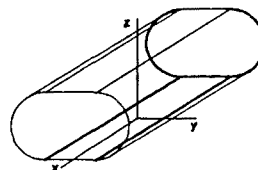
Posició de pressa de dades: d

 $T_{\text{amb}}: 15^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 768 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.239 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
2	2.8	6.7
4	3.2	7.1
6	3.8	7.8
8	4.1	8.1
10	4.4	8.3
12	4.6	8.5
14	4.8	8.7
16	5.2	9.1
18	5.3	9.2
20	5.5	9.3
22	5.6	9.4
24	5.7	9.5
26	5.7	9.5
32	5.7	9.5
36	5.7	9.5
66	5.7	9.5
116	5.7	9.5
166	5.7	9.5
196	5.7	9.5

Taula A1.11: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

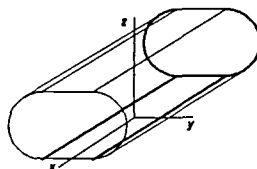
Posició de pressa de dades: d

 $T_{\text{amb}}: 15^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 768 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.239 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
2	5.3	9.2
4	6.5	10.1
6	7.4	10.8
8	8.4	11.5
10	8.8	11.8
12	9.5	12.3
14	10.2	12.7
16	10.4	12.8
18	11.2	13.3
20	11.6	13.6
22	11.9	13.7
24	12.0	13.8
26	12.5	14.1
28	12.6	14.1
30	12.7	14.2
32	12.7	14.2
34	12.6	14.1
66	12.6	14.1
116	12.6	14.1
166	12.6	14.1

Taula A1.12: VELOCITATS MESURADES AMB UNA SONDA DE PRANDTL

Posició de pressa de dades: d

 $T_{\text{amb}}: 15^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{amb}}: 768 \text{ mm.c.Hg}$ $\rho_{\text{aire}}: 1.239 \text{ Kg/m}^3$ 

z (mm)	Δh (mm.c.a)	c (m/s)
2	9.6	12.3
4	11.0	13.2
6	12.2	13.9
8	14.5	15.2
10	15.5	15.7
12	16.5	16.2
14	17.2	16.5
16	19.0	17.3
18	20.0	17.8
20	20.5	18.0
22	21.5	18.5
24	22.0	18.7
26	22.5	18.9
32	22.5	18.9
36	22.5	18.9
66	22.5	18.9
116	22.5	18.9
166	22.5	18.9
196	22.5	18.9

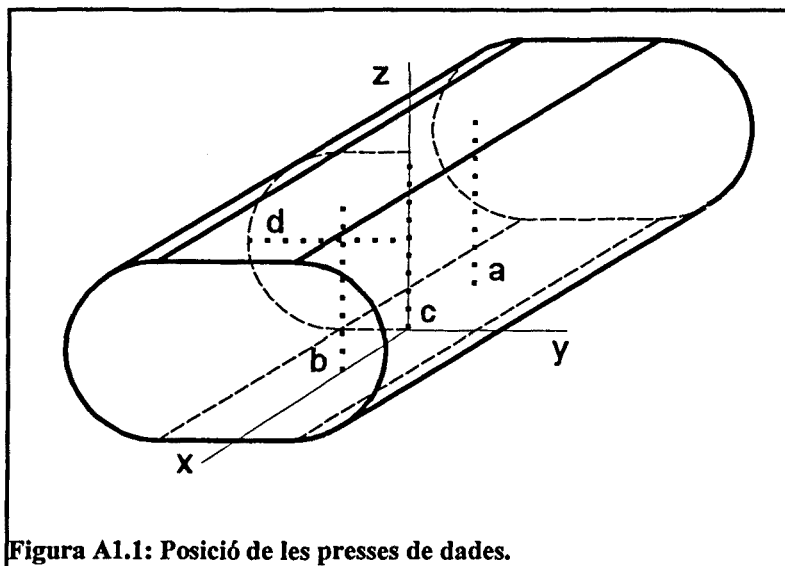


Figura A1.1: Posició de les presses de dades.

En el primer tipus d'experiències els gruixos de la capa límit que s'han trobat per a cadascuna de les posicions del paràgraf anterior i seguint el mateix ordre són:

Taula A1.13: Gruix de la capa límit en la cambra d'assaig del túnel de vent

Velocitat de l'aire (m/s)	Gruix de la capa límit (mm)			
	a	c	b	d
9,57	19	22	23	24
14,26	21	24	27	28
18,98	21	27	29	26

A partir dels gruixos de la capa límit pot calcular-se un coeficient (C_{CL}) que indiqui la importància d'aquests gruixos enfront a les dimensions de la cambra d'assaig:

$$c_{CL} = \frac{\text{Gruix capa límit}}{\text{Alçada cambra assaig}} \cdot 100$$

En la taula A1.14 es presenten els valors calculats segons les dades de la taula A1.1 i recordant que l'altura de la cambra d'assaig és de 470 mm.

Taula A1.14: Valors de C_{CL}

Velocitat de l'aire (m/s)	C_{CL} (%)			
	a	c	b	d
9,57	4,04	4,68	4,89	5,11
14,26	4,47	5,11	5,74	5,96
18,98	4,47	5,74	6,17	5,53

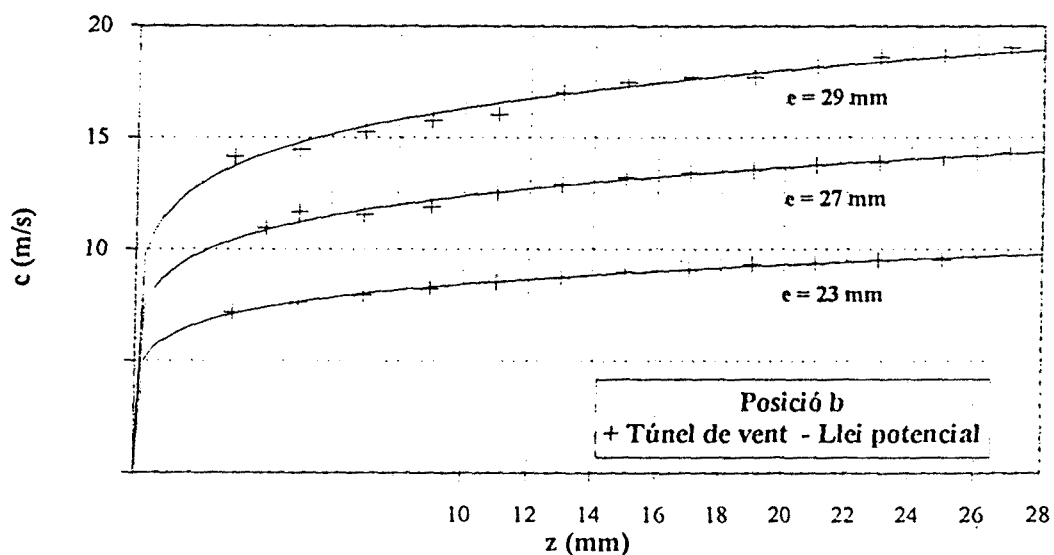
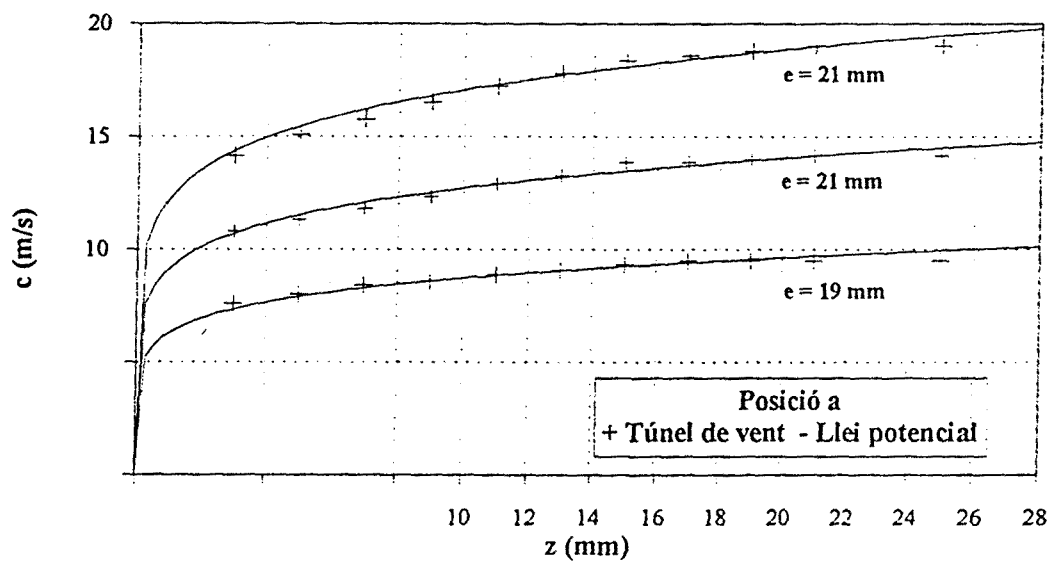
Per a comprovar les dades obtingudes en el laboratori s'han representat en les figures A1.2 i A1.3, els perfils de velocitat experimentals amb els perfils teòrics en una placa plana segons la llei potencial:

$$C = C_o \cdot \left(\frac{d}{e}\right)^{1/7}$$

On C_o és la velocitat de l'aire en l'exterior de la capa límit, d és la distància a la paret i e és el gruix de la capa límit.

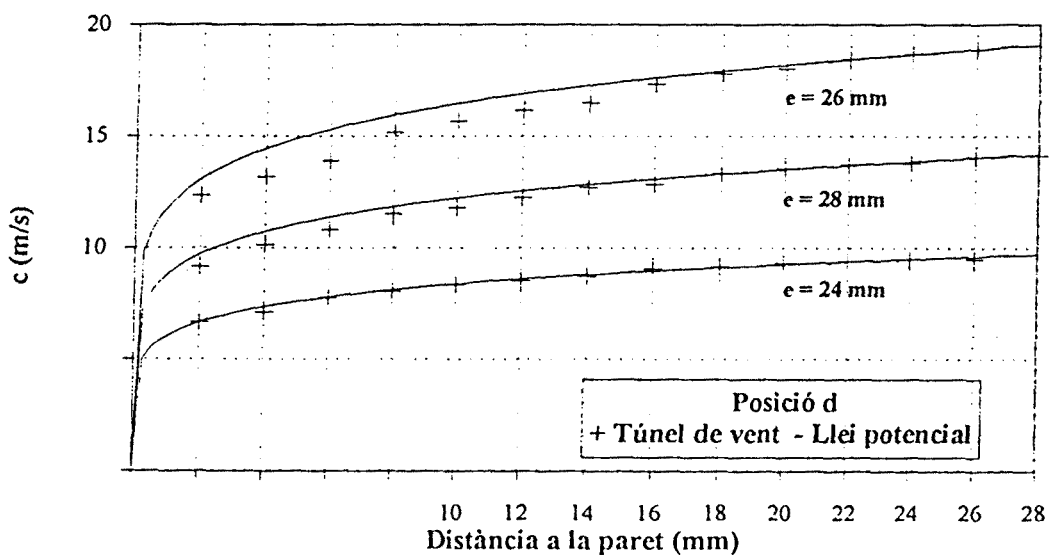
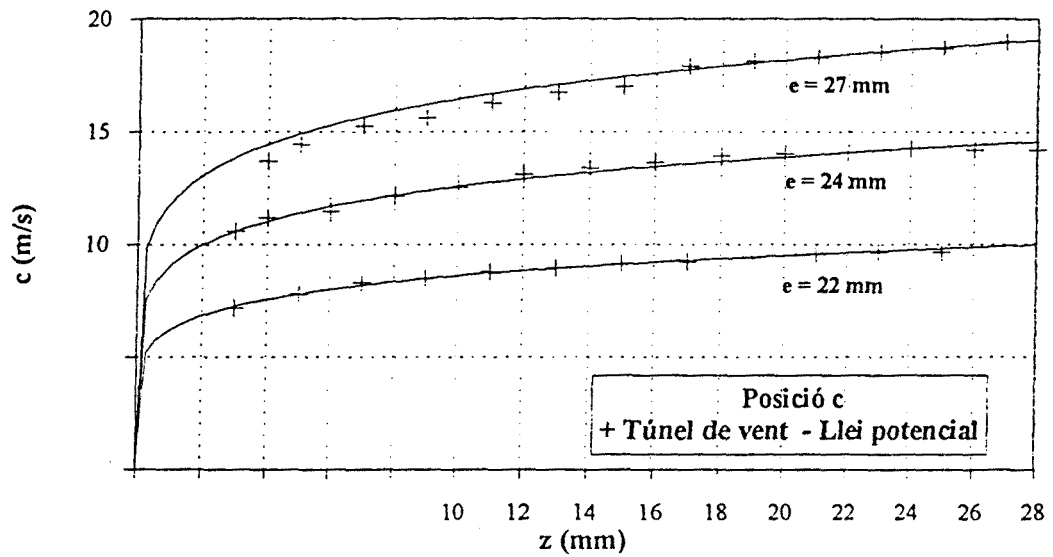
FIGURA A1.2 : PERFIL DE VELOCITATS EN LA
CAPA LÍMIT DEL TÚNEL DE VENT

COMPARACIÓ TÚNEL DE VENT-LLEI POTENCIAL



**FIGURA A1.3 : PERFIL DE VELOCITATS EN LA
CAPA LÍMIT DEL TÚNEL DE VENT**

COMPARACIÓ TÚNEL DE VENT-LLEI POTENCIAL



Intensitat de turbulència.- Amb la necessitat de conèixer la intensitat de turbulència en la cambra d'assaig del túnel de vent, s'han realitzat tres sèries de mesures de velocitat fora de la capa límit i per a cadascuna de les tres velocitats de treball (10, 15 i 20 m/s). La pressa de dades s'ha realitzat amb l'anemòmetre de pel·lícula calent i en cadascuna de les sèries s'han realitzat mesures durant 5,12 segons amb una freqüència de lectura de 0,1 KHz, és a dir, 512 lectures de velocitat en cada sèrie.

En la taula A1.15 es presenten els valors mitjans, obtinguts per a cadascuna de les velocitats, de la velocitat mitjana (\bar{u}), de l'arrel quadrada de la mitjana de variacions al quadrat (u_{rms}) i de la intensitat de turbulència (i), on:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n$$

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}}$$

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_n - \bar{u})^2$$

$$i = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} 100$$

essent N el nombre de lectures i u_n el valor de la lectura enèsima.

Taula A1.15: Nivells de turbulència

\bar{u} (m/s)	u_{rms} (m/s)	i (%)
9,9	0,19	1,9
15,4	0,20	1,3
20,1	0,30	1,5

ANNEX 2:

**Determinació del rang de velocitats que millor
s'adapten al túnel de vent i a les maquetes utilitzades**

ANNEX 2: DETERMINACIÓ DEL RANG DE VELOCITATS QUE MILLOR S'ADAPTEN EL TÚNEL DE VENT I A LES MAQUETES UTILITZADES

S'ha fet servir les expressions de l'apartat flux potencial axisimètric, per a determinar els valors teòrics de la pressió al voltant d'un cilindre. Aquest estudi de les velocitats s'ha efectuat per a set valors diferents de C_{∞} compreses entre 12,65 i 25,298 m/s i amb les condicions que es mostren a la següent Taula N° A2.1. En un principi també es van provar les velocitats de 30,98; 33,45 i 37,51 m/s, però els resultats obtinguts van desaconsellar la seva posterior utilització.

L'elecció d'aquest marge de velocitats es degut a que es vol treballar amb un nombre de Reynolds subcrític, es a dir compres aproximadament entre 5×10^3 i 2×10^5 , a més a més s'ha de garantir una velocitat mínima de 10 m/s i un nombre de Reynolds de $Re = 1 \times 10^5$. Es per això que hom cerca rangs de velocitats que donin nombres de Reynolds superiors a 1×10^5 .

Taula A2.1: Valors de les magnituds utilitzades per a l'experimentació, per a cadascuna de les velocitats (A,B,C,D,E,F,G).

SÍMBOLS	P	T	U	ρ	P_{∞}	C_{∞}	Dim.	Re
UNITATS - VELOCITATS	mmHg	°C	%	Kp.s ² /m ⁴	Kp/m ²	m/s	m	$\times 10^5$
C_A (12,65)	762	24	65	0,119	- 2,01	12,65	0,128	1,08
C_B (15,49)	763	26	60	0,118	- 3,87	15,49	0,128	1,32
C_C (17,84)	760	30	55	0,116	- 5,73	17,84	0,128	1,52
C_D (20,00)	765	25	68	0,119	- 7,70	20	0,128	1,71
C_E (21,91)	764	22	76	0,120	- 9,66	21,91	0,128	1,87
C_F (23,66)	764	22	76	0,120	-11,63	23,66	0,128	2,02
C_G (25,298)	764	22	76	0,120	-13,62	25,29	0,128	2,16

Al final d'aquest annex, es troben totes les taules que es mencionen en el text i que ens mostraran els resultats teòrics i experimentals del flux al voltant d'un cilindre.

VALORS TEÒRICS

Les taules A2.2 i A2.3 mostrant, respectivament, els resultats de les pressions i de les velocitats en funció de la posició sobre un cilindre, obtinguts mitjançant l'aplicació de les expressions de la teoria del flux potencial axisimètric.

VALORS EXPERIMENTALS

Els resultats experimentals de les pressions, per tal de comparar-los amb els valors teòrics s'han pres per a una pressa piezomètrica central (Pressa N° 3) sobre la generatriu del cilindre. Tots aquests resultats estan representats en les taules que es mencionen a continuació.

Per a determinar les velocitats experimentals, una vegada conegudes les pressions, pot fer-se una primera aproximació mitjançant l'aplicació de l'equació de Bernouilli, entre un punt qualsevol M i un punt a l'infinit, amb tots els inconvenients que això representa.

També, es poden construir les taules A2.4 i A2.5, que representen els resultats de les distribucions de pressions i de velocitats al voltant d'aquest cilindre.

Amb els valors de les pressions i amb l'aplicació de la teoria del flux potencial amb discontinuïtats de Helmholtz i Kirchhoff, pot determinar-se la constant K i comparar-la amb els valors teòrics, tal com es pot apreciar a la taula A2.6. Els valors de K obtinguts en la zona compresa entre els 80 i els 90°, són els més pròxims als teòrics de $K = 1,5$. També pot comprovar-se fàcilment que les velocitats més apropiades pel nostre objectiu són les C_A , C_B , C_C i C_D que respectivament valen: (12,65; 15,49; 17,84 i 20 m/s). Per a velocitats superiors

als 20 m/s s'obtenen uns resultats més allunyats dels teòrics, doncs comença a produir-se en només algunes presses de pressió, petites fluctuacions en les lectures dels tubs piezomètrics entre els 70 i els 80°. Per a velocitats superiors, aquestes fluctuacions augmenten de valor i a generalitzar-se per a totes les presses de pressió. Les velocitats C_A i C_B sembla que són les que tenen en conjunt uns resultats més correctes.

Pot afirmar-se també, que la teoria de Helmholtz i Kirchhoff és correcta i que a la zona del deixant els valors del coeficient K valen entre 1,5 i 1,6.

Tal com ja s'ha vist, les distribucions de les pressions observades experimentalment concorden, fins a un cert punt amb les teòriques del fluid ideal a la part anterior del cos, però no així en la part posterior, cosa que ja era previsible.

Per tal de prendre una decisió encertada de quin és el rang de velocitats més adequada, hi han varies maneres de fer-ho, en aquest cas hem considerat els tres camins següents:

- a) la pròpia experiència en realitzar els assaigs;
- b) la contrastació dels resultats obtinguts;
- c) l'ajut d'eines matemàtiques o estadístiques.

Els dos primers - a) i - b) són purament empírics. Si hom es centra en el tercer - c), pot arribar-se a saber quines de les set velocitats estudiades són les que millor s'adapten a la maqueta i a les característiques del túnel utilitzat. Per això es compte amb l'ajut dels coeficients de les correlacions de Pearson i de Spearman.

Aquestes correlacions, s'han fet tant per als valors teòrics, com per als experimentals, ja que dins de les expressions teòriques també intervenen variables experimentals, que poden afectar a l'hora d'escollir la velocitat més adequada. Ja que les dades de que es disposa no venen caracteritzades per la freqüència d'aparició, si no que són valors precisos, i que les

dades poden agrupar-se per la seva dimensió, importància o únicament per l'ordre que ocupen en l'observació, pot utilitzar-se tant el coeficient de correlació gradual de Spearman com el de Pearson. Així per exemple, pot afirmar-se que per a la correlació gradual de Spearman, els valors més baixos sempre apareixen en combinacions de velocitats on intervenen la C_B , C_F i C_G tal com pot apreciar-se a les taules A2.7 i A2.8

Tal com s'observa en les taules de correlacions, i en paràgrafs anteriors, les millors correlacions pels valors obtinguts experimentalment es troben precisament per a velocitats petites, es a dir les C_A , C_B , C_C i C_D .

De les observacions visuals en efectuar l'experimentació, es treu la conclusió de que les lectures per a velocitats elevades presenten petites fluctuacions en els tubs piezomètrics, que fan que les lectures de pressió en el multimanòmetre siguin poc precises.

Els valors de Reynolds per aquestes velocitats C_A , C_B , C_C i C_D poden considerar-se com correcte segons la teoria de Vickery i Davenport [14], ja que són nombres superiors a 1×10^5 que és el valor mínim per tal de realitzar amb èxit proves sobre maquetes d'edificis en túnels de vent, i a més a més totes elles són velocitats superior als 10 m/s.

Per tot el que hem vist fins ara, sembla que ens podríem quedar en les velocitats més petites. A més a més, la velocitat de 15,49 m/s tal com hem vist en l'annex 1, té la intensitat de turbulència més baixa.

Finalment a la Taula A2.9, es poden veure els marges dels números de Reynolds en els que hem estat treballant.

TAULES

Taula A2.2: Resultats de les pressions teòriques sobre un cilindre, en Kp/m² per a diferents rangs de velocitats en m/s (A,B,C..G), en funció de θ .

Graus	C _A	C _B	C _C	C _D	C _E	C _F	C _G
0	7.51	10.28	12.73	16.10	19.14	21.96	24.77
10	6.86	9.32	11.48	14.19	17.19	19.68	22.16
20	5.00	6.56	7.87	9.84	11.56	23.12	14.67
30	2.15	2.32	2.35	2.71	2.94	3.07	3.18
40	-1.34	-2.87	-4.43	-6.03	-7.63	-9.27	-10.92
50	-5.06	-8.40	-11.64	-15.32	-18.89	-22.39	-25.92
60	-8.36	-13.59	-18.12	-24.06	-29.46	-34.72	-40.01
70	-11.40	-17.83	-23.95	-31.19	-38.07	-44.78	-51.50
80	-13.26	-20.59	-27.55	-35.84	-43.71	-51.34	-59.00
90	-13.91	-21.56	-28.01	-37.45	-45.66	-53.62	-61.61
100	-13.26	-20.59	-27.55	-35.84	-43.71	-51.34	-59.00
110	-11.40	-17.83	-23.95	-31.19	-38.07	-44.78	-51.50
120	-8.36	-13.59	-18.12	-24.06	-29.46	-34.72	-40.01
130	-5.06	-8.40	-11.64	-15.32	-18.89	-22.39	-25.92
140	-1.34	-2.87	-4.43	-6.03	-7.63	-9.27	-10.92
150	2.15	2.32	2.35	2.71	2.94	3.07	3.18
160	5.00	6.56	7.87	9.84	11.56	23.12	14.67
170	6.86	9.32	11.48	14.19	17.19	19.68	22.16
180	7.51	10.28	12.73	16.10	19.14	21.96	24.77

Taula A2.3: Resultats teòrics de les velocitats en m/s, obtingudes en funció de l'angle θ i per a diferents velocitats (A,B,C,...,G).

Graus	C _A	C _B	C _C	C _D	C _E	C _F	C _G
0	0	0	0	0	0	0	0
10	3,30	4,03	4,66	5,21	5,71	6,16	6,59
20	6,49	7,95	9,18	10,26	11,24	12,14	12,98
30	9,49	11,62	13,42	15,00	16,43	17,75	18,97
40	12,20	14,94	17,25	19,28	21,13	22,81	24,39
50	14,54	17,80	20,56	22,98	25,18	27,19	29,07
60	16,43	20,12	23,24	25,98	28,46	30,74	32,86
70	17,83	21,83	25,22	28,19	30,87	33,35	35,66
80	18,69	22,88	26,43	29,54	32,37	34,95	37,37
90	18,98	23,24	26,84	30,00	32,87	35,49	37,95
100	18,69	22,88	26,43	29,54	32,37	34,95	37,37
110	17,83	21,83	25,22	28,19	30,87	33,35	35,66
120	16,43	20,12	23,24	25,98	28,46	30,74	32,86
130	14,54	17,80	20,56	22,98	25,18	27,19	29,07
140	12,20	14,94	17,25	19,28	21,13	22,81	24,39
150	9,49	11,62	13,42	15,00	16,43	17,75	18,97
160	6,49	7,95	9,18	10,26	11,24	12,14	12,98
170	3,30	4,03	4,66	5,21	5,71	6,16	6,59
180	0	0	0	0	0	0	0

Taula A2.4: Resultats obtinguts experimentalment, de les pressions en mm.c.a., i per a diferents velocitats.

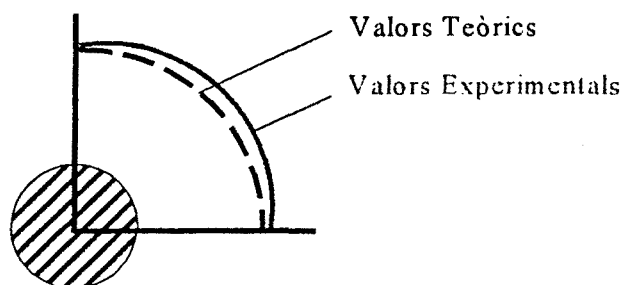
Graus	C _A	C _B	C _C	C _D	C _E	C _F	C _G
0	7	11	15	20	23	28	30
10	5	8	12	15	20	24	27
20	2	4	6	7	12	14	13
30	-2	-3	-2	-2	-4	-1	-4
40	-7	-10	-10	-16	-21	-19	-27
50	-12	-15	-20	-25	-34	-32	-39
60	-12	-20	-24	-31	-41	-45	-64
70	-13	-15	-24	-30	-35	-60	-78
80	-13	-16	-22	-28	-30	-39	-50
90	-12	-16	-24	-28	-35	-43	-48
120	-13	-20	-21	-25	-32	-38	-45
150	-13	-20	-20	-32	-35	-37	-42
180	-13	-18	-20	-28	-35	-34	-37

Taula A2.5: Velocitats en m/s, en funció de l'angle Θ , i obtinguts dels resultats experimentals.

Graus	C _A	C _B	C _C	C _D	C _E	C _F	C _G
0							
10							
20	9.60	10.30	10.75	12.34	10.89	11.49	13.99
30	12.61	14.99	15.92	17.43	19.62	19.55	21.89
40	15.59	18.52	19.77	23.21	25.85	26.11	29.36
50	18.08	20.68	23.73	26.26	29.75	29.97	32.59
60	18.08	22.63	25.14	28.12	31.64	33.39	38.45
70	18.54	20.67	25.14	27.82	30.02	36.94	41.37
80	18.54	21.08	24.44	27.20	28.59	31.85	35.29
90	18.08	21.08	25.14	27.20	30.02	32.88	34.81
120	18.54	22.63	24.09	26.26	29.18	31.59	33.35
150	18.55	22.64	23.74	28.42	30.02	31.34	33.35
180	18.56	21.89	23.75	27.22	30.03	30.54	32.09

Taula A2.6: Comparació dels valors del coeficient K teòrics amb els experimentals, en funció de l'angle θ .

θ	K Teor.	C_A	C_B	C_C	C_D	C_E	C_F	C_G
0	0	0,57	0,61	0,62	0,61	0,66	0,61	0,67
10	0,26	0,73	0,76	0,74	0,76	0,73	0,70	0,73
20	0,51	0,92	0,93	0,93	0,96	0,90	0,89	0,95
30	0,75	1,12	1,16	1,14	1,14	1,17	1,11	1,16
40	0,96	1,34	1,36	1,31	1,37	1,40	1,33	1,39
50	1,15	1,52	1,48	1,50	1,50	1,55	1,47	1,50
60	1,30	1,53	1,60	1,57	1,58	1,63	1,59	1,70
70	1,41	1,55	1,48	1,57	1,57	1,56	1,73	1,81
80	1,48	1,55	1,505	1,54	1,54	1,50	1,54	1,59
90	1,50	1,52	1,505	1,57	1,54	1,56	1,58	1,57
120	1,50	1,55	1,60	1,52	1,50	1,53	1,53	1,55
150	1,50	1,55	1,60	1,50	1,60	1,56	1,52	1,53
180	1,50	1,55	1,55	1,50	1,54	1,56	1,49	1,48



Representació per a la velocitat de 15,49 m/s

Taula 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.

<i>COMBINACIÓ VELOCITATS</i>	<i>PEARSON Teòric</i>	<i>SPEARMAN Teòric</i>	<i>PEARSON Experimental</i>	<i>SPEARMAN Experimental</i>
A-B	0,9999	1	0,9876	0,7197
A-C	0,9999	1	0,9916	0,7197
A-D	0,9999	1	0,9936	0,7857
A-E	0,9999	0,9982	0,9885	0,6098
A-F	0,9999	1	0,9711	0,8076
A-G	0,9999	1	0,9482	0,8351
B-C	0,9999	1	0,9787	0,7692
B-D	0,9999	1	0,9869	0,8021
B-E	0,9999	0,9982	0,9872	0,8351
B-F	0,9999	1	0,9493	0,7582
B-G	0,9999	1	0,9279	0,7472
C-D	1	1	0,9920	0,8351
C-E	0,9999	0,9982	0,9911	0,8461
C-F	0,9999	1	0,9854	0,9670
C-G	0,9999	1	0,9697	0,9670
D-E	0,9999	0,9982	0,9935	0,8901
D-F	0,9999	1	0,9587	0,8791
D-G	0,9999	1	0,9587	0,8791
E-F	0,9999	0,9982	0,9712	0,8951
E-G	0,9999	0,9982	0,9554	0,7912
F-G	0,9999	1	0,9933	0,9890

Taula A2.8: Coeficients correlació Pearson i de Spearman per als valors del coeficient K, per angles entre 0 i 90°.

COMBINACIONS	CORRELACIONS DE PEARSON	CORRELACIONS DE SPEARMAN
KA	0,9818	0,9272
KB	0,9722	0,9272
KC	0,9868	0,9393
KD	0,9816	0,8909
KE	0,9696	0,8787
KF	0,9804	0,9030
KG	0,9683	0,8909

Taula A2.9: Velocitats i nombres de Reynolds.

VELOCITATS C_v , en m/s	NOMBRES DE REYNOLDS Re
$C_A = 12,65$	$1,08 \times 10^5$
$C_B = 15,49$	$1,32 \times 10^5$
$C_C = 17,84$	$1,52 \times 10^5$
$C_D = 20,00$	$1,71 \times 10^5$
$C_E = 21,91$	$1,87 \times 10^5$
$C_F = 23,66$	$2,02 \times 10^5$
$C_G = 25,298$	$2,16 \times 10^5$

La següent taula mostra la comparació de les pressions teòriques amb les experimentals per a una velocitat de 15,49 m/s

θ	Pressions experimentals	Pressions teòriques
0	11	10.28
10	8	9.32
20	4	6.56
30	-3	2.32
40	-10	-2.87
50	-15	-8.4
60	-20	-13.59
70	-15	-17.83
80	-16	-20.59
90	-16	-21.56
120	-20	-13.59
150	-20	2.32
180	-18	10.28

ANNEX 3:

Calibratge de les sondes

ANNEX 3: CALIBRATGE DE LES SONDES

Per a mesurar la velocitat s'utilitza una sonda de Prandtl o bé un equip d'anemometria. En el primer d'ells la velocitat pot ésser mesurada adequadament amb l'ajut d'una cèl·lula de pressió diferencial (o un micròmetre electrònic), o bé mitjançant un manòmetre diferencial de tub inclinat, sempre i quant les velocitats mesurades siguin inferiors als 40 m/s i superiors als 2 m/s, ja que per a velocitats menors la sensibilitat d'aquest tipus de sonda disminueix dràsticament. En el segon també cal fer una sèrie de consideracions.

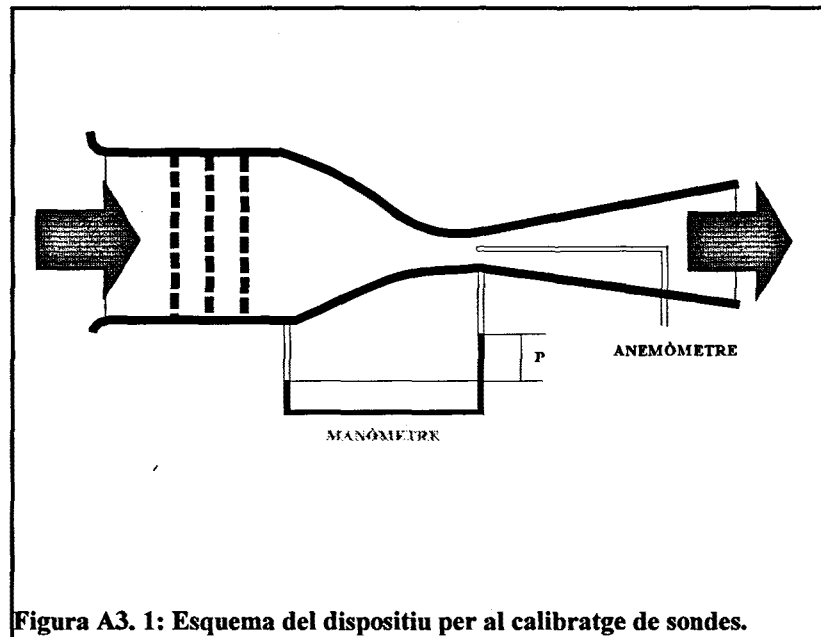
Com ja s'ha comentat el valor de sortida de l'equip d'anemometria és de tensió. Per tant, apareix la necessitat de transformar valors de tensió en velocitats i per això no existeix una llei directa que faciliti aquesta transformació. Per a cada sonda i abans de cada sessió de pressa de dades és necessari realitzar un calibratge de l'equip.

El calibratge consisteix en col·locar la sonda dins d'un flux de velocitat coneguda i baix nivell de turbulència, de manera que l'anar variant la velocitat es van obtenint punts de velocitat i tensió equivalent. Per últim, a aquests punts s'ajusta una llei potencial que posteriorment s'utilitzarà per a passar de tensions a velocitats. La llei potencial utilitzada es de quart ordre:

$$c = C(0) + C(1)E + C(2)E^2 + C(3)E^3 + C(4)E^4$$

On c és la velocitat del fluid i E la tensió de sortida de l'anemòmetre de pel·lícula calent.

L'equip de calibratge consisteix en un túnel obert 55D41/42 de la casa DISA, amb una turbulència residual de 0,5% a 100 m/s i 5 kHz d'ampla de banda. Permet velocitats entre 1 i 200 m/s les quals es determinen per diferència de pressions entre dos punts situats en seccions circulars de diferents diàmetres (equivalent a un mesurador de cabal tipus Venturi) i mesures amb un manòmetre diferencial. En la figura A3.1 es veu un esquema de l'equip.



Alhora de fer aquest calibratge cal tenir en compte que aquest depèn fortament del procés d'embrutiment per adherència de partícules de pols sobre el fil o pel·lícula produït pels canvis sobtats de temperatura a que es veu sotmesa la sonda. Per tant es aconsellable que abans d'utilitzar per primer cop una d'aquestes sondes anemomètriques, o després d'un període de no utilització, es faci un procés d'envelliment, que consisteix en mantenir-la en funcionament fins que no s'aprecii variació en el valor de la resistència en fred.

En el present treball de doctorat s'ha necessitat de diferents calibratges associats cadascun d'ells a una jornada de presa de dades. Les figures A3.2 presenten les corbes d'ajustatge amb el seu error relatiu i en la taula A3.1 els coeficients de cadascuna de les lleis potencials d'ajustatge. Únicament s'inclouen en aquest estudi, els tres calibratges que han estat utilitzats

en les presses de dades considerades útils per a l'estudi, deixant de cantó totes els calibratges de prova o utilitzades només en presses de dades que posteriorment s'han desestimat.

En les gràfiques de calibratge s'observa un bon ajustatge de la llei potencial als punts de calibratge per a velocitats superiors a 2 m/s, mentre que per a valors inferiors aquests ajustatges són massa grollers. Per tant, apareixen limitacions respecte a la mesura de velocitats per sota de 2 m/s, no podem considerar aquestes mesures com representatives. (Donades les característiques de funcionament del túnel considerat).

Taula A3.1: Coeficients d'ajustatge per a cadascun dels calibratges.

	Calibratge 1	Calibratge 2	Calibratge 3
C(0)	0,000151	0,000196	0,000082
C(1)	12,7273	9,37113	10,7866
C(2)	-16,8177	-12,6106	-14,366
C(3)	6,60955	4,94232	5,64807
C(4)	-0,680838	-0,46718	-0,557442

Queden per tant les següents expressions:

$$\text{Calibratge 1: } c=0.00151+12.7273.E-16.8177.E^2+6.60955.E^3-0.680838.E^4$$

$$\text{Calibratge 2: } c=0.000196+9.37113.E-12.6106.E^2+4.94232.E^3-0.46718.E^4$$

$$\text{Calibratge 3: } c=0.000082+10.7866.E-14.366.E^2+5.64807.E^3-0.557442.E^4$$

FIGURA A3.2: CALIBRACIÓ DE LA SONDA DE PELLÍCULA CALENT

CALIBRACIÓ I

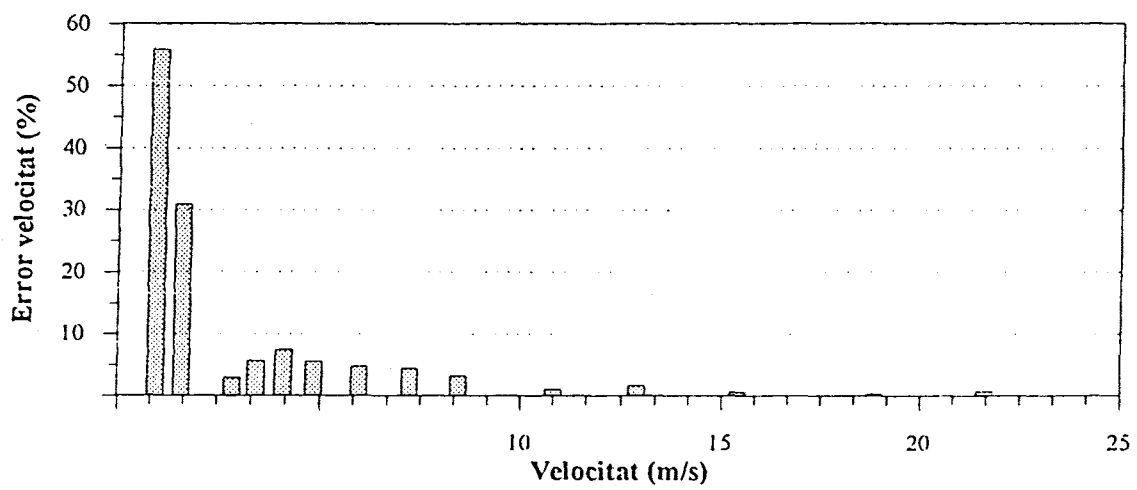
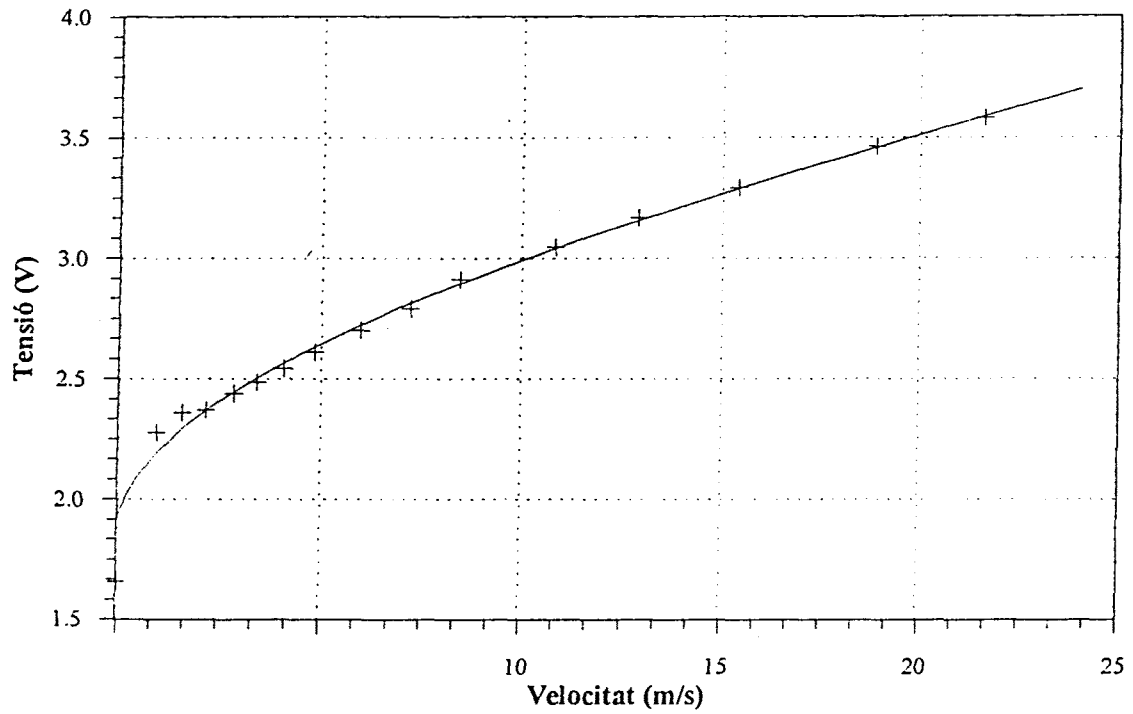


FIGURA A3.2 (continuació): CALIBRACIÓ DE LA SONDA DE PEL·LÍCULA CALENT DE PEL·LÍCULA CALENT

CALIBRACIÓ 2

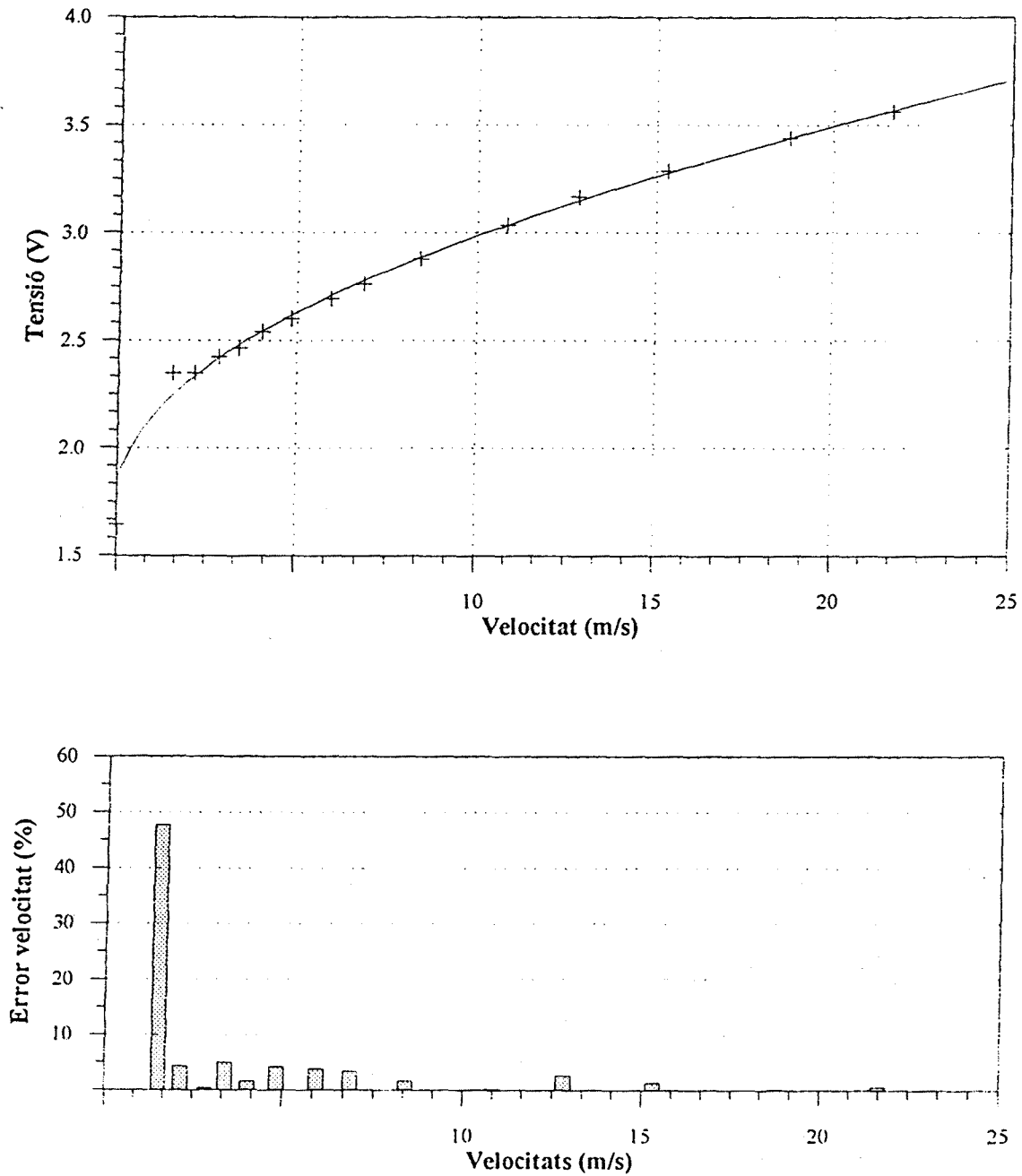
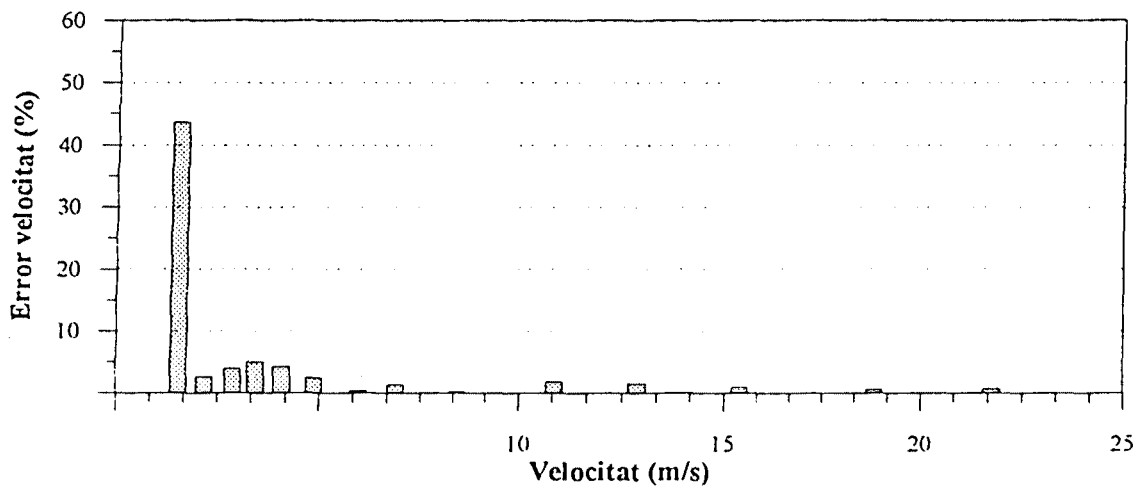
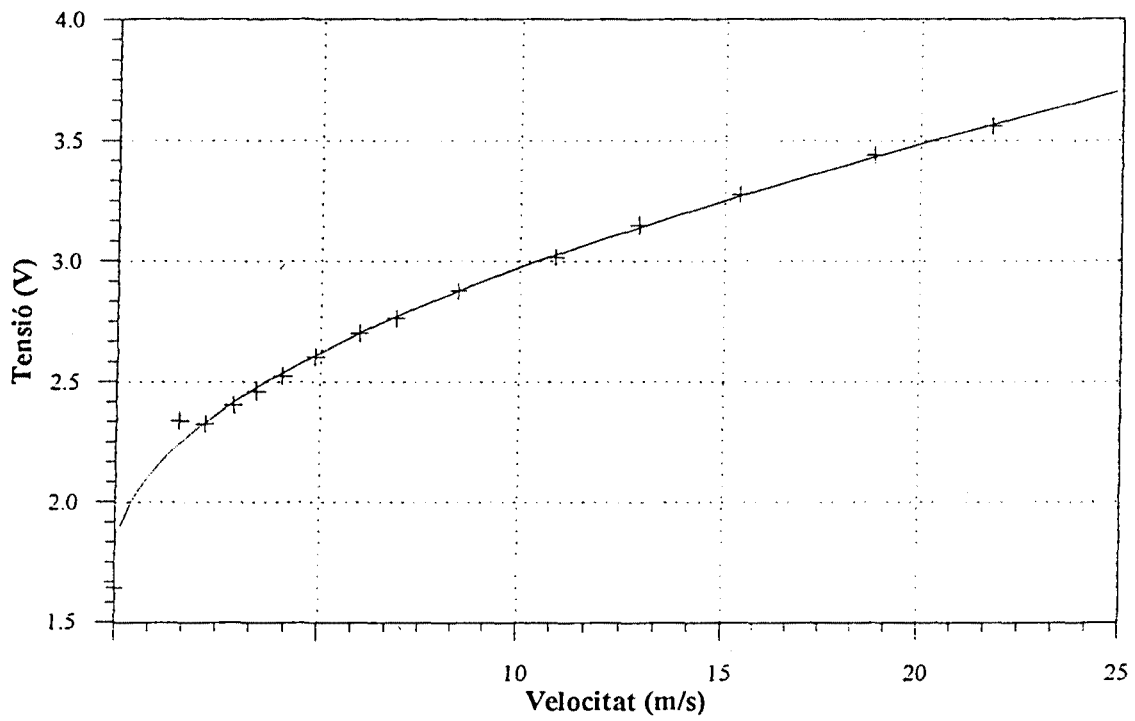


FIGURA A3.2 (continuación): CALIBRACIÓ DE LA SONDA DE PEL·LÍCULA CALENT

CALIBRACIÓ 3



ANNEX 4:

Resultats experimentals de les pressions i de les velocitats

ANNEX 4: RESULTATS DE LES MESURES EXPERIMENTALS DE PRESSIÓ I DE VELOCITAT

En aquest annex, es presenten els resultats numèrics de les pressions, coeficients de pressions i velocitats per a la maqueta octogonal en les dues posicions.

Així, en les taules A4.1 es presenten els valors de les pressions, a l'A4.2 els valors dels coeficients de pressió i a l'A4.3 els valors de les velocitats per a les diferents posicions esmentades en la figura 4.23 del capítol 4.

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 les següents taules A4.1:

Taula A4.1: Valors de les pressions

POSICIÓ RADIAL								
θ	h1 mmca	h2 mmca	h3 mmca	h4 mmca	h5 mmca	h6 mmca	h7 mmca	h8 mmca
22,5°	4,0	3,0	4,0	4,5	5,0	-19,0	-16,0	-15,5
67,5°	-11,5	-13,0	-13,5	-13,0	-12,5	-22,5	-22,0	-16,0
112,5°	-17,0	-17,0	-17,5	-16,0	-15,0	-24,0	-25,0	-22,0
157,5°	-17,0	-17,5	-17,5	-16,5	-15,0	-24,0	-23,0	-23,0

POSICIÓ FRONTAL								
θ	h1 mmca	h2 mmca	h3 mmca	h4 mmca	h5 mmca	h6 mmca	h7 mmca	h8 mmca
0°	8,5	8,5	10,0	10,0	10,0	-21,5	-20,5	-19,0
45°	-5,0	-5,0	-5,0	-5,5	-5,5	-22,5	-23,5	-19,0
90°	-21,5	-21,0	-20,0	-18,5	-20,0	-22,5	-24,0	-21,5
135°	-21,0	-20,0	-20,5	-19,0	-18,5	-23,0	-23,0	-23,0
180°	-21,5	-20,5	-20,5	-18,5	-17,5	-23,0	-23,0	-22,5

Taulas A4.2: Coeficients de pressió en les cares de la maqueta octogonal

POSICIÓ RADIAL								
θ	K_p 1	K_p 2	K_p 3	K_p 4	K_p 5	K_p 6	K_p 7	K_p 8
22,5°	0,55	0,48	0,55	0,58	0,62	-1,07	-0,86	-0,82
67,5°	-0,54	-0,65	-0,68	-0,65	-0,61	-1,13	-1,28	-0,86
112,5°	-0,93	-0,93	-0,96	-0,86	-0,79	-1,42	-1,49	-1,28
157,5°	-0,93	-0,96	-0,96	-0,89	-0,79	-1,42	-1,35	-1,35

POSICIÓ FRONTAL								
θ	K_p 1	K_p 2	K_p 3	K_p 4	K_p 5	K_p 6	K_p 7	K_p 8
0°	0,86	0,86	0,96	0,96	0,96	-1,24	-1,17	-1,06
45°	-0,08	-0,08	-0,08	-0,11	-0,11	-1,31	-1,38	-1,41
90°	-1,24	-1,20	-1,13	-1,13	-1,13	-1,31	-1,41	-1,24
135°	-1,20	-1,13	-1,17	-1,06	-1,03	-1,34	-1,34	-1,34
180°	-1,24	-1,17	-1,17	-1,03	-0,96	-1,34	-1,34	-1,31

Taula A4.3: Mesures experimentals de la velocitat per a diferents posicions

POSICIÓ R1			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c_0
0	-3,75	0	-0,25
25	-4,60	0,089	-0,31
50	-3,82	0,179	-0,25
75	-3,69	0,268	-0,25
100	-3,33	0,357	-0,22
125	-2,88	0,446	-0,19
150	-2,54	0,536	-0,17
175	-2,17	0,625	-0,14
200	-1,91	0,714	-0,13
225	-1,86	0,804	-0,12
250	2,39	0,893	0,16
275	8,08	0,982	0,54
300	14,95	1,071	1,00
325	18,86	1,161	1,26
350	18,78	1,250	1,25
375	18,47	1,339	1,23
400	18,34	1,429	1,22

POSICIÓ R2			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c _z
0	-5,29	0	-0,35
25	-6,82	0,089	-0,45
50	-7,59	0,179	-0,51
75	-6,96	0,268	-0,46
100	-5,41	0,357	-0,36
125	-4,92	0,446	-0,33
150	-4,21	0,536	-0,28
175	-3,46	0,625	-0,23
200	4,32	0,714	0,29
225	7,83	0,804	0,52
250	12,26	0,893	0,82
275	15,39	0,982	1,03
300	17,39	1,071	1,16
325	18,08	1,161	1,21
350	18,04	1,250	1,20
375	17,88	1,339	1,19
400	17,93	1,429	1,20

POSICIÓ R3			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _s
80	18,29	0,286	1,22
90	17,88	0,321	1,19
100	17,78	0,357	1,19
110	17,61	0,393	1,17
120	17,54	0,429	1,17
130	17,72	0,464	1,18
140	17,54	0,500	1,17
150	17,37	0,536	1,16
160	17,28	0,571	1,15
170	17,33	0,607	1,16
195	17,25	0,696	1,15
220	16,88	0,786	1,13
245	15,78	0,875	1,05
270	15,21	0,964	1,01

POSICIÓ R4			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _s
0	4,62	0	0,31
15	4,77	0,054	0,32
30	4,56	0,107	0,30
45	4,39	0,161	0,29
60	4,41	0,214	0,29
75	6,56	0,268	0,44
90	16,32	0,321	1,09
105	19,24	0,375	1,28
120	18,93	0,429	1,26
135	18,60	0,482	1,24
150	18,41	0,536	1,23
165	18,45	0,589	1,23
180	18,31	0,643	1,22
200	18,20	0,714	1,21
225	17,44	0,804	1,16
250	16,60	0,893	1,11

POSICIÓ R5			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _z
0	5,71	0	0,38
15	5,51	0,054	0,37
30	4,84	0,107	0,32
45	4,44	0,161	0,30
60	5,00	0,214	0,33
75	7,34	0,268	0,49
90	12,67	0,321	0,84
105	17,71	0,375	1,18
120	18,96	0,429	1,26
135	19,06	0,482	1,27
150	18,77	0,536	1,25
165	18,53	0,589	1,24
180	18,45	0,643	1,23
200	18,35	0,714	1,22
225	17,83	0,804	1,19
250	16,97	0,893	1,13

POSICIÓ R6			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c _s
290	6,62	1,036	0,44
300	15,02	1,071	1,00
310	20,95	1,107	1,40
320	20,77	1,143	1,38
330	19,82	1,179	1,32
345	19,54	1,232	1,30
360	18,89	1,286	1,26
380	18,24	1,357	1,22
400	18,40	1,429	1,23
420	17,82	1,500	1,19

POSICIÓ F1			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c _s
0	-4,08	0	-0,27
25	-5,12	0,089	-0,34
50	-4,77	0,179	-0,32
75	-4,66	0,268	-0,31
100	-4,41	0,357	-0,29
125	-4,14	0,446	-0,28
150	-3,37	0,536	-0,22
175	-2,87	0,625	-0,19
200	-2,37	0,714	-0,16
225	-1,94	0,804	-0,13
250	2,25	0,893	0,15
275	7,44	0,982	0,50
290	11,13	1,036	0,74
300	13,23	1,071	0,88
325	19,10	1,161	1,27
350	18,86	1,250	1,26
375	18,59	1,339	1,24
400	18,43	1,429	1,23

POSICIÓ F2			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c_*
0	-4,78	0	-0,32
25	-7,42	0,089	-0,49
50	-8,34	0,179	-0,56
75	-7,90	0,268	-0,53
100	-7,01	0,357	-0,47
125	-6,14	0,446	-0,41
150	-5,28	0,536	-0,35
175	-4,22	0,625	-0,28
200	-4,00	0,714	-0,27
225	-5,36	0,804	-0,36
250	9,08	0,893	0,61
275	14,28	0,982	0,95
300	17,42	1,071	1,16
325	18,24	1,161	1,22
350	18,21	1,250	1,21
375	18,04	1,339	1,20
400	18,06	1,429	1,20
425	17,52	1,518	1,17

POSICIÓ F3			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _z
74	16,76	0,264	1,12
84	17,54	0,300	1,17
94	17,21	0,336	1,15
104	16,91	0,371	1,13
114	16,72	0,407	1,11
124	16,90	0,443	1,13
134	16,73	0,479	1,12
144	16,52	0,514	1,10
154	16,45	0,550	1,10
164	16,63	0,586	1,11
189	16,45	0,675	1,10
214	16,23	0,764	1,08
239	15,75	0,854	1,05
274	14,71	0,979	0,98

POSICIÓ F4			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _z
0	4,61	0	0,31
15	4,77	0,054	0,32
30	4,69	0,107	0,31
45	4,52	0,161	0,30
60	4,71	0,214	0,31
75	4,72	0,268	0,31
90	8,89	0,321	0,59
105	17,36	0,375	1,16
120	18,58	0,429	1,24
135	18,34	0,482	1,22
150	18,44	0,536	1,23
165	18,11	0,589	1,21
180	18,00	0,643	1,20
200	17,78	0,714	1,19
225	17,20	0,804	1,15
250	16,11	0,893	1,07

POSICIÓ F5			
y (mm)	uw (m/s)	y/H	uw/c _z
0	5,92	0	0,39
15	5,82	0,054	0,39
30	5,56	0,107	0,37
45	5,03	0,161	0,34
60	5,02	0,214	0,33
75	6,01	0,268	0,40
90	8,79	0,321	0,59
105	13,35	0,375	0,89
120	17,14	0,429	1,14
135	18,37	0,482	1,22
150	18,37	0,536	1,22
165	18,26	0,589	1,22
180	18,24	0,643	1,22
200	17,89	0,714	1,19
225	17,50	0,804	1,17
250	16,55	0,893	1,10

POSICIÓ F6			
z (mm)	uv (m/s)	z/H	uv/c _z
290	2,65	1,036	0,18
300	4,43	1,071	0,30
310	17,53	1,107	1,17
320	19,07	1,143	1,27
330	18,62	1,179	1,24
345	18,28	1,232	1,22
360	17,96	1,286	1,20
380	17,73	1,357	1,18
400	17,35	1,429	1,16
420	17,11	1,500	1,14

ANNEX 5:

Diferents metedologies per a l'estudi d'un edifici real

ANNEX 5: METODOLOGIES PER L'ESTUDI DINÀMIC D'UN EDIFICI REAL

Tal com ja s'ha vist en el capítol V, han sorgit diferents metodologies per tal d'estudiar teòricament els efectes dinàmics del vent sobre estructures reals. Bàsicament podem assegurar que existeixen dues bastant semblants, els anomenats "mètode estàtic equivalent de Davenport" i el "mètode de Simiu" amb dues versions, la general i la simplificada.

Mètode estàtic equivalent de Davenport.-

L'idea del mètode, consisteix en trobar el factor G^* (factor de ràfega) que multiplicat per la pressió mitja produïda pel vent, s'obtingui unes forces, les quals mitjançant un càlcul estàtic ens proporcionin la mateixa resposta de l'estructura que la que s'obtidria aplicant un mètode dinàmic amb les pressions i velocitats següents:

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

$$u_{m\grave{a}x} = \bar{u} + g_{u'} \sigma_{u'}$$

$$u_{m\grave{a}x} = G^* \bar{u}$$

a) Resposta mitjana

Considerem, només el primer mode de vibració, suposant a més a més que:

$$\Phi_1(z) = \lambda z$$

o fent el canvi de variable $z = ZH$

$$\Phi_1(Z) = \sqrt{3} \cdot z$$

La distribució en altura de velocitats mitjana bé donada per:

$$\bar{v}(Z) = \bar{v}_1 \cdot Z^\alpha$$

on \bar{v}_1 és la velocitat mitjana en el punt $Z = 1$ ($z = H$) i α és un paràmetre que depèn de la rugositat del terreny, per tant les pressions produïdes pel vent valen:

$$\bar{q}(Z) = \bar{q}_1 Z^{2\alpha}$$

on \bar{q}_1 és la pressió en el punt més alt de l'estructura. En aquest cas la força generalitzada \bar{F}_1 val:

$$\bar{F}_1 = H \int_0^1 \bar{q}(Z) \Phi_1(Z) dZ = \lambda H \bar{q}_1 \int_0^1 Z^{1+2\alpha} dZ = \frac{\lambda H \bar{q}_1}{2(1+\alpha)}$$

Per tant la resposta mitjana \bar{Y}_1 del primer mode val:

$$\bar{y}_1 = \frac{\sqrt{3}}{K_1 2(1+\alpha)} \cdot \bar{q}_1$$

on K_1 és la rigidesa generalitzada del primer mode ($K_1 = \omega_1^2 \cdot M_1$)

b) Resposta de la part oscil·lant

$$S_{F_1}(f) = 3 \int_{A_i} \int_{A_j} Z_i Z_j S_q(P_i P_j f) dA_i dA_j$$

Si a l'expressió de l'espectre només considerem el primer mode, tenim;

Si a més, substituïm $S_q(P_i, P_j, f)$ pel seu valor en funció de $S_v(P_i, P_j, f)$, queda:

$$S_{F_1}(f) = 3\rho^2 C^2 \left| \int_{A_i} \int_{A_j} Z_i Z_j \bar{v}(Z_i) \bar{v}(Z_j) R_v(P_i, P_j, f) N_v(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right| S_v(f)$$

Davenport fa les següents aproximacions:

- 1) La integració es realitza únicament sobre la cara frontal d'incidència del vent, per tant $C = C_D$ i $N_v = 1$.
- 2) La funció $R_v(P_i, P_j, f) = \exp[-C\{Z_i - Z_j\} - C'\{y_i - y_j\}]$ amb: $C = (8Hf)/\bar{v}^-$ i $C' = (20Hf)/(\bar{v}^-) \cdot (B/H)$, i tenint en compte que, $(\rho C)^2 = 4P_1^{-2}/\bar{v}_1^{-4}$, l'expressió anterior es pot escriure com:

$$S_{F_1}(f) = \frac{4 \cdot \bar{q}_1^2}{\bar{v}_1^2} \left| 3 \int_0^1 \int_0^1 \frac{\bar{v}(Z_i)}{\bar{v}_1} \frac{\bar{v}(Z_j)}{\bar{v}_1} Z_i Z_j e^{-C|Z_i - Z_j|} dZ_i dZ_j \right| \cdot \left| \int_0^1 \int_0^1 e^{-C'|y_i - y_j|} dy_i dy_j \right| S_v(f)$$

i nomenant:

$$J_v(f) = 3 \int_0^1 \int_0^1 \frac{\bar{v}(Z_i)}{\bar{v}_1} \frac{\bar{v}(Z_j)}{\bar{v}_1} Z_i Z_j e^{-C|Z_i - Z_j|} dZ_i dZ_j$$

$$J_H(f) = \int_0^1 \int_0^1 e^{-C'|y_i - y_j|} dy_i dy_j$$

queda per tant, l'espectre de potencia del desplaçament del primer mode:

$$S_y(f) = \frac{4\overline{q_1^2}}{v_1^2} J_v(f) J_H(f) [H_1(f)]^2 S_v(f)$$

Si a més a més $x_1(f) = H_1(f) \cdot K_1$, s'obté:

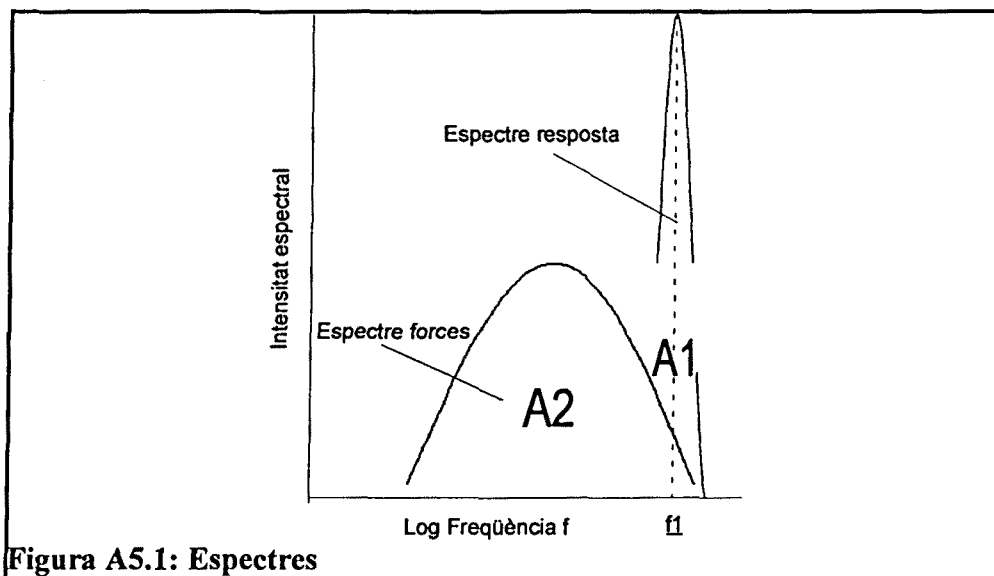
$$\frac{f \cdot S_y(f)}{y^2} = \frac{16}{3} (1+\alpha)^2 |x(f)|^2 J_v(f) J_H(f) \frac{f \cdot S_v(f)}{v_1^2}$$

Per a trobar la variància normalitzada de la resposta.

$$\frac{\sigma_y^2}{y^2} = \int_0^{\infty} \frac{f \cdot S_y(f)}{y^2} d(\ln f)$$

Si representéssim l'espectre. Figura A5.1

$$\frac{f \cdot S_y(f)}{y^2}$$



podríem comprovar que està format per dues parts:

- 1) Un pic d'àrea A_1 corresponent a la freqüència natural del primer mode f_1 , que val:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{\pi}{4\xi} \cdot \frac{f_1 S_q(f_1)}{4q_1^2} \cdot \frac{16}{3} \cdot (1+\alpha)^2 = \\
 &= \frac{\pi}{4\xi} \cdot J_v(f_1) J_H(f_1) \cdot \frac{f_1 S_v(f_1)}{v_1^2} \cdot \frac{16}{3} \cdot (1+\alpha)^2 = \\
 &= \frac{\pi}{4\xi} \cdot J_v(f_1) J_H(f_1) \cdot \frac{4(1200 \frac{f_1}{v(10)})^2}{[1+2000(\frac{f_1}{v(10)})^{4/3}]^{4/3}} \cdot \frac{16}{3} \cdot (\frac{10}{H})^{2\alpha} \cdot K_1
 \end{aligned}$$

essent ξ el tant per u d'amortiment ($\xi = 0,005 \div 0,01$ per estructures d'acer i $\xi = 0,01 \div 0,02$ per les de formigó).

- 2) Una part de baixes freqüències d'àrea A_2 corresponent a l'espectre de les forces generalitzades f_1 , que val:

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \int_0^{\infty} \frac{f S_q(f)}{q^2} d(\ln f) = \\
 &= \frac{16}{3} (1+\alpha)^2 \int_0^{\infty} J_v(f) J_H(f) \cdot \frac{f S_v(f)}{v_1^2} d(\ln f) = \\
 &= 32 K_1 \left(\frac{30}{H} \right)^{2\alpha} \left| \frac{1}{[1+(\frac{450}{H})^2]^{1/3}} - 1 \right|
 \end{aligned}$$

D'acord amb el que hem vist, el factor de ràfega G^* , val:

$$G^* = 1 + g \frac{\sigma_y}{y} = 1 + g_r \sqrt{A_1 + A_2} = 1 + g_r \sqrt{B + R}$$

on: $g = \sqrt{(2 \cdot \ln(f_1 T) + 0,5772) / (2 \cdot \ln(f_1 T))}$, és el factor de pic; si prenem \bar{v}_{10} com velocitat mitja horària $T = 3600$ segons, el factor de rugositat val $r = 4 \sqrt{(K_s)(10/H)^{\alpha}}$

$$B = 2 \left| \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{450}{H}\right)^2\right]^{1/3}} - 1 \right|$$

$$R = \frac{s F}{\xi}$$

$$s = \frac{\pi}{3} J_v J_H (1 + \alpha)^2$$

$$F = \frac{\frac{1200 f_1^2}{\bar{v}(10)}}{\left[1 + \left(\frac{1200 f_1^2}{\bar{v}(10)}\right)^{4/3}\right]}$$

EXEMPLE: Utilització d'aquesta metodologia pel cas presentat.-

Per a entendre clarament aquest mètode, en aquest subapartat es mostra l'exemple de l'edifici proposat. S'ha de tenir en compte que alguns valors utilitzats són orientatius i s'han escollit valors entre els límits.

DADES:

- Edifici prismàtic regular de base octogonal
- Alçada de 84 m = H
- Amplada de 38,4 m = D = B
- Edifici exposat al vent
- Paràmetre dependent del tipus de terreny $\alpha = 0,16$
- Gradient d'alçada $z_g = 270$ m
- Coeficient de rugositat $K_t = 0,005$
- Velocitat mitjana horària del vent per a una altura de 10 m; $v^-(10) = 28$ m/s ≈ 100 Km/h
- Coeficient de resistència a l'avanç $C_D \approx 1,4$
- Freqüència primera pròpia (natural) de l'estructura $f_1 = 0,1$ Hz
- Tant per u d'amortiment respecte al crític $\xi = 0,16$
- Període $T = 3600$ s.

CÀLCULS: Han estat realitzats mitjançant fórmules, gràfiques i taules del llibre de l'investigador Canet (1984).

- Variació amb l'alçada z de la velocitat mitjana del vent, per una llei de tipus potencial

$$v^-(z) = v^-(10) \cdot (z/10)^\alpha = 28 \cdot (z/10)^{0,16}$$

- Pressió mitjana per aquesta alçada

$$q(z) = 1/2 \cdot 1,25 \cdot 0,987 \cdot [28 \cdot (z/10)^{0,16}]^2 = 76,65 \cdot z^{0,32} \text{ N/m}^2$$

- Velocitat mitjana per a una alçada $H = 84$ m

$$\bar{v}(H) = \bar{v}(10) \cdot (H/10)^\alpha = 28 \cdot (84/10)^{0,16} = 39,35 \text{ m/s}$$

- Freqüència reduïda

$$\chi = f_1 \cdot H / \bar{v}(H) = 0,5 \cdot 84 / 39,35 = 0,21$$

- Factor $s = 0,32$ (Gràfica Canet)

- Factor F

$$F = \frac{\left| \frac{1200 \cdot f_1}{\bar{v}(10)} \right|^2}{\left| 1 + \left| \frac{1200 \cdot f_1}{\bar{v}(10)} \right|^2 \right|^{4/3}} = 0,35$$

- Factor de resposta a la ressonància R_r

$$R_r = s \cdot F / \xi = 0,32 \cdot 0,35 / 0,16 = 0,70$$

- Factor de resposta a la grandària de l'edifici B_r

$$B_r = 2 \cdot \left| 1 - \frac{1}{\left| 1 + \left(\frac{270}{84} \right)^2 \right|^{1/3}} \right| = 1,10$$

- Factor de rugositat r

$$r = 4 \cdot \sqrt{k_r} \cdot \left| \frac{10}{H} \right|^\alpha = 4 \cdot \sqrt{0,005} \cdot \left| \frac{10}{84} \right|^{0,16} = 0,20$$

- Factor de pic de la pressió oscil·lant g_q

$$g_q = |2 \cdot \ln(f \cdot T)|^{1/2} + \frac{0.5772}{|2 \cdot \ln(f \cdot T)|^{1/2}} = 3,59$$

RESULTAT:

$$G^* = 1 + g_q \cdot r \cdot ((B_r + R_r))^{1/2} = 1 + 3,59 \cdot 0,20 \cdot ((1,10 + 0,70))^{1/2} = 1,96$$

$$G^* = 1,96$$

És a dir que la pressió total a considerar en els càlculs estàtics, una vegada s'ha tingut en compte l'efecte dinàmic, és 1,96 vegades la pressió produïda per la pressió dinàmica mitjana del vent.

$$q_{\max} = G^* \cdot q$$

Mètode de Simiu.- En Simiu proposa un mètode general d'anàlisi, realitzant algunes simplificacions i a partir d'aquí arriba a unes formulacions del mateix tipus que el proposat per en Davenport i que venen representades normalment en forma de gràfiques.

a) Mètode general

Partint de l'expressió 9, substituint el terme $S_{\text{qij}}(f)$ per $(1/4)\rho^2 C_D^2 \bar{v}^-(z_i)^2 \bar{v}^-(z_j)^2$ i fent $\bar{\omega} = 0$, $z = ZH$ i prenent $dA = Bdz$, trobem el desplaçament mitja en un punt z_g .

$$\begin{aligned} \bar{u}_g = \bar{u}(z_g) &= \frac{1}{2} \rho C_D B \left| \sum_r \sum_s H_r H_s^* \Phi_r(z_g) \Phi_s(z_g) \cdot \int_0^1 \int_0^1 \bar{v}^-(z_i) \bar{v}^-(z_j) \Phi_r(z_i) \Phi_s(z_j) dz_i dz_j \right|^{1/2} \Big|_{\omega=0} \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho B \left| \sum_r [H_r] \Phi_r(z_g) \int_0^1 \bar{v}^-(z) \Phi_r(z) dz \right|_{\omega=0} = \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho B \sum_r \frac{1}{4\pi^2 M f_r^2} \Phi_r(z_g) \int_0^1 \bar{v}^-(z) \Phi_r(z) dz = \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho B H^2 \frac{\sum_r \frac{\Phi_r(z_g) \int_0^1 \bar{v}^-(z) dz}{v_*^2}}{(\int_0^1 \Phi_r^2(z) dz) + \frac{r^2 H^2}{v_*^2}} \Big|_{\omega=0} \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho B H^2 \frac{1}{4\pi^2 m_e} \end{aligned}$$

On m_e = massa de l'edifici per unitat d'àrea, i definint:

$$G(z_g) = \sum_r \frac{\Phi_r(z_g) G_r}{\tilde{M}_r \alpha_r^2}$$

$$G_r = \int_0^1 y^2(Z) \Phi_r(Z) dZ$$

$$y(Z) = \frac{\bar{v}(Z)}{v_*}$$

$$\tilde{M}_r = \int_0^1 \Phi_r^2(Z) dZ$$

$$\alpha_r = \frac{f_r \cdot H}{v_*}$$

queda per tant com expressió final:

$$\bar{u}(z_g) = \frac{1}{2} C_D \rho B H^2 \frac{G(z_g)}{4\pi^2 m^2}$$

Per a trobar la desviació tipus del desplaçament horitzontal en un punt z_g , és a dir $\sigma_u(z_g)$, apliquem:

$$\sigma_u(z_g) = \left| \int_0^\infty S_u(z_g, f) df \right|^{1/2} =$$

$$\left| \int_0^\infty \left| \sum_r [H_r]^2 \Phi_r^2(z_g) \iint_{A_i A_j} \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) S_{q_{ij}}(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right| dF \right|^{1/2} =$$

$$\begin{aligned}
& \left[\int_0^{\infty} \left[\sum_r [H_r]^2 \Phi_r^2(z_g) \left[\iint_{A_i A_j} \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) S_{qij}(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \left. + 2 \iint_{A_i A_w} \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) S_{qij}(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \left. + \iint_{A_w A_w} \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) S_{qij}(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right] \right] dF \right]^{1/2}
\end{aligned}$$

On A_i i A_w representen respectivament la cara frontal i la cara dorsal a la superfície on incideix el vent, i com:

$$\begin{aligned}
S_q(P_i, P_j, f) &= C_i C_j \rho^2 \bar{v}(P_i) \bar{v}(P_j) S_{v'}^{1/2}(P_i, f) S_{v'}^{1/2}(P_j, f) \cdot \\
&\quad \cdot R_v(P_i, P_j, f) N_v(P_i, P_j, f)
\end{aligned}$$

- * Si $P_i \in A_i$ i $P_j \in A_i$; $C_i C_j = C_i^2$ i $N_u(P_i, P_j, f) = 1$
- * Si $P_i \in A_i$ i $P_j \in A_w$; $C_i C_j = C_i C_w$ i $N_u(P_i, P_j, f) = N_u(f)$
- * Si $P_i \in A_w$ i $P_j \in A_w$; $C_i C_j = C_w^2$ i $N_u(P_i, P_j, f) = 1$

$$\begin{aligned}
\sigma_u(z_g) &= \rho \left[\int_0^{\infty} \left[\sum_r [H_r]^2 \Phi_r^2(z_g) \cdot [C_i^2 + 2C_i C_w N_u(f) + C_w^2] + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \int \int_{A_i A_j} \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) \bar{v}(P_i) \bar{v}(P_j) S_{v'}^{1/2}(P_i, f) S_{v'}^{1/2}(P_j, f) R_v(P_i, P_j, f) dA_i dA_j \right] dF \right]^{1/2} = \\
&= [C_i^2 + 2C_i C_w N_u(f) + C_w^2]^{1/2} \rho B H^2 \cdot \frac{1}{4\pi^2 m_1} \left[\sum_r \Phi_r^2(z_g) \cdot \frac{1}{\frac{f_r^4 H^4}{v_*^4} \left[\int_0^1 \Phi_r^2(z) dz \right]^2} \right] .
\end{aligned}$$

$$\int_0^w \frac{1}{[1 - [\frac{fH/v_*}{f_r H/v_*}]^2]^2 + [2\xi_r [\frac{fH/v_*}{f_r H/v_*}]^2]^2} \cdot$$

$$\cdot \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) \frac{\bar{v}(z_i)}{v_*} \frac{\bar{v}(z_j)}{v_*} \cdot$$

$$\left[\frac{f \cdot S_v(P, f)}{v_*^2 \frac{f \cdot H}{v_*}} \cdot \frac{f \cdot S_v(P, f)}{v_*^2 \frac{f \cdot H}{v_*}} \right]^{1/2} R_v(P, P, f) dZ, dz, dy, dy_r \frac{H}{v_*} dF \Big]^{1/2}$$

i nomenant:

$$C_{df} = \left| C_t^2 + 2C_t C_w N_u(f_1) + C_w^2 \right|^{1/2}$$

$$\beta(z) = \frac{\bar{v}(z)}{v_*}$$

$$J_L = \left| \sum_r \frac{\Phi_r^2(z) I_L}{\alpha_r^4 \tilde{M}_r} \right|^{1/2}$$

$$I_L = \int_0^\infty \alpha^{2L} \Phi^*(\alpha) y(\alpha) d\alpha$$

$$\Phi^*(\alpha) = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{\alpha}{\alpha_r}\right)^2 \right|^2 + \left| 2\xi_r \left(\frac{\alpha}{\alpha_r}\right) \right|^2}$$

Per tant:

$$y(\alpha) = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \Phi_r(z_i) \Phi_r(z_j) \beta(z_i) \beta(z_j) \cdot \left| \frac{f S_v(z_i f)}{\alpha \cdot v_*^2} \cdot \frac{f S_v(z_j f)}{\alpha \cdot v_*^2} \right|^{1/2} \cdot R_v(P_r P_r f) dy_i dy_j dz_i dz_j$$

Com:

$$R_v(P_r P_r f) = \exp \left| -2C_z \frac{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + \left(\frac{C_y B}{C_z H}\right)(v_i - v_j)^2}}{y(z_i) + y(z_j)} \right|$$

Finalment l'equació de la desviació tipus, queda:

$$\sigma_u(z_g) = C_{df} \rho B H^2 \cdot \frac{J_0(z)}{4 \cdot \pi^2 \cdot m_e}$$

també és fàcil comprovar que:

$$f_e^2(z_g) = \frac{\int_0^\infty f^2 S_u(z_g f) df}{\sigma_u(z_g)} = \frac{v_* \cdot J_1(z_g)}{H \cdot J_0(z_g)}$$

EXEMPLE: Utilització d'aquest mètode pel cas presentat.-

Edifici octogonal de $H = 84$ m, $B = 38,4$ m, que té una primera freqüència pròpia de $f_1 = 0,1$ Hz (el segon mode de vibració aporta molt poc al desplaçament i per tant s'ha desestimat), amb un coeficient d'amortiment $\xi = 0,16$. Pes de l'edifici per unitat d'altura $W_1 = 5400$ kN/m. Els valors $C_y = 16$ i $C_z = 10$. S'admet una llei logarítmica de variació de la velocitat amb l'alçada i un terreny llis amb alguns obstacles ($z_0 = 0,07$ m).

DADES

Primer mode de vibració $\Phi_1(z) = 0,26(z/H)$

$$\bar{v}_z = \bar{v}_{10} = 28 \text{ m/s} = 100 \text{ Km/h}$$

$$\bar{v}_z = 2,5 v_* \ln(z/z_0); 28 = 2,5 v_* \ln(10/0,07); v_* = 2,26 \text{ m/s}$$

$$\bar{u}(z_g) = \frac{1}{2} C_D \rho b H^2 \frac{G_1(z_g)}{4\pi^2 m_e}$$

$$G_1(z_g) = \frac{\Phi_1(z_g) \cdot G_1}{\tilde{M}_1 \alpha_1^2}$$

$$\alpha_1 = \frac{f_1 H}{v_*} = \frac{0,1 \cdot 84}{2,26} = 3,72$$

$$\Phi_1(z_g) = 0,26$$

$$G_1 = \int_0^1 (y)^2(z) \Phi_1(z) dz = \int_0^1 12,4^2 \cdot 0,26 \cdot z \cdot dz \approx 20$$

$$y(z) = \frac{\bar{v}(z)}{v_*} = \frac{28}{2,26} \approx 12,4$$

$$\tilde{M}_1 = \int_0^1 \Phi_1^2(z) dz = \int_0^1 (0,26 \cdot z)^2 dz = 0,0225$$

Per tant:

$$G_1(z_g) = \frac{0,26 \cdot 20}{0,0225 \cdot 3,72^2} \approx 16,7$$

$$\bar{u}_1(z_g) = \frac{1}{2} \cdot 1,4 \cdot 1,2 \cdot 38,4 \cdot 84^2 \cdot \frac{16,7}{4 \cdot \pi^2 \cdot 540000} = 0,178 \text{ m}$$

Aquest valor de 0,178 m, correspon el desplaçament mitjà del primer mode de vibració.

$$\eta = \frac{3,85 \cdot f_1 \cdot \Delta x}{2,5 \cdot v_* \left(\ln \frac{H}{z_0} - 1 \right)} = 1,72$$

$$\Delta X = 4,38,4 = 153,6$$

$$N_{v'} = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} \cdot (1 - e^{-2\eta}) = 0,42$$

Si acceptem com coeficients $C_l = 0,8$ i $C_w = 0,5$, obtenim un valor de C_{df} de:

$$C_{df} = (C_l^2 + 2 \cdot C_l \cdot C_w \cdot N_{v'} \cdot f_1) + C_w^2)^{1/2} = 1,10$$

i com

$$\sigma_u(z_g) = C_{df} \cdot \rho \cdot B \cdot H^2 \cdot \frac{J_0(z)}{4 \cdot \pi^2 \cdot m_e} = 0,012$$

$$J_o(z) = \left| \frac{\Phi_1^2(z) \cdot I_o}{\alpha_1^4 \cdot \tilde{M}_1} \right|^{1/2} = 0,70$$

$$I_o = \int_0^{\infty} \alpha^2 \Phi^*(\alpha) y(\alpha) d\alpha = 44,61$$

$$\sigma_u(z_g) = 0,011$$

$$g_u(z_g) = \left| 2 \ln [f_e(z_g) \cdot T] \right|^{1/2} + \frac{0,5772}{\left| 2 \ln [f_e(z_g) \cdot T] \right|^{1/2}} = 3,59$$

$$f_e^2(z_g) = \frac{\int_0^{\infty} f^2 \cdot S_u(z_g, f) df}{\int_0^{\infty} S_u(z_g, f) df}$$

$$f_e(z_g) \approx f_1$$

$$G(z_g) = 1 + g_u(z_g) \cdot \frac{\sigma_u(z_g)}{v_1(z_g)} = 1 + 3,59 \cdot \frac{0,012}{0,178} = 1,24$$

Aquest valor indica, que calculant l'estructura per procediments estàtics, els valors dels esforços obtinguts, és precís multiplicar-los per 1,24.

$$u_{\max}(z_g) = G(z_g) \cdot \bar{u}(z_g) = 1,24 \cdot 0,178 = 0,22m$$

Que és el màxim desplaçament horitzontal d'aquesta estructura.

b) Mètode simplificat de Simiu.-

Basat en el procediment descrit anteriorment, Simiu proposa aquest mètode, el qual introdueix les següents hipòtesis complementàries:

- Les pressions fluctuants en cadascuna de les cares de l'edifici són proporcionals a les velocitats fluctuants del vent en el flux no pertorbat.
- L'autovector corresponent al primer mode de vibració es suposa que és una recta. No es tenen en compte la contribució dels modes superiors.

Amb aquestes condicions l'expressió del desplaçament mitjà val:

$$\begin{aligned} \bar{u}(z_g) &= \frac{1}{2} C_D \rho B H^2 \cdot \frac{\int_0^1 z_g \left(2,5 \ln \frac{zH}{z_0}\right)^2 dz}{\left[\int_0^1 z^2 dz\right] \frac{f_1^2 \cdot H^2}{v_*^2}} = \\ &= \frac{6,25}{2\pi^2 4} C_D \rho B v_*^2 \cdot \frac{\int_0^1 z \ln^2 \frac{zH}{z_0} dz}{BD \frac{1}{h^3} \int_0^H m_v z^2 dz f_1^2} \cdot \frac{z_g}{H} = \\ &= 0,41 \gamma C_D \frac{v_*^2}{DM f_1^2} F\left(\frac{z_0}{H}\right) \frac{z_g}{H} \end{aligned}$$

m_v és la massa/volum de l'edifici; P_v el pes específic de l'edifici per unitat de volum.

$$M = \frac{3}{H^3} \int_0^H z^2 P_v dz$$

$$F\left(\frac{z_0}{H}\right) = 0,58 \int_0^1 z \ln^2 \frac{z \cdot H}{z_0} dz$$

Per a trobar la variància dels desplaçaments oscil·lants es parteix de la última expressió, i és procedeix com en el cas del mètode de Davenport, és a dir, trobant la resposta com suma del terme quasiestàtic i del terme de ressonància, obtenint-se:

$$\frac{\sigma_u(z_g)}{\bar{u}(z_g)} = 0,41 \cdot \frac{(\beta \cdot Q + R)^{1/2}}{F}$$

On

$$\beta = \frac{\int_0^{\infty} S_v(f) df}{v_*}$$

Q és el terme quasiestacionari i R' el terme de ressonància.

$$R = \frac{\pi}{4\xi} \cdot \frac{C_w^2 + 2C_w C_f N(\eta) + C_f^2}{C_D^2} \cdot \alpha_1 \cdot y\left(\frac{B}{H}, \frac{z_o}{H}, \alpha_1\right)$$

On

$$\alpha_1 = \frac{f_1 H}{v_*}$$

$$y\left(\frac{B}{H}, \frac{z_o}{H}, \alpha_1\right)$$

$$\eta = \frac{f_1 \cdot H}{v_*} \cdot \frac{3,854}{2,5(\ln \frac{H}{z_o} - 1)} \cdot \frac{D}{H} = \alpha_1 \cdot s \cdot \frac{D}{H}$$

$$N(\eta) = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} \cdot (1 - e^{-2\eta})$$

Per tant el desplaçament màxim val:

$$u_{\max}(z_o) = \bar{u}(z_o) + g(f_e) \sigma_u'$$

On també

$$f_e = \left(\frac{R}{\beta Q + R}\right)^{1/2} \cdot f_1$$

EXEMPLE: Utilització d'aquest mètode pel cas presentat.-**DADES:**

$$H = 84 \text{ m}; B = D = 38,4 \text{ m}; \xi = 0,16; f_1 = 0,1 \text{ Hz}$$

$$P_v = \text{Pes específic de l'edifici per unitat de volum} = 2500 \text{ N/m}^3$$

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(10) = 28 \text{ m/s}; z_0 = 0,07; \text{terreny tipus 2, } P = 1$$

$$v_* = 0,086 \cdot p \cdot \bar{v}(10) = 2,26 \text{ m/s}; z_0/H = 8,3 \times 10^{-4}$$

$$F(z_0/H) = 5$$

$$\bar{u}(z_g) = 0,41 \cdot \gamma \cdot C_D \cdot \frac{v_*^2}{D \cdot M \cdot f_1^2} \cdot F\left(\frac{z_0}{H}\right) \cdot \frac{z_g}{H} = 0,1832 \text{ m}$$

$$B/H = 0,457 \text{ (Gràfica Canet) } Q = 3; y = 0,4; s = 1,01$$

$$\alpha_1 = \frac{f \cdot H}{v_*} = 3,72$$

$$\eta = \alpha_1 \cdot s \cdot \frac{D}{H} = 1,72$$

$$N(\eta) = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} \cdot (1 - e^{-2\eta}) = 0,42$$

Terme de ressonància

$$R = \frac{\pi}{4\xi} \cdot \frac{(C_w^2 + 2C_w C_l N(\eta) + C_l^2)}{C_D^2} \cdot \alpha_1 \cdot y\left(\frac{B}{H}, \frac{z_0}{H}, \alpha_1\right) = 4,56$$

$C_1 = 0,8$; $C_w = 0,5$ (Gràfica Canet) $\beta = 6$

$$\sigma_u(z_g) = 0,41 \cdot \frac{(\beta \cdot Q + R)^{1/2}}{F} \cdot \bar{u}(z_g) = 0,043 \text{ m}$$

$$f_e = \left(\frac{R}{\beta \cdot Q + R} \right)^{1/2} f_1 = 0,029 \text{ Hz}$$

(Gràfica Canet) $g(f_e) = 3,2$

$$u_{\max} = \bar{u}(z_g) + g(f_e) \cdot \sigma_u(z_g) = 0,32 \text{ m}$$

