

ACCION DEL VIENTO EN UNA ESTRUCTURA  
EN EL VALLE DE MEXICO

MARTIN EDUARDO ECHEVERRIA FLORES

TRABAJO  
Presentado a la División de Estudios de  
Posgrado de la  
FACULTAD DE INGENIERIA  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Como requisito para obtener  
el grado de  
MAESTRO EN INGENIERIA  
(ESTRUCTURAS)

Ciudad Universitaria, D.F.  
Agosto 1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

1. Régimen de vientos en el Valle de México.	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Velocidad de diseño en el D.F.	2
1.3. Variación de la velocidad del viento con la altura	3
2. Acción de la velocidad media del viento al actuar en estructuras	5
2.1. Revisión por la existencia de flujo laminar	5
2.2. Cálculo de desplazamientos inducidos por la acción media del viento	6
3. Acción turbulenta del viento en estructuras	9
3.1. Procedimientos conocidos para analizar la acción turbulenta del viento en edificios	9
3.2. Representación espectral de la acción turbulenta del viento	11
3.3. Cálculo del espectro de respuesta de un sistema de un grado de libertad	13
4. Interacción suelo-estructura	18
4.1. Modelo para simular la interacción	18
4.2. Analisis por la acción del viento en un edificio ubicado en el D.F.	18
5. Conclusiones	20
6. Referencias	22



DEPFI



DEPFI

T. UNAM

1 4 8 9

ECH

# 1. REGIMEN DE VIENTOS EN EL VALLE DE MEXICO

## 1.1 INTRODUCCION

En la revisión por viento de estructuras es necesario conocer el régimen de vientos en la zona en la cual se intenta realizar un proyecto, a fin de estudiar la probabilidad de falla de la construcción sometida a la acción del viento.

El viento es el resultado del movimiento de masas de aire en la atmósfera terrestre, provocado por gradientes térmicos que alteran el equilibrio termodinámico de la atmósfera.

La existencia de diferencias térmicas importantes tiende a producir vientos de alta velocidad, al propiciar el cambio de densidad y presión de los gases que forman la atmósfera. Además, la rugosidad de la superficie terrestre provoca cambios importantes en la distribución de velocidades del viento, en el transcurso del tiempo.

Así, para describir completamente el régimen de velocidades de viento en una región es necesario definir:

- a) Variación de valores medios con la altura
- b) Variación de los índices de turbulencia con la altura
- c) Altura del viento gradiente
- d) Cambio de dirección con la altura de la velocidad media

Para completar la descripción debe conocerse además, el contenido de frecuencias a diversas alturas sobre la superficie del terreno. Para ello, es necesario conocer los espectros de potencia a diversos niveles de altura y en distintas posiciones de la región en estudio.

Del estudio de registros obtenidos durante un año en una estación, Van der Hoven obtuvo el espectro de potencias de la figura 1.1, y encontró que el viento esta compuesto por dos tipos de flujo: en el intervalo macrometeorológico o fluctuaciones climáticas y en el intervalo micrometeorológico o intervalo de ráfagas. Se observa también que las frecuencias que se generan en el movimiento del aire tienen asociadas cantidades importantes de energía sobre todo en el intervalo macrometeorológico.

El contenido de energía en frecuencias correspondientes a las comunes en estructuras es un porcentaje relativamente bajo de la energía que por unidad de masa se presenta anualmente en la atmósfera terrestre. Sin embargo, esa pequeña cantidad puede causar daños importantes por vibraciones de las estructuras.

## 1.2 VELOCIDAD DE DISEÑO EN EL DISTRITO FEDERAL

Para obtener la velocidad de diseño en la zona metropolitana del Valle de México, se emplearon datos de la Estación Meteorológica de Tacubaya.

Las muestras corresponden a las velocidades máximas mensuales, de las cuales se obtuvieron las máximas anuales. Se tiene un total de 48 velocidades máximas anuales que corresponden al período comprendido entre los años 1941 y 1989. Las velocidades registradas son velocidades instantáneas o valores promediados a intervalos de 2 segundos aproximadamente. El anemocinógrafo se encuentra a una altura sobre el nivel de la banqueta de 19 m. Las velocidades máximas anuales se presentan en la tabla No. 1.

Estos datos cumplen con el requisito de cantidad en cuanto al número de años mínimo necesario, para tener una estimación razonable del viento máximo. El número mínimo de años de observación es de 28. Estos datos se obtuvieron en forma continua durante las 24 hrs. del día.

De estudios hechos (ref. 3), se demostró que los datos son homogéneos, es decir que no presentan mas variaciones que las propias del fenómeno. El histograma de velocidades aparece en la figura 1.2a.

Los histogramas se pueden aproximar por curvas teóricas de probabilidades, a fin de conocer la probabilidad de aparición de vientos de magnitud conocida.

En el caso de vientos máximos en zonas tropicales la función de distribución extrema que mejor se ajusta es la de Fisher-Tippet tipo II.

$$F(V) = e^{-(B/V)^r} \quad (1.1)$$

donde:

$F(v)$  = Función de distribución de velocidades.

$e$  = Base de los logaritmos naturales.

$B$  = Parámetro; m/s.

$r$  = Parámetro adimensional.

Al utilizar los datos de la tabla No. 1.1, que representan vientos máximos anuales, se obtuvo que:

$$B = 17.0834 \text{ m/s.}$$

$$r = 7.2011$$

En la figura 1.2b aparecen la función de densidad y el histograma de frecuencias de velocidades.

La velocidad de diseño se determina en función del período de recurrencia, en términos de:

$$F(V) = 1 - 1/R$$

(1.2)

El período de retorno R se define como el tiempo que transcurre para que exista la probabilidad de exceder el valor de diseño.

Para el diseño de estructuras, los períodos de retorno más comúnmente empleados son los siguientes:

a) Estructuras que no tienen ocupantes humanos o que su riesgo no es significativo para la vida: 5 años

b) Todas las estructuras permanentes, excepto las que presentan un alto grado de sensibilidad al viento o un grado alto de peligro para la vida humana o propiedades en caso de falla: 50 años

c) excepciones de b) 100 años

En nuestro caso R=50 años

$$V_d = \beta \sqrt{\frac{1}{\ln(R/(R-1))}} \quad (1.3)$$

$$V_d = 29.37 \text{ m/s} = 105.73 \text{ km/h}$$

### 1.3 VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA

La velocidad del viento varía con la altura sobre la tierra por la reducción del movimiento del aire producido por la fricción con la tierra, debido a obstáculos naturales y obstrucciones construidas por el hombre. La variación de la velocidad del viento con la altura se llama perfil del viento. La altura sobre la tierra en la cual los vientos no son afectados por la rugosidad del terreno, es llamada altura gradiente. Para propósitos de ingeniería, la variación de la velocidad del viento con la altura de bajo de la altura gradiente puede ser expresada con una ley de potencia:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^\alpha \quad (1.4)$$

En esta ecuación  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades del viento a las alturas  $Z_1$  y  $Z_2$  (menores que la altura gradiente). El exponente  $\alpha$  representa las características del perfil del viento (figura No. 1.4).

De estudios hechos (ref. 8), se encontró que  $\alpha$  presenta poca variación para valores medios de velocidad en intervalos de 60 seg, pero el valor medio de  $\alpha$  decrece significativamente para un tiempo de 60 seg., con respecto al correspondiente para 1 hora.

Para una torre de transmisión de televisión de 180 m. de altura, ubicada en la Ciudad de México (ref. 6), se encontró un valor de  $\alpha = 0.1237$ , obtenido con velocidades medias en

intervalos de tiempo que varían de 24.3 min. a 15.2 min. Si comparamos el valor de  $\alpha$  obtenido en la torre con los correspondientes valores de  $\alpha$  de las Normas Británicas para centro de ciudad, veremos el incremento para intervalos mayores a 60 seg.

Valores de las Normas Británicas:

	Tiempo	3 seg.	5 seg.	15 seg.
Centro de ciudad	$\alpha$	0.09	0.105	0.115

El exponente  $\alpha$  también varía con la rugosidad del terreno. En este trabajo se considerarán las características de rugosidad para centro de ciudad.

La velocidad de diseño fue obtenida con muestras de velocidades de viento instantáneas o promedio en intervalos de 2 segundos aproximadamente, por lo que se tomará de las Normas Británicas  $\alpha = 0.09$ .

Si tomamos 1 segundo como intervalo de tiempo medio en el cual se promedia las velocidades máximas, estas se deben corregir para obtener las velocidades de diseño horarias.

Emplearemos la fórmula propuesta por Mackey (ref. 5).

$$\frac{V_t}{V_H} = 1 - 0.6226(I)^{1.2716} \ln \frac{t}{T} \quad T = 3600 \text{ seg.} \quad (1.5)$$

donde:

$V_H$  = Velocidad horaria.

$V_t$  = Velocidad en el tiempo.

$I$  = Índice de turbulencia.

$I = 0.26$  centros de ciudad.

$I = 0.16$  campo abierto.

$I = 0.08$  en costas.

$$\frac{V_t}{V_H} = 1 - 0.6226(0.26)^{1.2716} \ln \frac{1}{3600}$$

$$\frac{V_t}{V_H} = 1.919$$

La velocidad de diseño para 1 seg. fue obtenida a una altura de 19 m; por tanto, se debe corregir para obtener la velocidad de diseño a 10 m.

$$\frac{V}{V_{10}} = \left(\frac{19}{10}\right)^{0.09} \quad V_{10} = 27.72 \text{ m/s} \approx 28 \text{ m/s}$$

En la figura 1.4 se compara la variación de la velocidad media para 1 segundo con la variación de la velocidad media horaria. La velocidad media horaria  $V_{10H}$  es:

$$V_{10H} = \frac{27.72}{1.919} = 14.44 \text{ m/s}$$

## 2 ACCION MEDIA DEL VIENTO AL ACTUAR EN ESTRUCTURAS

### 2.1 REVISION POR LA EXISTENCIA DE FLUJO LAMINAR

La existencia de flujo laminar entre una corriente de aire y un cuerpo queda fijada por la existencia de un número adimensional, conocido como número de Reynolds (R), el cual queda definido por:

$$R = \frac{V D}{\nu} \quad (2.1)$$

donde:

- V = Velocidad media del aire.
- D = Dimensión característica del viento
- $\nu$  = Coeficiente viscosidad dinámico

Dependen del valor de R la magnitud de las fuerzas que produce el viento y la existencia de flujo laminar en la vecindad del cuerpo.

Para valuar la fuerza que produce el viento, se recurre a un planteamiento simplificado que estima un área expuesta normal a la dirección del viento  $A_e$ .

En esa área expuesta  $A_e$ :

$$F(V) = \frac{1}{2} \rho V^2 A_e C_d \quad (2.2)$$

$$A_e = \frac{1}{2} \rho V^2$$

donde:

- $\rho$  = Densidad de masa del aire.
- V = Velocidad de diseño.
- $A_e$  = Area expuesta.
- $C_d$  = Coeficiente de arrastre en dirección del viento.
- $p_0$  = Presión.

Se ha podido establecer en pruebas controladas que  $C_d$  es dependiente del número de Reynolds (figura 2.1), (ref. 11, 17).

En los valores que aparecen en los reglamentos y normas para diseño por viento se acostumbra proporcionar el valor de  $C_d$  correspondiente al de flujo laminar. Esto se debe a que en ese intervalo se presentan las mayores fuerzas que produce el viento, cuando  $0 < R < 10^5$ .

Con estos valores de  $C_d$  es común evaluar las fuerzas que

produce el viento en flujo laminar.

$C_d$  es dependiente de la forma de la estructura; generalmente se obtiene de modelos rígidos colocados en la sección de prueba de túneles de viento con flujo laminar.

Para valuar  $C_d$  debe conocerse la distribución de presiones o líneas isobáricas en la superficie del cuerpo. Por integración de todas las presiones en la frontera se calculan las fuerzas en dirección del viento, y al dividir entre  $p_0 A_e$  se define  $C_d$ .

Para estimar la fuerza del viento se recurre a la expresión dada en 2.2.

El valor de  $\frac{1}{2}\rho$  está dado por:

$$\frac{1}{2}\rho = 0.0066 \frac{8+H}{8+2H} \quad (2.3)$$

donde:

H = Altura, en km, del punto en que se diseña la estructura, sobre el nivel del mar.

Este valor de  $\frac{1}{2}\rho$  considera que el aire contiene partículas en suspensión.

La fórmula 2.3 se emplea en la expresión 2.2, si se acepta que V se usa en km/h.

Para H = 2 km  $\frac{1}{2}\rho = 0.0055$

Al multiplicar  $\frac{1}{2}\rho$  por  $V^2$  se obtiene la presión media de diseño que se presenta en el área expuesta.

Conocida la presión media, se multiplica por el área expuesta y por el coeficiente de arrastre  $C_d$  para obtener la fuerza total que produce el viento.

## 2.2 CALCULO DE DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR LA ACCIÓN MEDIA DEL VIENTO

Los desplazamientos originados por la acción media del viento se obtienen partiendo de las configuraciones modales normales.

Las características de las formas modales  $A_{ij}$  deben satisfacer las siguientes propiedades:

a) Normalidad

$$\sum \frac{W_i}{g} A_{ik} A_{ij} = 1 \quad k=j \quad (2.4)$$

donde:

g = Aceleración de la gravedad.

W = Peso del entrepiso i.

w = Frecuencia del modo (rad/seg).

b) Ortogonalidad. Las formas normalizadas modales son ortogonales entre sí, cuando se satisfacen

$$\sum \frac{W_i}{g} A_{ik} A_{ij} = 0 \quad k \neq j \quad (2.5)$$

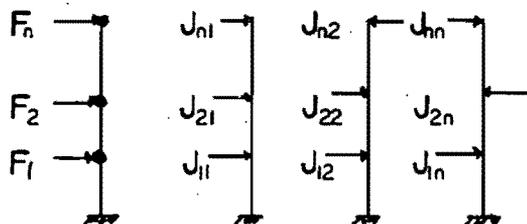
Siempre es posible establecer que cada uno de los desplazamientos  $\{v\}$  de una estructura con  $n$  grados se puedan obtener como una combinación lineal de las formas modales:

$$\begin{aligned} v_1 &= \psi_1 A_{11} + \psi_2 A_{12} + \dots + \psi_n A_{1n} \\ v_2 &= \psi_1 A_{21} + \psi_2 A_{22} + \dots + \psi_n A_{2n} \\ v_n &= \psi_1 A_{n1} + \psi_2 A_{n2} + \dots + \psi_n A_{nn} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Donde  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$  son los factores de participación de cada modo.

Los factores de participación dependen de las fuerzas que produce el viento en la estructura.

Para obtenerlos, usemos el siguiente razonamiento:



Las fuerzas características de cada modo se definen mediante

$$J_{ij} = w_i \frac{W_i}{g} A_{ij} \quad (2.7)$$

De la figura anterior:

$$\begin{aligned} F_1 &= \psi_1 J_{11} + \psi_2 J_{12} + \dots + \psi_n J_{1n} \\ F_2 &= \psi_1 J_{21} + \psi_2 J_{22} + \dots + \psi_n J_{2n} \\ F_n &= \psi_1 J_{n1} + \psi_2 J_{n2} + \dots + \psi_n J_{nn} \end{aligned} \quad (2.8a)$$

donde:

$$F_i = \sum_{\text{modos}} \psi_i J_{ij} \quad (2.8b)$$

Para evitar el planteamiento matricial, se procede con un

planteamiento energético , a partir del trabajo virtual que realizan las fuerzas del viento en el j-ésimo modo; se obtiene el factor de participación de ese modo:

$$\psi_{ij} = \sum_{\text{modos}} \frac{F_i A_{ij}}{W_j^2} \quad (2.9)$$

Así, en cualquier punto de una estructura sometida a la acción del viento:

$$v_i = \sum_{\text{modos}} \left( \sum_{\text{modos}} \frac{F_i A_{ij}}{W_j^2} \right) A_{ij} \quad (2.10)$$

### 3. ACCION TURBULENTO DEL VIENTO EN ESTRUCTURAS

#### 3.1 PROCEDIMIENTOS CONOCIDOS PARA ANALIZAR LA ACCION TURBULENTO DEL VIENTO EN EDIFICIOS.

Al sobrepasar valores del número de Reynolds superiores a 10, empieza a surgir el régimen turbulento en el movimiento del aire, producido por la disipación de energía cinética del viento en vórtices de pequeña magnitud, distribuidos aleatoriamente en el aire en movimiento.

Para establecer análisis estructurales que permitan considerar la acción del viento, se requiere establecer rutinas que se pueden englobar en tres tipos diferentes de análisis.

a) Método determinista. Intenta generar distribución de velocidades variables en el tiempo, asociadas al área expuesta considerada en cada nudo representativo de la estructura.

b) Método estadístico. Transforma la estructura en sistemas de un grado de libertad equivalente y de considerar procesos estacionarios y ergódicos, busca encontrar la amplificación de la respuesta del valor medio mediante un enfoque probabilista.

c) Métodos simplificados, que se fijan en normas reglamentarias.

##### 3.1.1 Métodos deterministas.

En estos métodos se establece que una estructura subdividida en porciones de características de rigidez y masa conocida, y asociadas a cada porción característica debe de conocerse la evolución de las fuerzas del viento a medida que transcurre el tiempo en el que se efectúa el análisis.

Para definir estas fuerzas es necesario, en primer lugar, definir la variación del viento en distintos puntos de la estructura, tomando en cuenta la variación de la altura, la variación y correlación espacial, los espectros de turbulencia y las modificaciones que se presenten.

En este enfoque se considera que los movimientos de la estructura se presentan en la misma dirección en que se supone que actúa el viento.

Se presentan dos procedimientos para simular la acción del viento para métodos deterministas.

i) Técnica de los pasos casuales. Mediante esta técnica se generan ráfagas grandes con variación espacial congruente con mediciones.

En vista de que se obtienen espectros de turbulencia que no son ni los de Harris, Davenport o Simiu, se corrige la solución con la aparición de ráfagas pequeñas de contenido

de frecuencias similar al de la estructura, y se establecen velocidades correctivas que conducen a la generación de vientos en cada nivel con variancia preestablecida y espectros de turbulencia especificados. Este método se empleará para obtener el espectro de respuesta de una sistema de un grado de libertad que se detallará más adelante.

ii) Modelo armónico pseudo-turbulento. Se supone que el modelo de la velocidad del viento es armónico en el tiempo. La velocidad esta compuesta por la velocidad media y una componente senoidal fluctuante superpuesta. La componente fluctuante es pequeña comparada con la velocidad media, tiene frecuencia  $w$  y amplitud  $v_0$ . Esta representación determinista implica que:

1. La velocidad media es función solamente de  $z$ , y tiene un perfil dado por la ec. 1.4.

2. La componente de ráfaga es función solamente del tiempo. Sus amplitudes son relativamente pequeñas comparadas con la velocidad media (20%) y sus fluctuaciones son armónicas con periodos de

$$V(z,t) = V(z) + V(t) \quad (3.1)$$

$$V(t) = V_0 \text{sen}(wt)$$

Una variación del método determinista consiste en idealizar al edificio como una viga a flexión. La fuerza del viento se obtiene por unidad de longitud a lo largo de la altura, y la componente de velocidad variable en el tiempo esta dada por:

$$V(t) = \sum_{m=1}^{\infty} V_m \cos(w_m t + \sigma_m) \quad (3.2)$$

donde:

$V_m$  = Amplitud de la componente de ráfaga.

$w_m$  = Frecuencia de la rafaga obtenida del espectro de potencia de la acción turbulenta del viento.

$\sigma_m$  = Angulo de fase aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y  $2\pi$ .

Para obtener la frecuencia de ráfaga se sigue el siguiente razonamiento:

Cuando la componente de la velocidad variable en el tiempo es expresada como

$$V(t) = \sum_{m=1}^{\infty} V_m \cos(w_m t + \sigma_m)$$

la energía total por unidad de altura contenida en las fluctuaciones es:

$$E_v = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} V_m^2 \quad (3.3)$$

y la energía almacenada por los espectros de potencia de los contenidos de frecuencias de la velocidad del viento,

$$E_v = \frac{1}{H} \int_0^{\infty} \int_0^H S(n,z) dn dz = \int_0^{\infty} \bar{S}(n) dn \quad (3.4)$$

Al igualar estas energías se encuentran los valores de las frecuencias.

### 3.1.2 Método estadístico.

Tres autores han desarrollado tres métodos aparentemente diferentes que parten de las siguientes hipótesis:

1. Están referidos a la respuesta dinámica de estructuras de un grado de libertad o de varios grados de libertad (por el uso de las propiedades generalizadas de las estructuras), si la configuración de las estructuras es tal que la contribución de los modos superiores puede despreciarse.

2. La velocidad del viento, presión, fuerzas externas y la respuesta inducida (desplazamientos) se pueden separar en dos componentes, una constante y otra variable en el tiempo; la primera se toma generalmente como la media horaria y la segunda como un proceso aleatorio estacionario con media cero.

3. La presión dinámica del viento (o fuerza), se considera como una función lineal de la componente de la velocidad variable en el tiempo.

4. El coeficiente de arrastre se considera constante sobre el área expuesta de la estructura.

5. La velocidad media se define por razonamiento probabilistas con base en el período medio de retorno.

### 3.1.3 Métodos simplificados de los reglamentos.

Están basados en los métodos estadísticos. Consisten en multiplicar por un factor de ráfaga los desplazamientos obtenidos por la acción media del viento.

## 3.2 REPRESENTACION ESPECTRAL DE LA ACCION TURBULENTA DEL VIENTO

La mayoría de los problemas prácticos de los efectos provocados por la acción del viento en estructuras, requieren solamente un conocimiento de la componente longitudinal de la velocidad instantánea del viento.

La velocidad instantánea  $V(t)$  puede descomponerse en una componente media  $V$  y una componente de ráfaga, variable en el tiempo  $v(t)$

$$V(t) = V + v(t) \quad (3.5)$$

La componente aleatoria  $v(t)$ , tiene velocidad media igual a cero en el intervalo de tiempo en el cual se analiza.

Hay dos métodos para la descripción de señales aleatorias en estructuras: 1) la función de correlación y 2) el uso del espectro de potencia  $S(n)$ .

Se recurrirá a los espectros de potencia para describir las propiedades del proceso aleatorio del viento.

El espectro de potencia de la señal  $S(n)$  se define de tal forma que  $S(n) \Delta n$  es la contribución para la variancia total de la señal de una componente armónica simple en una diferencial  $\Delta n$  de un espectro continuo, centrado sobre la frecuencia  $n$ . Es tal que:

$$\int_0^{\infty} S(n) dn = \sigma^2(v) \quad (3.6)$$

El método de autocorrelación  $C(\tau)$  y el método del espectro de potencia  $S(n)$  para describir una señal aleatoria no son independientes:

$$S(n) = 4 \int_0^{\infty} C(\tau) \cos(2\pi n \tau) d\tau \quad (3.7)$$

$$C(\tau) = \int_0^{\infty} S(n) \cos(2\pi n \tau) dn \quad (3.8)$$

### 3.2.1 Espectros de potencia

Davenport obtuvo que para vientos fuertes el espectro de la componente longitudinal, para diversos sitios y para condiciones topográficas diferentes, se puede deducir una curva simple (fig. 3.1), que puede ajustarse a una expresión algebraica que contiene como parámetros la velocidad media horaria a 10 m. de altura y el coeficiente de arrastre superficial  $K$ : Davenport sugirió la siguiente forma para la expresión:

$$\frac{n S(n)}{K V_{10H}^2} = \frac{4 X^2}{(1 + X^2)^{4/3}} \quad (3.9)$$

$X = \frac{n L}{V_{10H}}$ 

$K_{10m}$	1000 m	$V_{10H}$
$V_{10H}$	14 m	3600 s.

donde:

$V_{10H}$  = Velocidad media horaria.

$K$  = Coeficiente de arrastre superficial.

$L$  es una longitud arbitraria, para la cual Davenport sugirió un valor de 1200 m.

Harris propuso la siguiente expresión:

$$\frac{n S(n)}{K V_{10H}^2} = \frac{4 X}{(2+X^2)^{5/6}} \quad S(n) = \frac{4V_{10}^{-2}}{n} \quad (3.10)$$

$$\phi(x) = \frac{x}{(2+x^2)^{5/6}}$$

Que corresponde a la fórmula propuesta por Von Karman para turbulencia en túnel de viento, donde  $L = 1800$  m.

Las expresiones (3.9) y (3.10) son independientes de la altura sobre el terreno; se aproximan a espectros obtenidos experimentalmente en diversos sitios. En la figura 3.1 se muestran ambos espectros para fines comparativos.

Simiu propone otra expresión que representa el espectro de potencia completo en la zona de bajas frecuencias. También representa la zona de altas frecuencias, donde es ligeramente conservadora. En esta expresión,

$$\frac{n S(z,n)}{K V^2} = \frac{4 50f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (3.11a)$$

$$f = \frac{zn}{V_{10H}}$$

Se puede considerar que la longitud  $L_z$ , variable con la altura, es igual a  $L_z = 50z$ , con lo que la fórmula queda

$$\frac{n S(z,n)}{K V_{10H}^2} = \frac{4 f'}{(1+f')^{5/3}} \quad (3.11b)$$

$$f' = \frac{L_z n}{V_{10H}}$$

Se debe destacar que el espectro de potencia describe el contenido de frecuencias de las velocidades de ráfaga, y la distribución de energía asociada a cada frecuencia. Así, un espectro de densidad de potencia describe las componentes periódicas del movimiento aleatorio del viento.

### 3.3 CALCULO DEL ESPECTRO DE RESPUESTA DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.

Para obtener el espectro de respuesta de un sistema de un grado de libertad bajo la acción del viento, se empleará el método de los pasos casuales. Se presenta una breve descripción del método.

Como se mencionó anteriormente la velocidad del viento se puede representar como:

$$V(t) = V + v(t) \quad (3.12)$$

En esta expresión el vector de ráfaga  $v(t)$  está formado por dos componentes: la primera denominada de ráfagas grandes  $w(t)$  y la segunda componente  $u(t)$ , de ráfagas pequeñas.

El vector de ráfagas grandes se obtiene de:

$$w_i = \sum W_i \quad (3.13)$$

donde:

$\{W\}$  = es un conjunto de  $n$  elementos de variancia unitaria correlacionados:

$$W_i = D_{ij} Y_j \quad (3.14)$$

Por tratarse de una sola masa la matriz de correlación es igual a 1 y por tanto:

$$D = I \quad CR = \sum_{i,j} D_{ij} I D_{ji} = \text{Matriz de correlación cruzada.}$$

$\{y\}$  =  $n$  procesos de variancia unitaria sin correlación cuyas autocorrelaciones están dadas por:

$$e^{-t/\theta} \quad (3.15)$$

$\theta$  = Escala de tiempo obtenida del espectro  $S(n)$  de Harris.

Un elemento  $\{y\}$  se forma de una combinación lineal móvil de  $k$  números aleatorios inconexos  $x$ , con distribución normal, valor medio nulo y variancia unitaria en cada intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

$$y(t) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k$$

$$y(t + \Delta t) = a_1 x_2 + a_2 x_3 + \dots + a_k x_{k+1}$$

$$y(t + (k-1)\Delta t) = a_1 x_k + a_2 x_{k+1} + \dots + a_k x_{2k-1}$$

donde:

$$a_i = C_i e^{(-N_i / L)} N_i, \quad 0, 1, 2 \dots k$$

$$C_i = 1 - e^{(-2.85 \Delta t / \theta)}$$

$$\alpha = -2 \ln r$$

$$\theta = 0.084 \mathcal{L} / V_{10H}$$

$r =$  Raíz positiva más próxima a B en la expresión

$$B = r(1 - r^5/A) \quad A = 1/C_i^2 \quad B = (A-1)/A$$

El espectro de potencias de ráfagas grandes esta dado por Bendat:

$$S(n) = \frac{4KV_{10M}^2}{n} \frac{X}{1+X^2} \quad (3.16)$$

$$X = 2\pi n\theta$$

El vector de ráfagas pequeñas  $u(t)$  se obtiene de generar primero  $n$  procesos sin correlación  $p$  en intervalos de tiempo discretos  $\Delta s$ .

Al igual que para el vector de ráfagas grandes  $[D]=1$ . Cada proceso  $p(t)$  se simula por la siguiente serie

$$p(t) = \sum_{j=0}^{N-1} \text{sig}[S(n_j)] [2|S(n_j)|\Delta n]^{1/2} \cos(2\pi n_j t + \theta_j) \quad (3.17)$$

en la cual el intervalo  $n_j$  comprende el de las frecuencias naturales altas de los edificios altos. En la ecuación anterior  $S(n_j)$  es la diferencia entre el valor calculado por Harris, Davenport o Simiu, y el calculado para ráfagas grandes. El ángulo de fase  $\theta_j$  se representa mediante desviaciones aleatorias uniformemente distribuidas entre  $0$  y  $2\pi$ .

Los intervalos de tiempo  $\Delta t$  y  $\Delta s$ , están en función de la mayor y menor frecuencias de la estructura, en la que se espera una respuesta máxima de esta. Por tratarse de un sistema de un grado de libertad los intervalos de tiempo  $\Delta t$  y  $\Delta s$  son:

$$\Delta t = 1/T$$

$$\Delta s = 0.5/T$$

El intervalo  $n$  se tomó como  $1.5/T$ .  $T$  es el período de la estructura de un grado de libertad.

Las fuerzas del viento  $F_i$ , en el área tributaria de la masa se obtienen de la velocidad  $V(t)_i$ , por medio de la expresión:

$$F_i = \frac{1}{2} \rho C_{Dd} V(t)_i^2 A_i \quad (3.18)$$

donde:

$\rho$  es la densidad del aire y  $A_i$  el área tributaria de la masa. En nuestro caso se tomó un área en la que la acción media del viento produjera una fuerza de 1.2% del peso de la masa.  $C_{Dd}$  es el coeficiente de presión dinámica, que para los fines de simulación se obtiene de:

$$C_{Dd} = X_0 C_d \quad (3.19)$$

donde :

$X_0$  es el coeficiente de admitancia aerodinámica que se toma igual a 0.7. Para la obtención de estos espectros se empleó la velocidad media horaria  $V_{10H}$  obtenida en el capítulo 1. La variancia de las velocidades se tomó igual a  $0.19V_{10H}$ .

La ecuación de movimiento para una sola masa queda descrita por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (3.20)$$

donde:

$m$  = Es la masa que se tomará igual a  $1 \text{ kg-s}^2/\text{m}$ .

$F(t)$  = Es el vector de fuerzas dependiente en el tiempo.

$\ddot{x}, \dot{x}, x$  = Son las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de la masa.

Se consideró un amortiguamiento de 5% del crítico.

Al ser un sistema de un grado de libertad, y al aplicar el método de superposición modal, la ecuación de movimiento 3.20 no sufre modificaciones y la respuesta se obtiene en forma cerrada usando la integral de Duhamel para un intervalo de tiempo finito, suponiendo que la función excitadora es lineal en cada subintervalo de tiempo.

En la figura 3.3 se muestran los espectros de respuesta de aceleraciones para los tres espectros de potencia de Harris, Davenport y Simiu, para un intervalo de períodos comprendido entre 1 y 10 segundos.

En la figura 3.2 se presentan los factores de amplificación de los desplazamientos, obtenidos dividiendo el desplazamiento máximo calculado durante el tiempo de excitación de la masa entre el desplazamiento producido por la acción media del viento. También se presentan en esta figura los factores de amplificación obtenidos aplicando el RDF para una estructura con las siguientes características:

$$D/H = 0.2$$

$$H = 23.4 \text{ m}$$

localizada en zona A, para el mismo intervalo de períodos que los espectros anteriores.

El R.D.F. propone la siguiente expresión para calcular el factor de ráfaga  $G$

$$G = 0.46 + g \sqrt{\frac{R}{C_z} \left( B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (3.21)$$

donde:

$$V_H = 22.2 \sqrt{K C_z}$$

G = Factor de ráfaga

g = Factor de pico

R = Factor de rugosidad, para nuestro cálculo

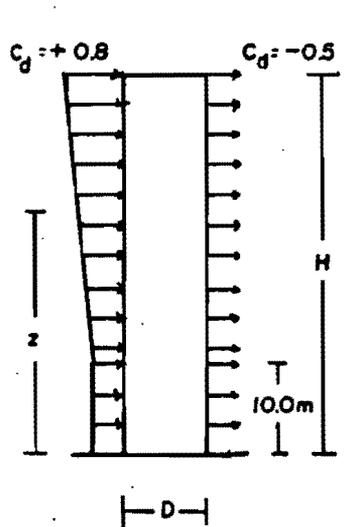
B = Factor de turbulencia de fondo

S = Factor de tamaño

$\beta$  = Fracción del amortiguamiento crítico

$C_z$  = Factor correctivo por la altura

K = Factor correctivo por exposición



## 4. INTERACCION SUELO ESTRUCTURA

### 4.1 MODELO PARA SIMULAR LA INTERACCION

Para estudiar los efectos de la interacción suelo-estructura en la respuesta de ésta, la superestructura se representa por un modelo de masas concentradas, y a la base se le permiten dos grados de libertad, desplazamientos en el sentido horizontal y rotación (figura 4.1).

Para simular los dos grados de libertad de la base se anade al modelo de la estructura un piso ficticio, con una trabe infinitamente rígida y elementos horizontales y verticales en los cuales solamente se considera deformación axial.

Los resultados obtenidos con el modelo matemático se compararon con mediciones experimentales para un edificio de concreto reforzado de nueve pisos. El edificio fue sometido a vibración forzada y se encontró que los resultados teóricos fueron bastante parecidos a los medidos.

En este modelo el desplazamiento total en cada nivel está dado por:

$$v_i = v_k + h_i \phi_k + v_j \quad (4.1)$$

donde:

$h_i$  = Altura del nivel  $i$ .

$v_k$  = Traslación de la base.

$\phi_k$  = Rotación de la base con respecto al eje horizontal A-A'.

$v_j$  = Desplazamiento relativo del nivel  $i$  con respecto al eje de referencia fijo a la base.

### 4.2 ANALISIS POR LA ACCION DEL VIENTO EN UN EDIFICIO UBICADO EN EL VALLE DE MEXICO.

El edificio se encuentra ubicado en la calle de Córdoba # 42, colonia Roma.

Su geometría general se presenta en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

Las configuraciones modales fueron obtenidas del análisis hecho en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el programa ETABS.

Los datos del análisis corresponden a dos modelos: a) Con base rígida y b) Con interacción suelo-estructura. Para ambos casos se hizo análisis en el plano y tridimensional.

Las configuraciones modales normalizadas empleadas para el análisis por la acción del viento, corresponden a los 5 primeros modos. En la tabla 4.1 se presentan los períodos correspondientes a dichos modos y en la figura 4.5 el primer modo en el plano, con interacción suelo-estructura y con

base empotrada, en la dirección Y, normalizados con respecto al desplazamiento en la azotea.

Ya que en los resultados se encontró que los desplazamientos generados por la acción media del viento en el edificio en la dirección X fueron del orden de la mitad de los de la dirección Y, solamente se presentarán los resultados correspondientes a la dirección Y.

#### 4.2.1. Análisis.

Para considerar la acción media del viento se recurrió al planteamiento presentado en el capítulo 2 de este trabajo.

Para describir la variación del viento con la altura, recurrimos a la ley de potencia descrita en el capítulo 1 y se emplearán dos variaciones:

i) La velocidad de diseño es de 28 m/s para un intervalo de tiempo de un segundo y su correspondiente exponente  $\alpha = 0.09$ .

ii) Aplicando el RDF.

Para ambos casos se considera que la velocidad del viento es constante hasta los 10 m.

El coeficiente de exposición  $K=0.65$ , tomado del RDF para zona A.

Las fuerzas se obtienen de aplicar las fórmulas presentadas en las normas técnicas complementarias para diseño por viento del RDF.

También se hace una corrección al valor del coeficiente de arrastre en la zona de barlovento, ya que este considera una presión uniforme por la acción del viento medio. El nuevo valor del coeficiente de arrastre en la cara de barlovento es igual a 0.7124.

La distribución de fuerzas correspondiente a cada masa se presenta en la figura 4.6, para el valor de  $V$  para una velocidad media de un segundo.

Los desplazamientos producidos por la acción media viento correspondientes al inciso i) se observan en las gráficas 4.7 y 4.8 y la acción turbulenta del viento para el modelo plano con interacción suelo-estructura se ve en la figura número 4.9.

En la figura 4.10 se presentan los desplazamientos por la acción media del viento obtenidos de aplicar las distribuciones de velocidades de los incisos i) y ii).

La acción turbulenta del viento se considera de aplicar el RDF. Se obtuvieron para fines comparativos los valores del factor de amplificación  $G$  para los modelos en el plano con base empotrada y con interacción.

	G
Base empotrada	1.41
Con interaccion S-E	1.48

## 5. CONCLUSIONES

El perfil del viento dado por la ley de potencia es una descripción de la variación del viento bastante satisfactoria para fines de ingeniería, pero se puede incurrir en graves errores si el exponente  $\alpha$  no se considera adecuadamente, es decir, este exponente debe corresponder al intervalo de tiempo para el que se obtuvo la velocidad de diseño. Como se ve en la figura 1.3 si por ejemplo tomamos el exponente para una velocidad instantánea, se obtendrán errores del 100%.

Del perfil mostrado en la figura 1.4 se ve que el considerar velocidades horarias no siempre lleva a fuerzas menores inducidas por la acción del viento medio. Si consideramos que el factor para pasar de una velocidad instantánea a una horaria, dado por la fórmula de Mackey es de 1.919 para zona A, a partir que el coeficiente  $C_z$  correspondiente a velocidades horarias sea mayor que 2, las fuerzas obtenidas de velocidades horarias serán mayores que las instantáneas (figura 1.3). El valor de  $C_z$  de 2 se alcanza a una altura aproximada de 40 m.

Los métodos deterministas presentados aquí para obtener la respuesta producida por la componente longitudinal del viento, representan con una buena aproximación, el comportamiento de edificios altos y estructuras flexibles (como torres de transmisión), en los que se puede despreciar la participación de modos superiores en la respuesta.

Como se ve en la figura 3.2, el factor de amplificación  $G$  permanece casi constante en el intervalo de períodos considerados. Esto se debe a dos factores: a) Los valores del período y de la velocidad horaria de diseño nos ubican en una zona casi plana dentro de los espectros de frecuencias y b) El método empleado para generar el viento turbulento, hace que este tenga un contenido de frecuencias similares a aquellas en las que se espera una respuesta máxima de la estructura. De mediciones hechas en estructuras se ha observado que las vibraciones provocadas por el viento en las estructuras, llegan a contaminar a este, haciendo que tenga un contenido de frecuencias similar a los de la estructura.

Con el espectro de potencia de Simiu, se obtiene una respuesta conservadora para bajas alturas (figura 3.2), ya que el valor de  $S(n)$  es bajo y por consiguiente nos lleva a una zona del espectro con ordenadas mayores que los espectros de Harris y Davenport. Pero, conforme aumenta la altura el valor de  $S(n)$  aumenta y para más de 40 m. la respuesta obtenida es menor que con el espectro de Harris o Davenport. Los valores obtenidos mediante la simulación del sistema de un grado de libertad sobreestima la respuesta para períodos menores a 3 segundos. Para estructuras con períodos menores a tres segundos el comportamiento del

factor de amplificación  $G$  esta dado por la curva correspondiente al RDF (ref. 5).

El valor de la escala de tiempo, es función de  $L$  y se obtuvo del espectro de Harris. Pero como se hizo notar en el párrafo anterior, el valor de  $L$  es el que determina la principal diferencia en el comportamiento de los espectros aquí presentados, al considerar la escala de tiempo de Harris, para los espectros de Davenport y Simiu no se cometen graves errores.

Al considerar la interacción suelo-estructura, el sistema suelo-estructura se vuelve más flexible, pero la respuesta dinámica generada por la acción turbulenta del viento no se ve afectada para estructuras con períodos mayores a 3 segundos, ya que los factores de amplificación permanecen casi constantes. Para el edificio en estudio, por encontrarse en la parte inicial del diagrama, el efecto de la interacción aumenta en un 17 % la amplificación debida a efectos dinámicos. Los desplazamientos producidos por la acción media del viento, son del orden del doble de los encontrados en el modelo de base empotrada (figuras 4.7 y 4.8).

Los métodos propuestos por los reglamentos para considerar la acción turbulenta del viento, consisten en multiplicar los desplazamientos debidos a la acción media del viento por un factor de amplificación  $G$ , según los autores analizados en este escrito son del mismo orden de magnitud.

## REFERENCIAS

1. Amavizca R., F.O., "Respuesta dinámica de estructuras bajo la acción turbulenta del viento", Tesis DEFFI UNAM, 1984.
2. Balendra, T., Nathan, G.K., Kok Hin Kang, "A deterministic model for along-wind motion on buildings", Eng. Struct., Vol. 11, Enero 1989.
3. Brito R., R.P., "Revisión de la velocidad básica de viento del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Tesis DEFFI UNAM, 1982.
4. Crouse, C.B., Jennigs, P.C., "Soil-structure interaction during the San Fernando earthquake", Bull. Seism. Soc. Am., 65.13-36, 1975.
5. Ghiocel, D., y Lungu, D., "Wind, snow and temperature effects on structures based on probability", Abacus Press, 1975.
6. Gonzalez S., M., Rodriguez C., N., "Análisis de una torre de 180 m. bajo acción eólica", Proyecto 5754, Instituto de Ingeniería UNAM, Abril 1986.
7. Harris, R.I., "The nature of the wind", en "The modern design of wind sensitive structures", Construction Industry Research and Information Association, 1971.
8. Khayratte, J.A., Metha, K.C., "Analysis of field data for wind profile", 1985.
9. Morteza, A.M.T., "Mathematical modeling of tall building to wind excitation", 1985.
10. Morteza, A.M.T., "Dynamic response of a tall buildings to wind excitation", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, Abril 1985.
11. Rodríguez C., N., Levi, E., Echavez A., G., "Fluid-structure interaction", Institute of Engineering, No. E-57, Febrero 1986.
12. Rodríguez C., N., "Variación de la velocidad del viento con la altura en un punto", Informe No. 47, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F., 1961.
13. Rodríguez C., N., Apuntes de la materia "Diseño Eólico de Estructuras", DEFFI UNAM, Semestre 88 II, 1988.
14. Simiu, E., "Wind spectra and dynamic along-wind response", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, No. ST9 Sept. 1974.
15. Vickery, B.J., Kwan, H.K., "Drag or along-wind response of slender structures", Journal of the Structural Division, ASCE, ST1., Enero, 1972.
16. Wong, H.L., Trifunac, M.D., Luco, J.E., "A comparison of soil-structure interaction calculations with results of full scale forced vibration test", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 1, 1988.
17. Task Committee on Wind Forces, "Wind forces on structures", Transactions, ASCE, Parte II, 1961.

Año	Velocidad máxima anual		Año	Velocidad máxima anual	
	m/s	km/h		m/s	km/h
1941	19.5	70.2	1967	17.0	61.2
1942	16.0	57.6	1968	17.0	61.2
1943	24.9	89.6	1969	22.2	79.9
1944	16.5	59.4	1970	22.7	81.7
1945	17.5	63.0	1971	16.8	60.5
1946	16.8	60.5	1972	15.3	55.1
1947	15.6	56.2	1973	21.0	75.6
1948	17.9	64.4	1974	15.3	55.1
1949	18.6	67.0	1975	21.0	75.6
1950	26.0	93.6	1977	19.8	71.3
1951	15.2	54.7	1978	18.5	66.6
1952	20.7	74.5	1979	17.7	63.7
1953	18.3	65.9	1980	18.2	65.5
1954	15.6	56.2	1981	16.2	58.3
1955	15.7	56.5	1982	16.0	57.6
1956	16.2	58.3	1983	17.0	61.2
1957	19.3	69.5	1984	17.0	61.2
1958	22.0	79.2	1985	13.7	49.3
1959	17.9	64.4	1986	17.9	64.4
1960	14.0	50.4	1987	20.2	72.7
1961	16.1	58.0	1988	26.0	93.6
1962	21.1	76.0	1989*	20.2	72.7
1963	18.0	64.8			
1964	16.7	60.1			
1965	25.4	91.4			
1966	18.1	65.2			

\* Hasta Marzo de 1989.

Tabla 1.1. Velocidades máximas anuales

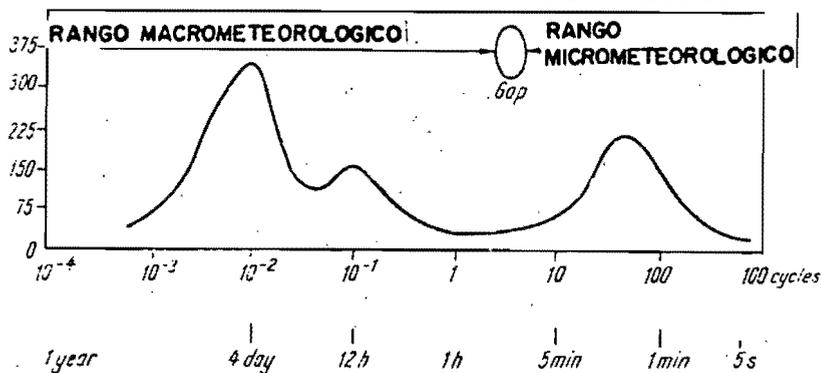


Fig. 1.1. Espectro de potencia de la velocidad del viento, Van der Hoven.

# HISTOGRAMA DE VELOCIDADES MAXIMAS ANUALES REGISTRADAS EN TACUBAYA, D.F.

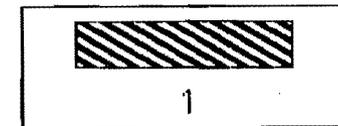
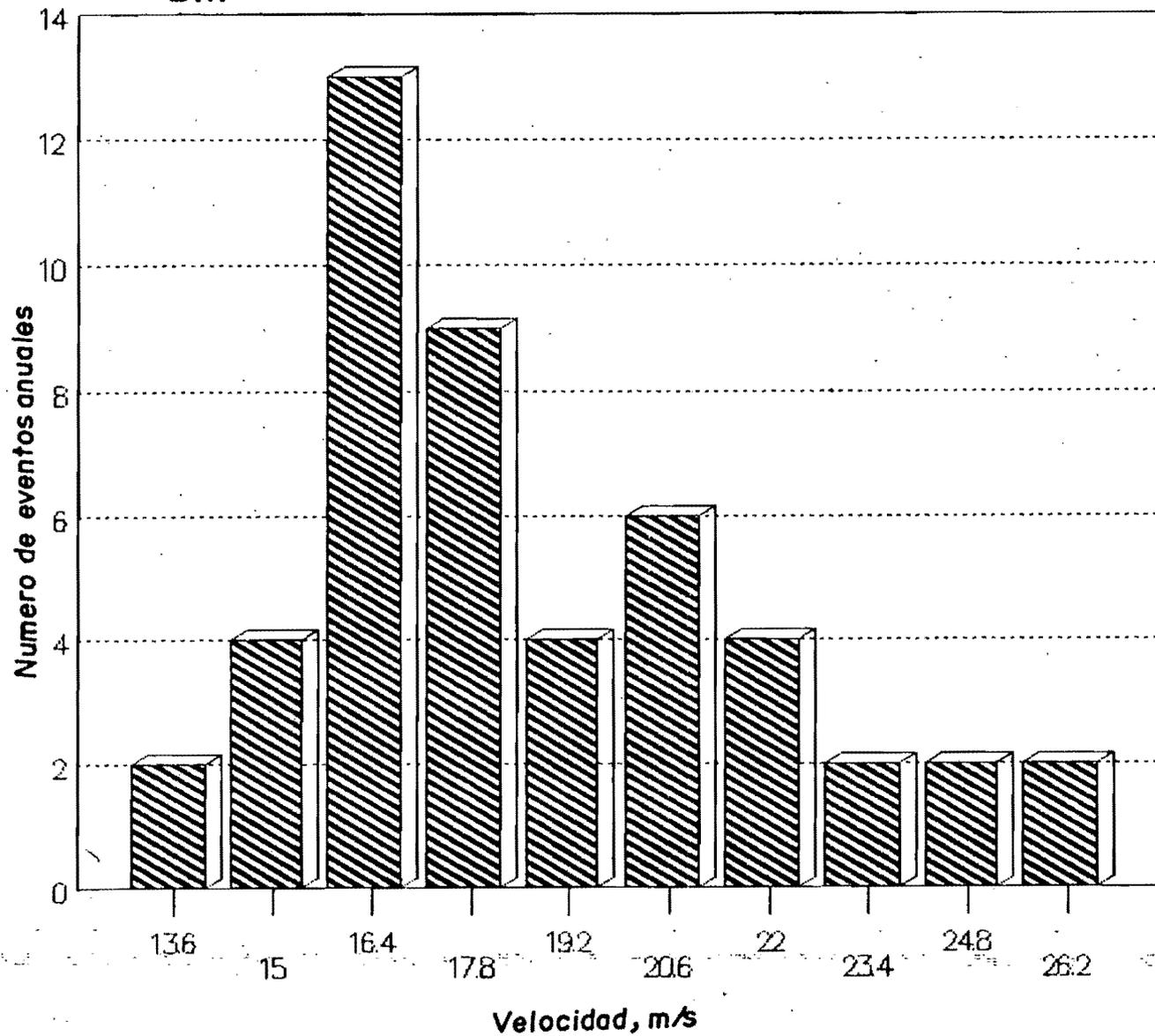


Fig. 1.2a.

# COMPARACION DE LA FUNCION DE DENSIDAD Y EL HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

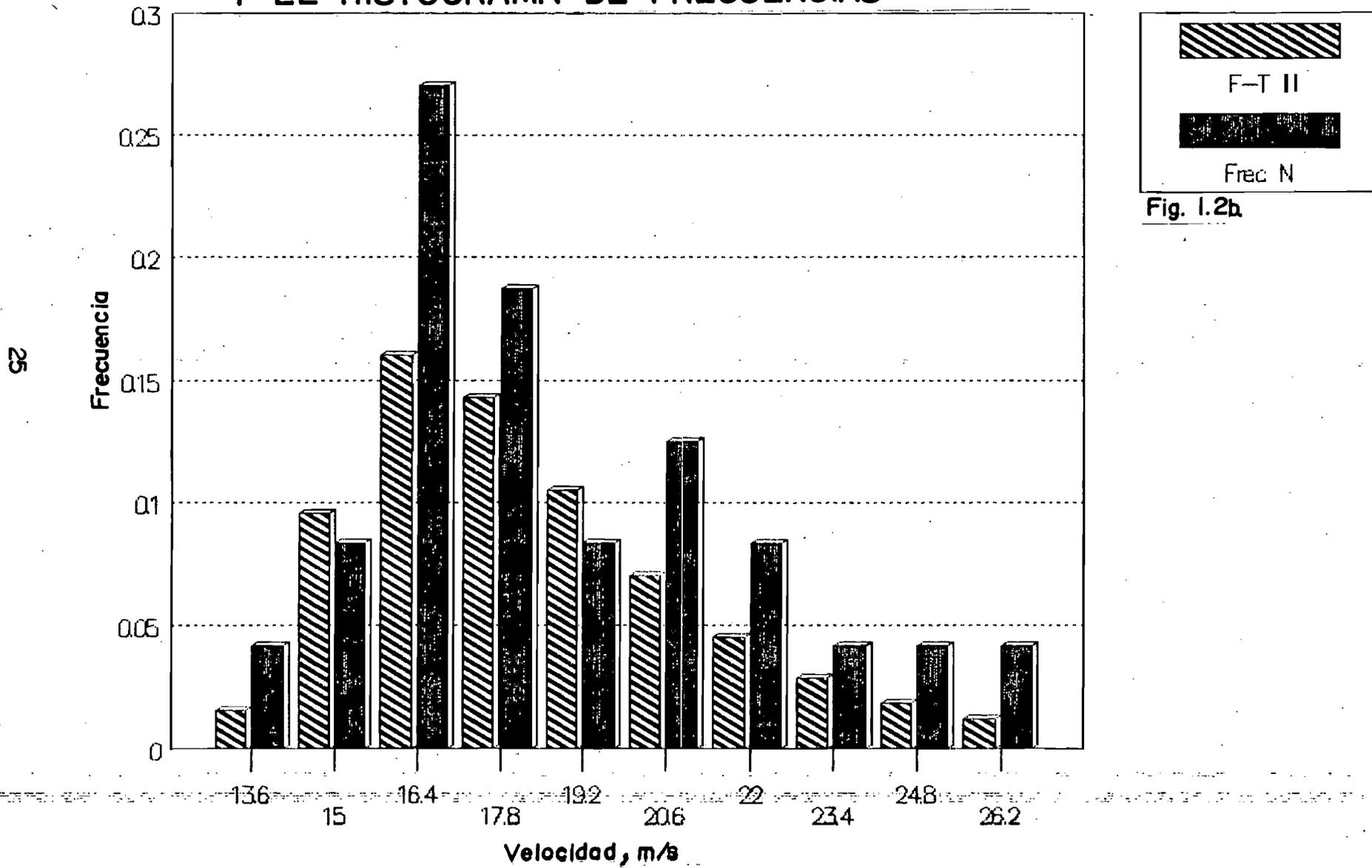


Fig. 1.2b

# VARIACION DE $C_z$ CON LA ALTURA

26

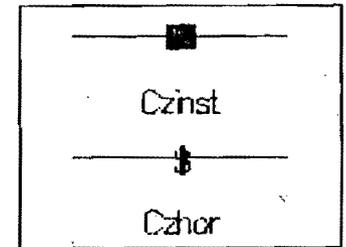
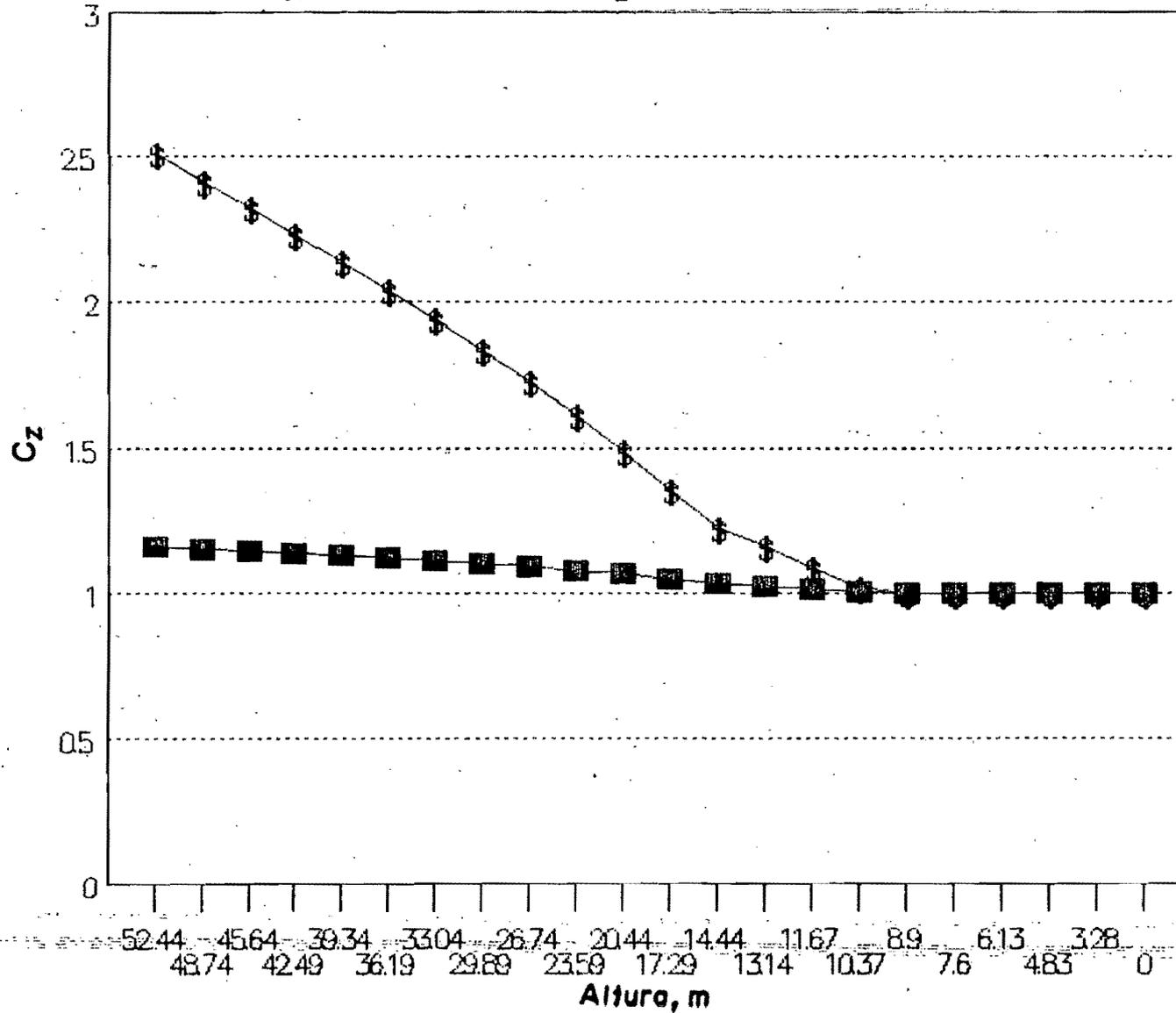


Fig. 1.3.

# PERFIL DE VELOCIDADES

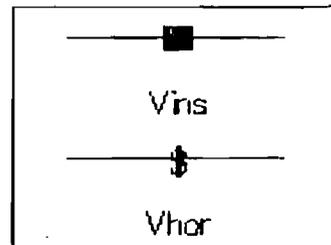
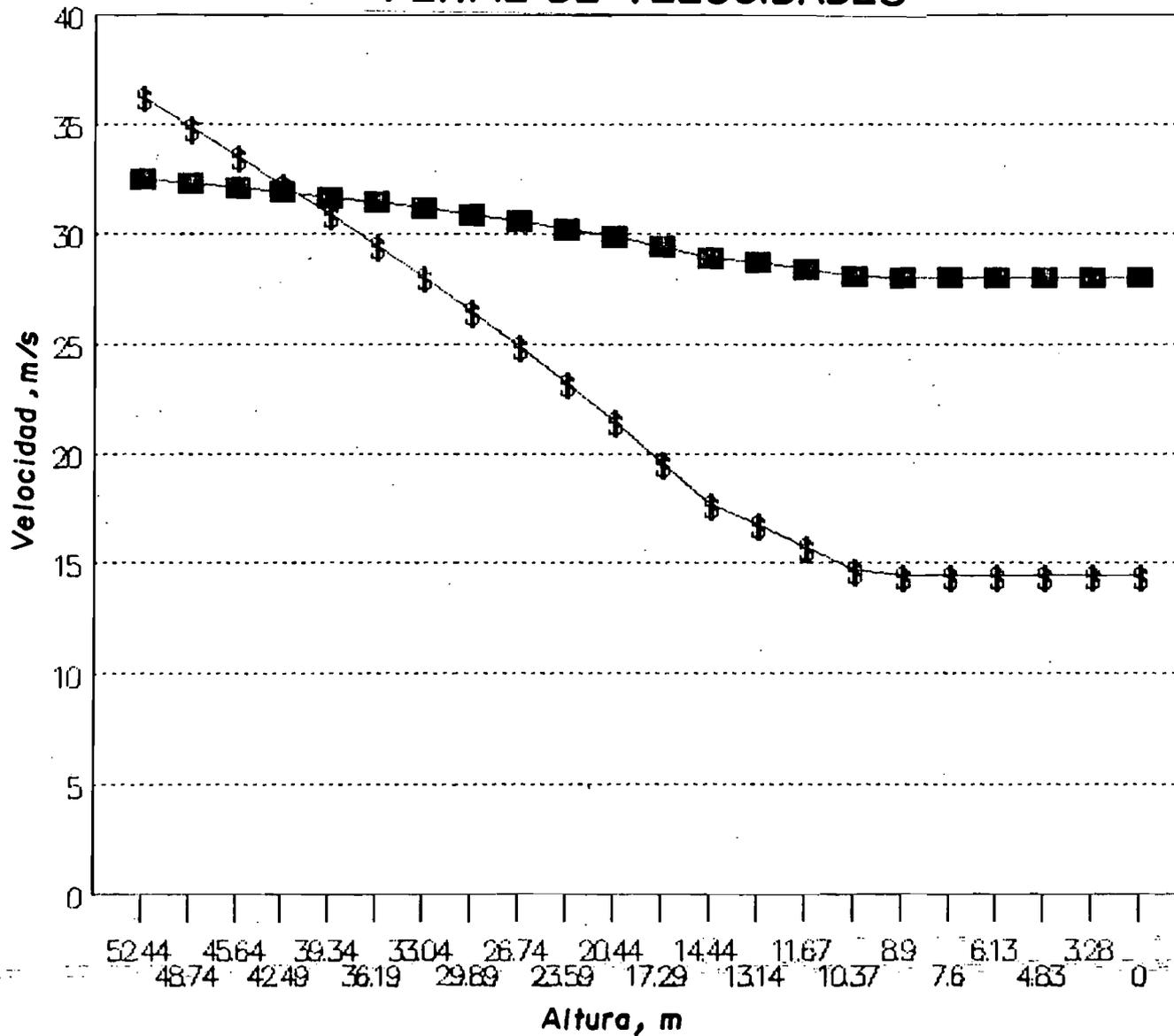


Fig. I.4.

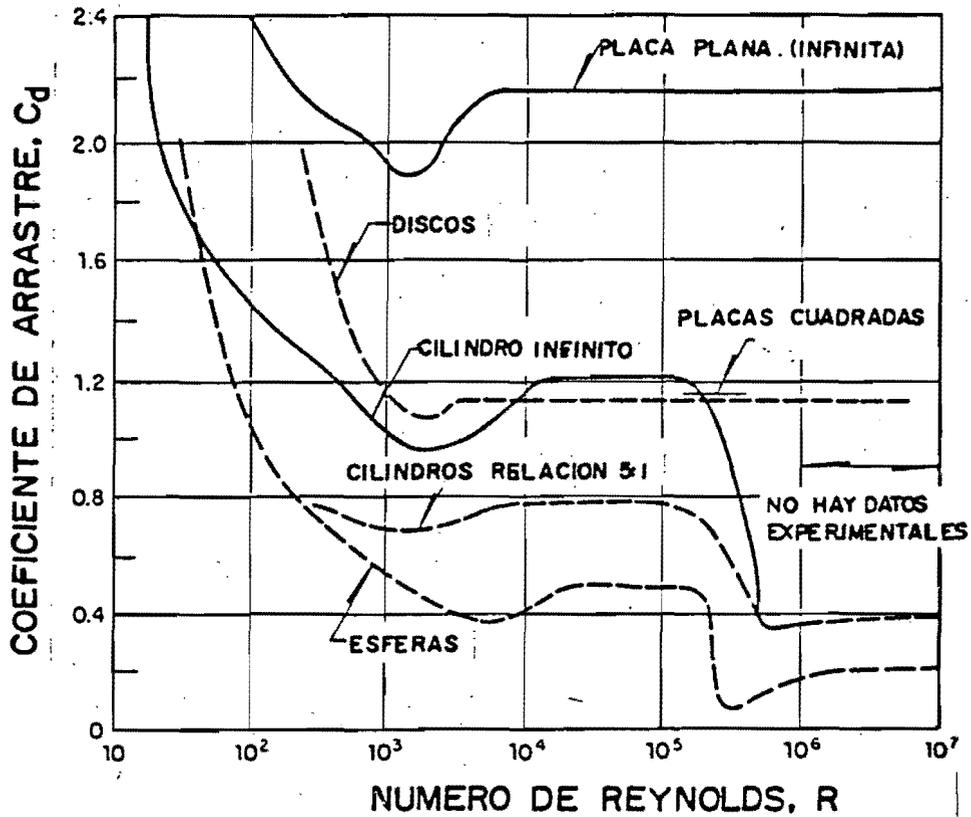


Fig. 2.1. Coeficiente de arrastre  $C_d$  variación con el número de Reynolds.

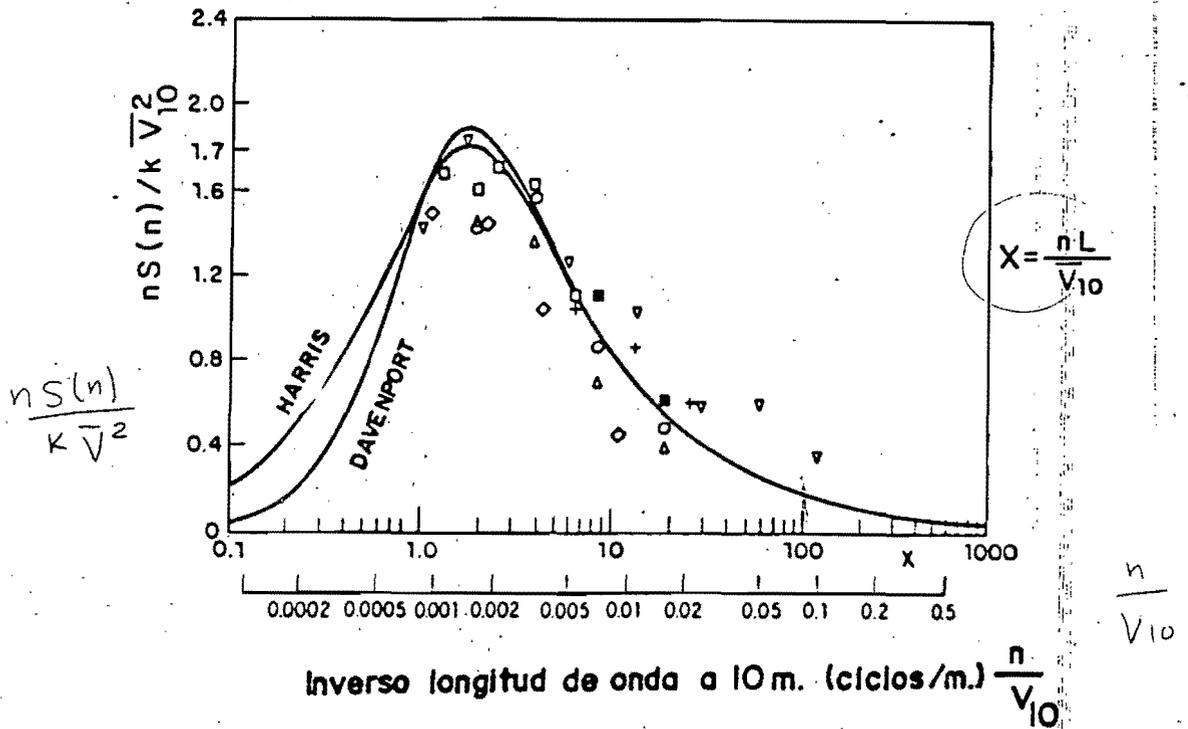
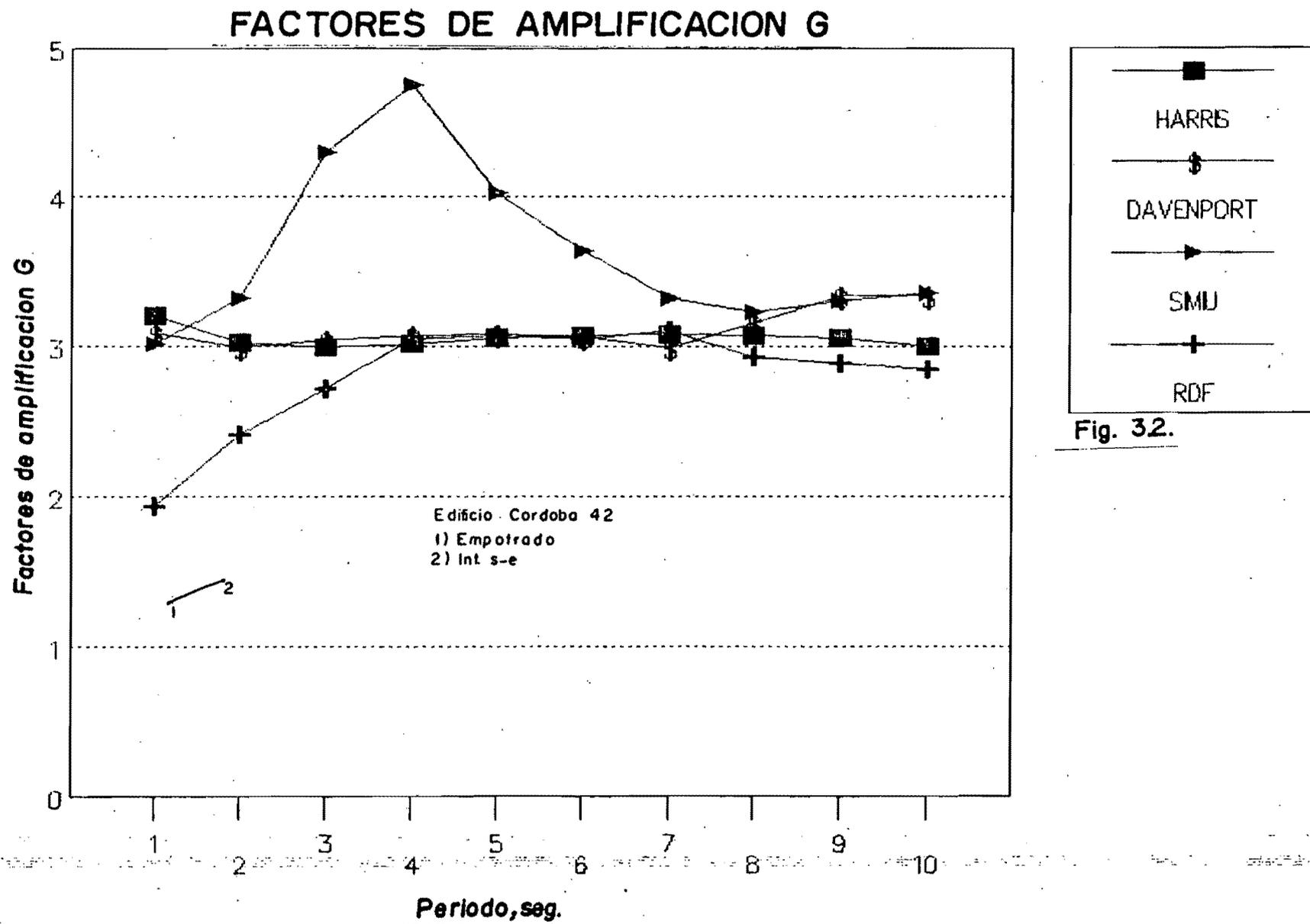


Fig. 3.1. Espectros de turbulencia, propuestos por Harris y Davenport.



# ESPECTRO DE RESPUESTA ACELERACIONES

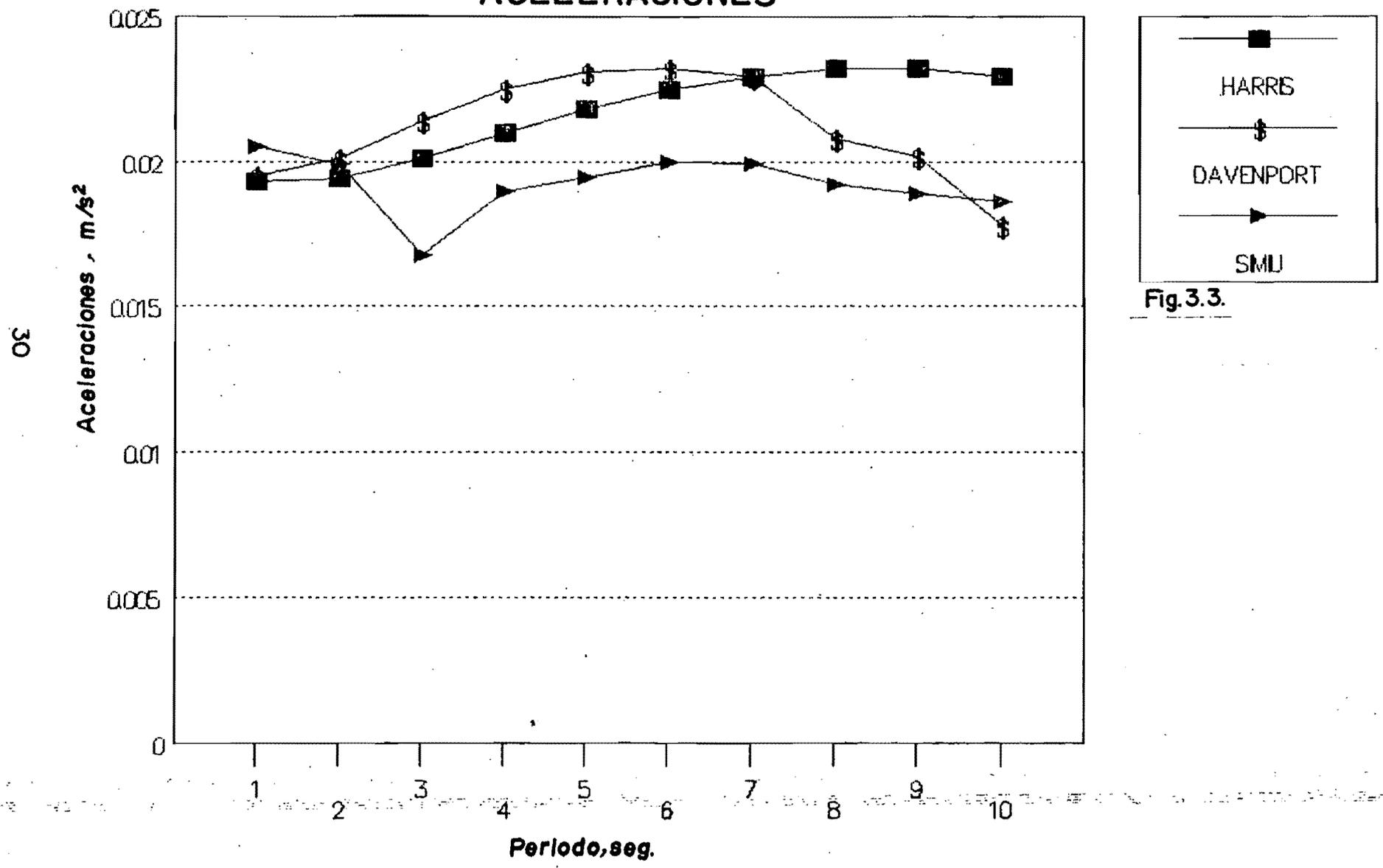


Fig. 3.3.

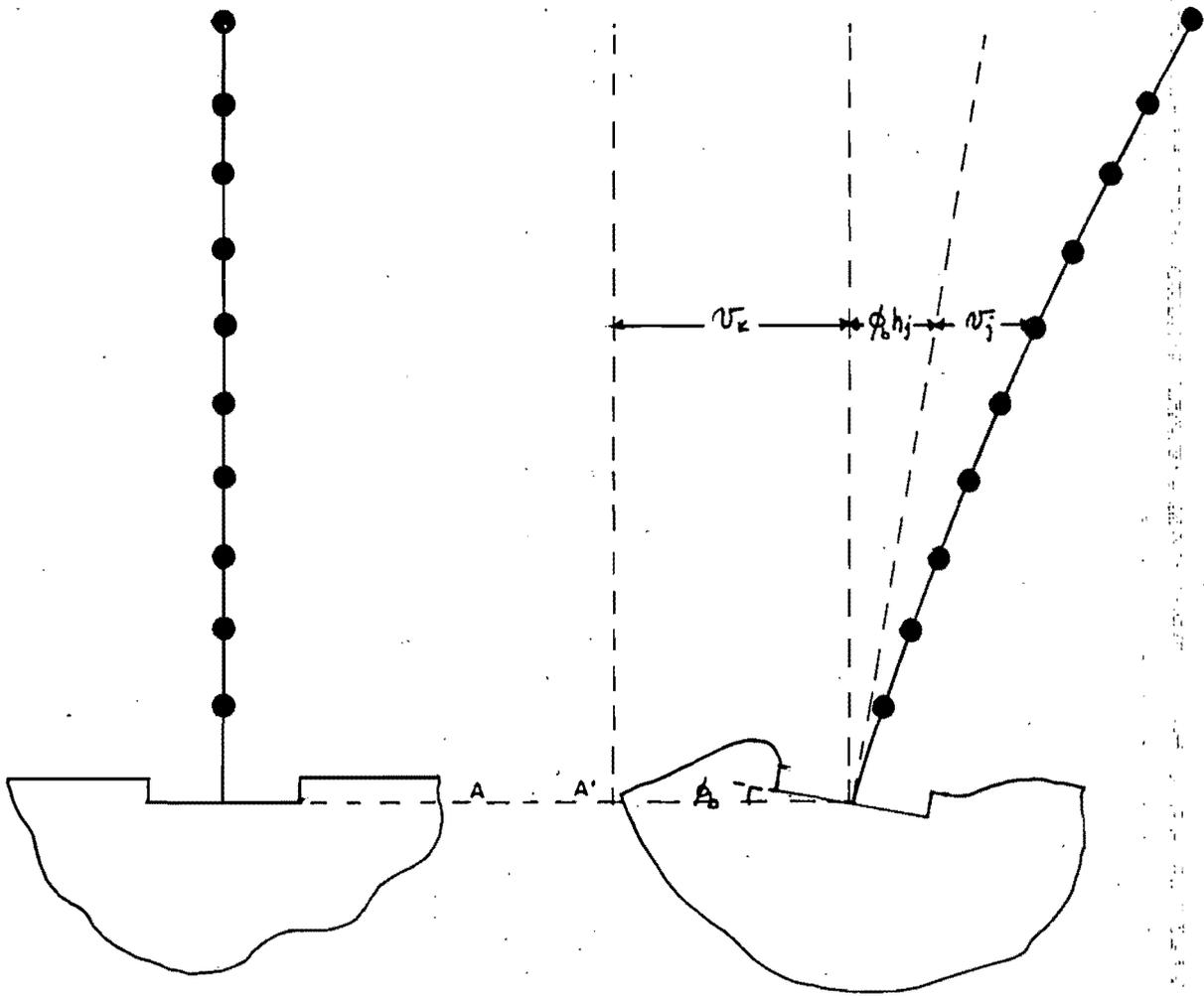


Fig. 4.1. Modelo interacción suelo estructura.

## MODELO CON INTERACCION SUELO ESTRUCTURA

### Análisis plano

Modo	Dirección	Período, segundos	
		X	Y
1		1.5878	1.7413
2		0.6305	0.6517
3		0.2335	0.2315
4		0.1267	0.1205
5		0.0790	0.0717

### Análisis tridimensional

Modo	Período, segundos
1	1.7501
2	1.6184
3	1.2865
4	0.6624
5	0.6440

## MODELO CON BASE EMPOTRADA

### Análisis plano

Modo	Dirección	Período, segundos	
		X	Y
1		1.1413	1.1841
2		0.2990	0.2840
3		0.1435	0.1324
3		0.0832	0.0748
5		0.0588	0.0510

### Análisis tridimensional

Modo	Período, segundos
1	1.2614
2	1.1757
3	1.0548
4	0.3878
5	0.2863

Tabla 4.1. Períodos de la estructura ubicada en Córdoba # 42, Colonia Roma.

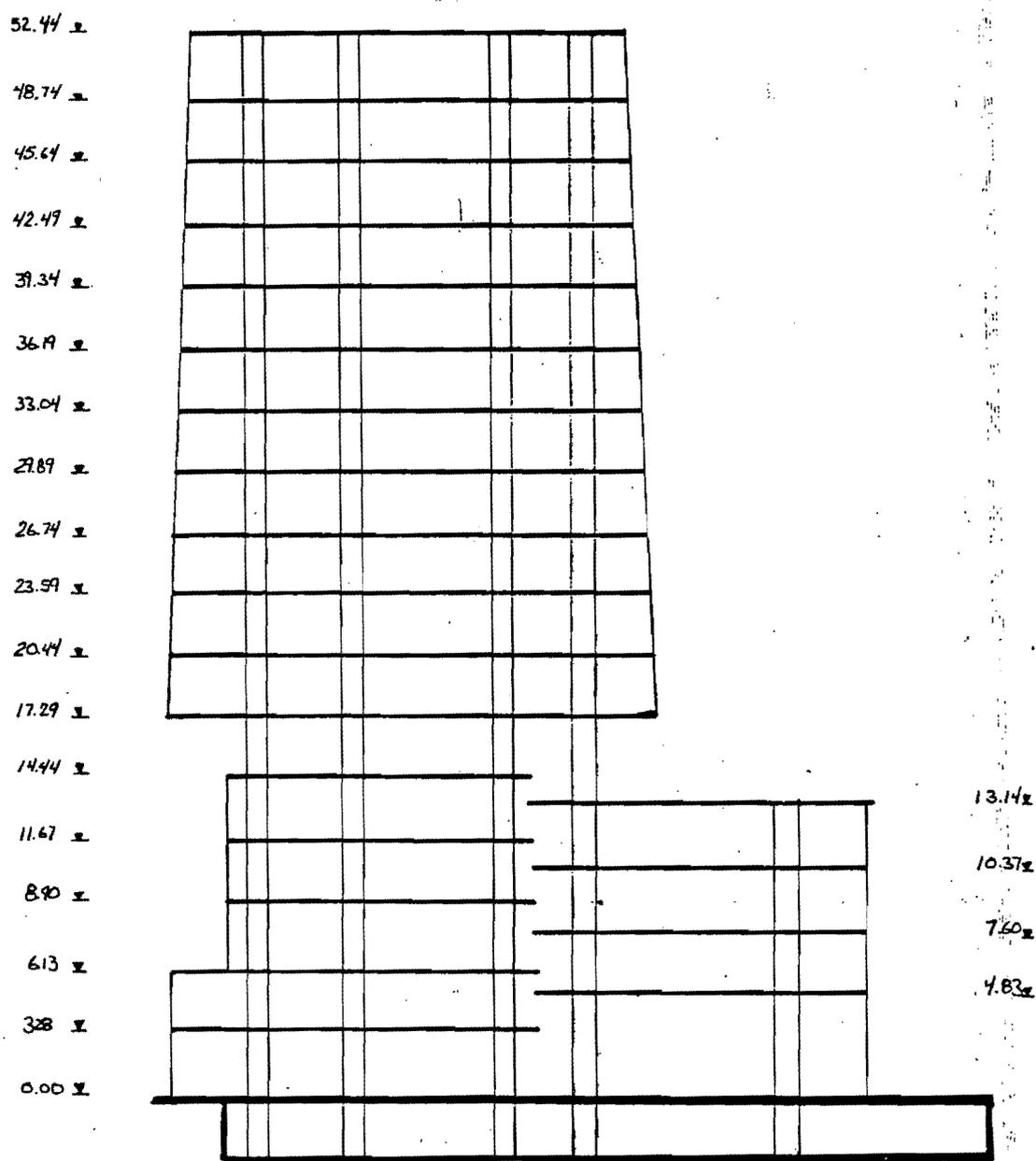


Fig. 4.2. Elevación del edificio Córdoba # 42.

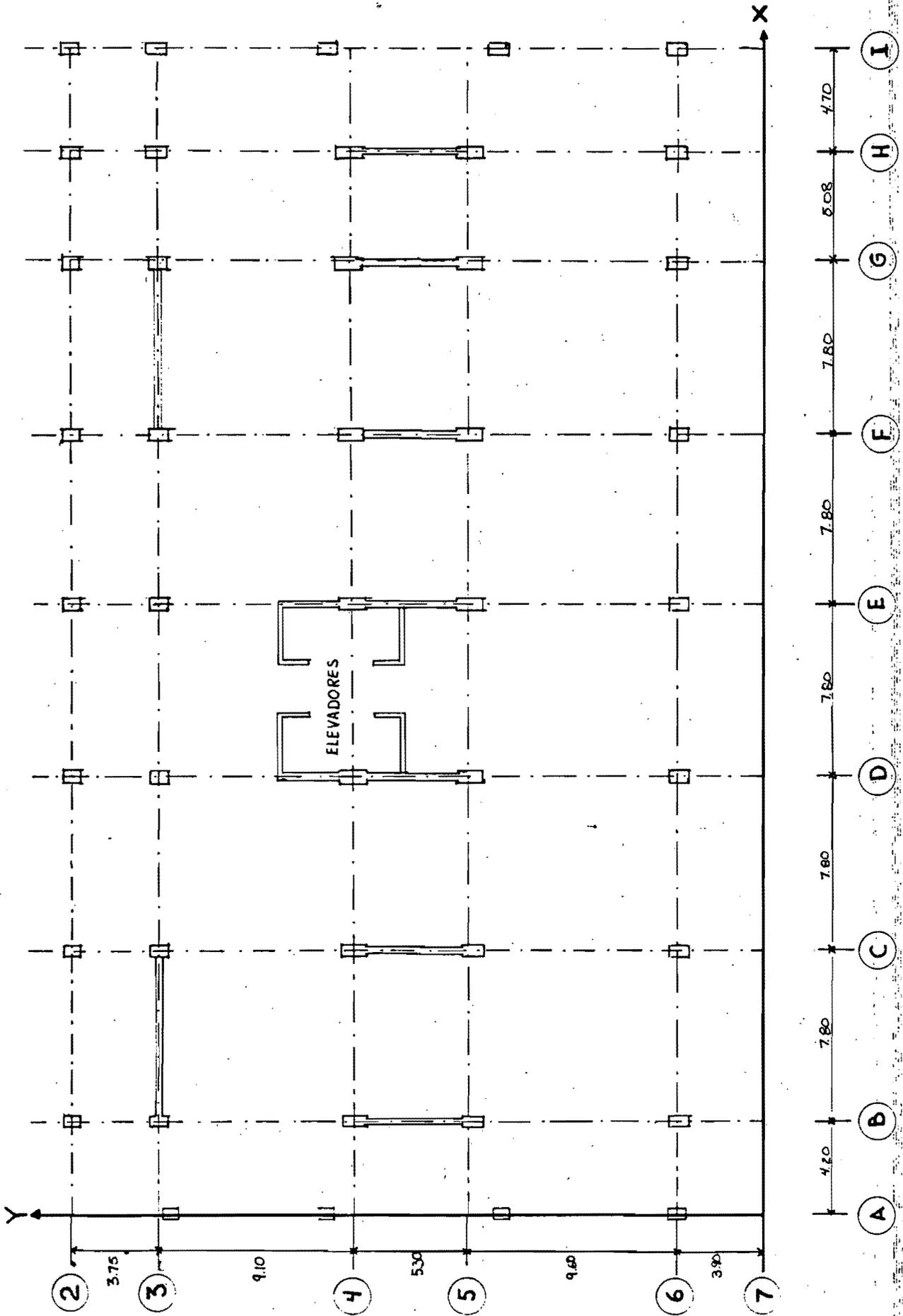


Fig. 4.3. Planta nivel 0.00 m.

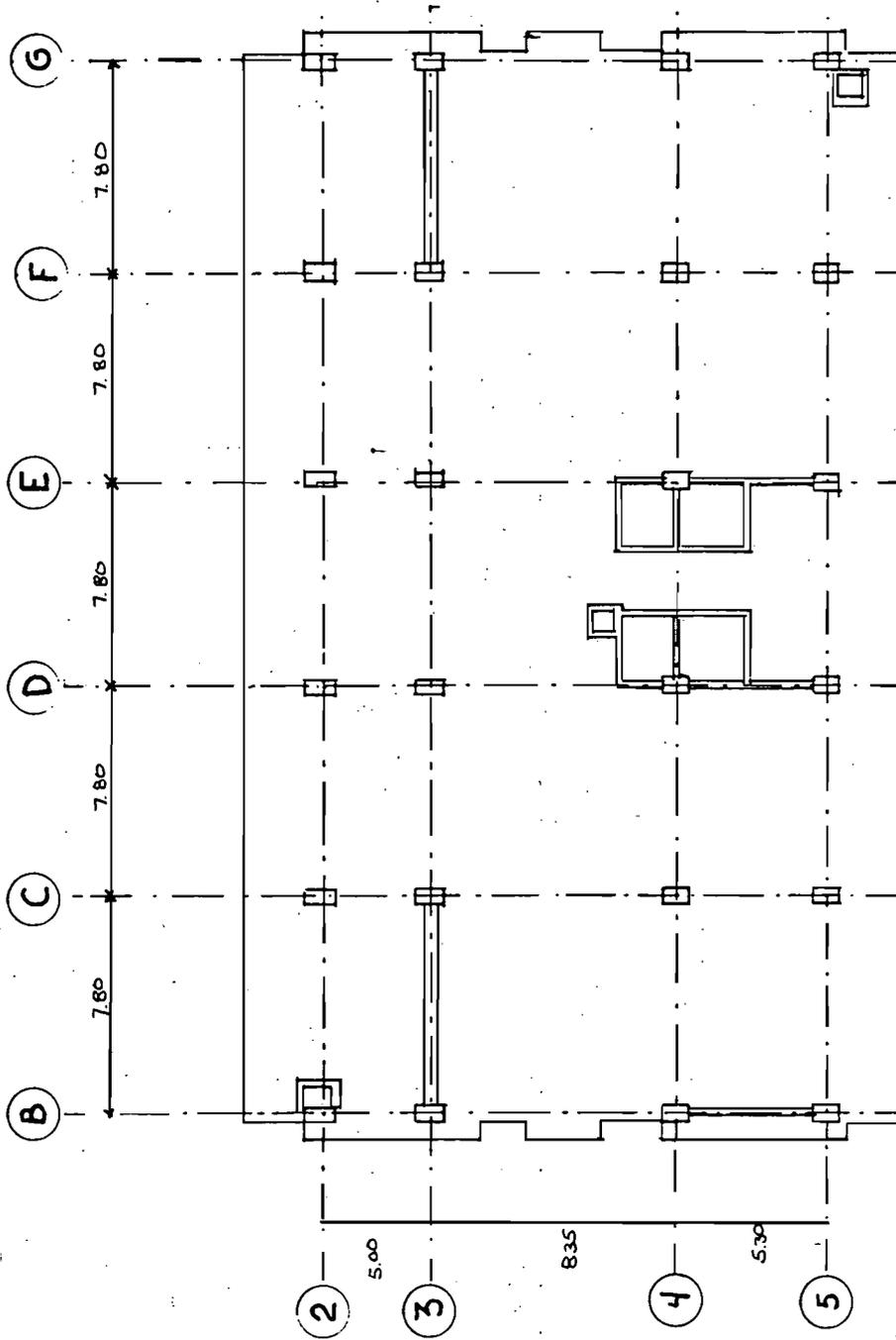


Fig. 4.4. Planta nivel 17.29 m.

# PRIMER MODO NORMALIZADO RESPECTO A LA AZOTEA DIRECCION Y

36

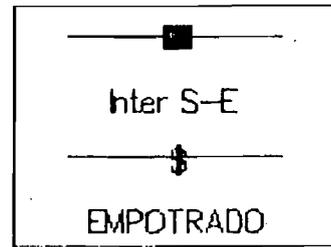
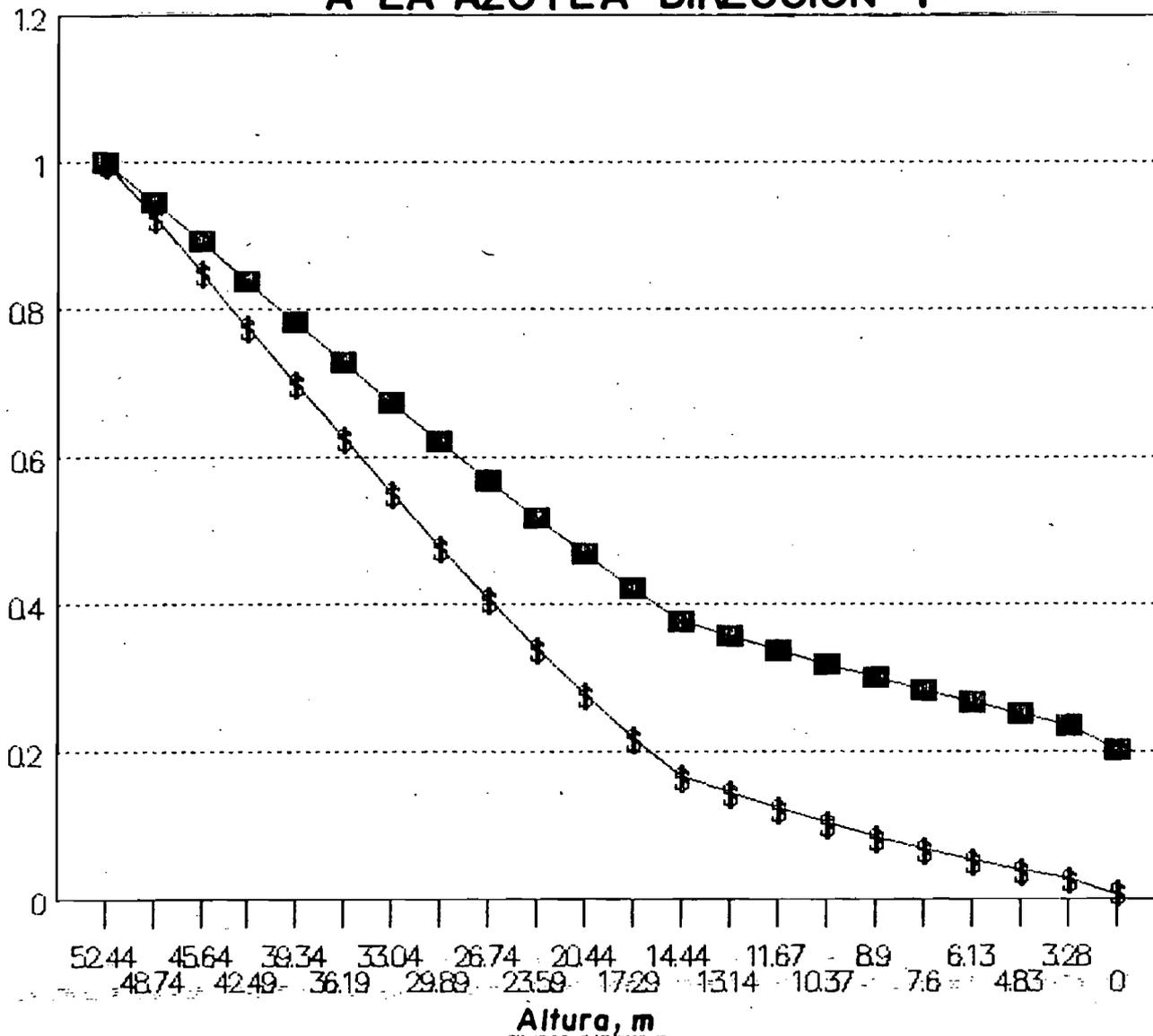


Fig. 4.5.

# FUERZAS PRODUCIDAS POR EL VIENTO MEDIO (DIRECCION Y)

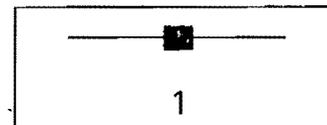
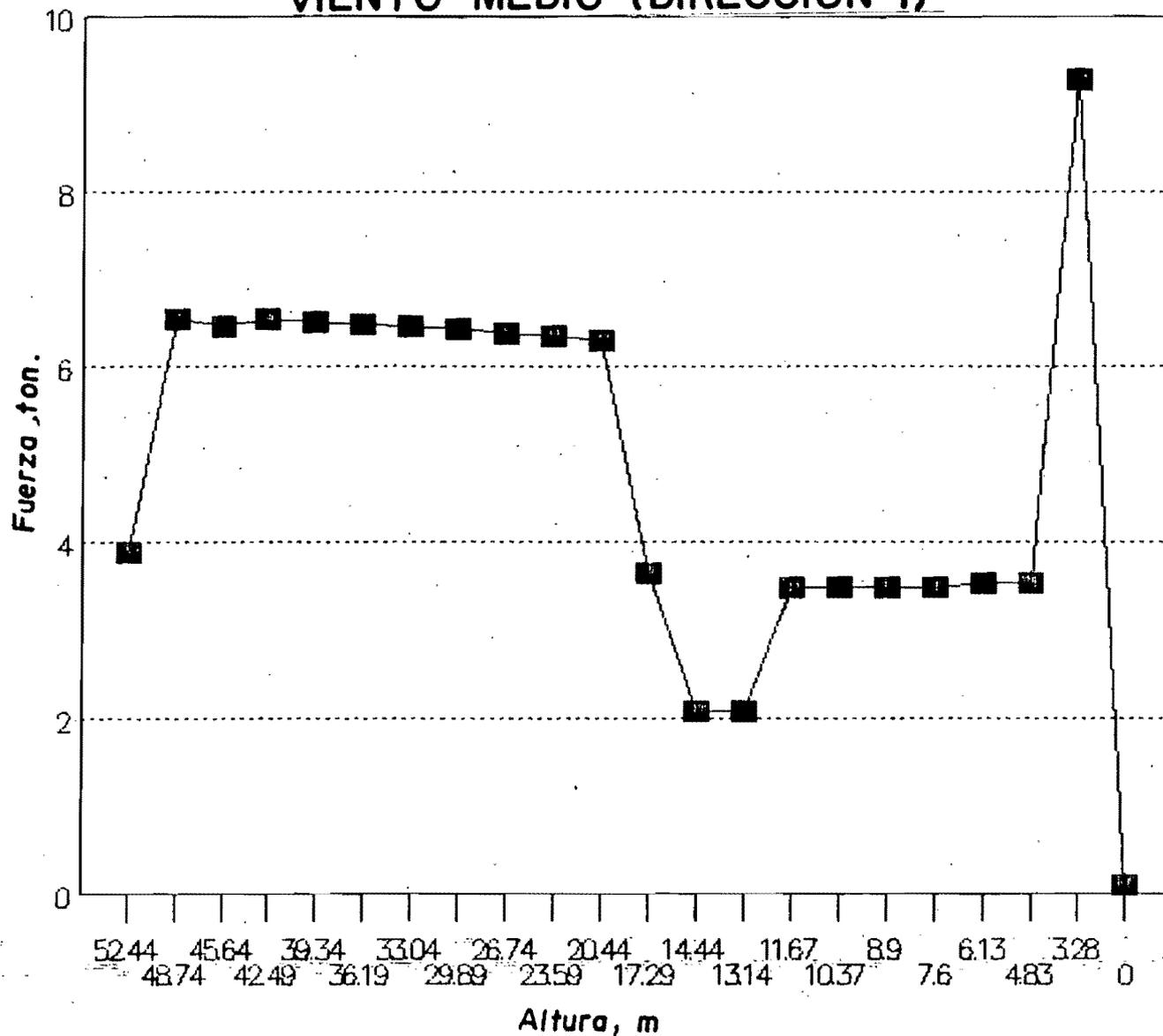


Fig. 4.6.

$V_0 = 28 \text{ m/s}$

Cortante = 106 ton.

# DESPLAZAMIENTOS POR LA ACCION MEDIA (DIRECCION Y) MODELO PLANO

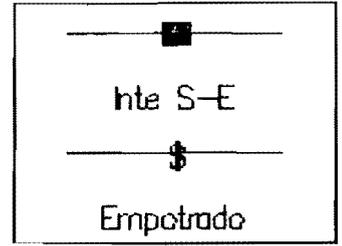
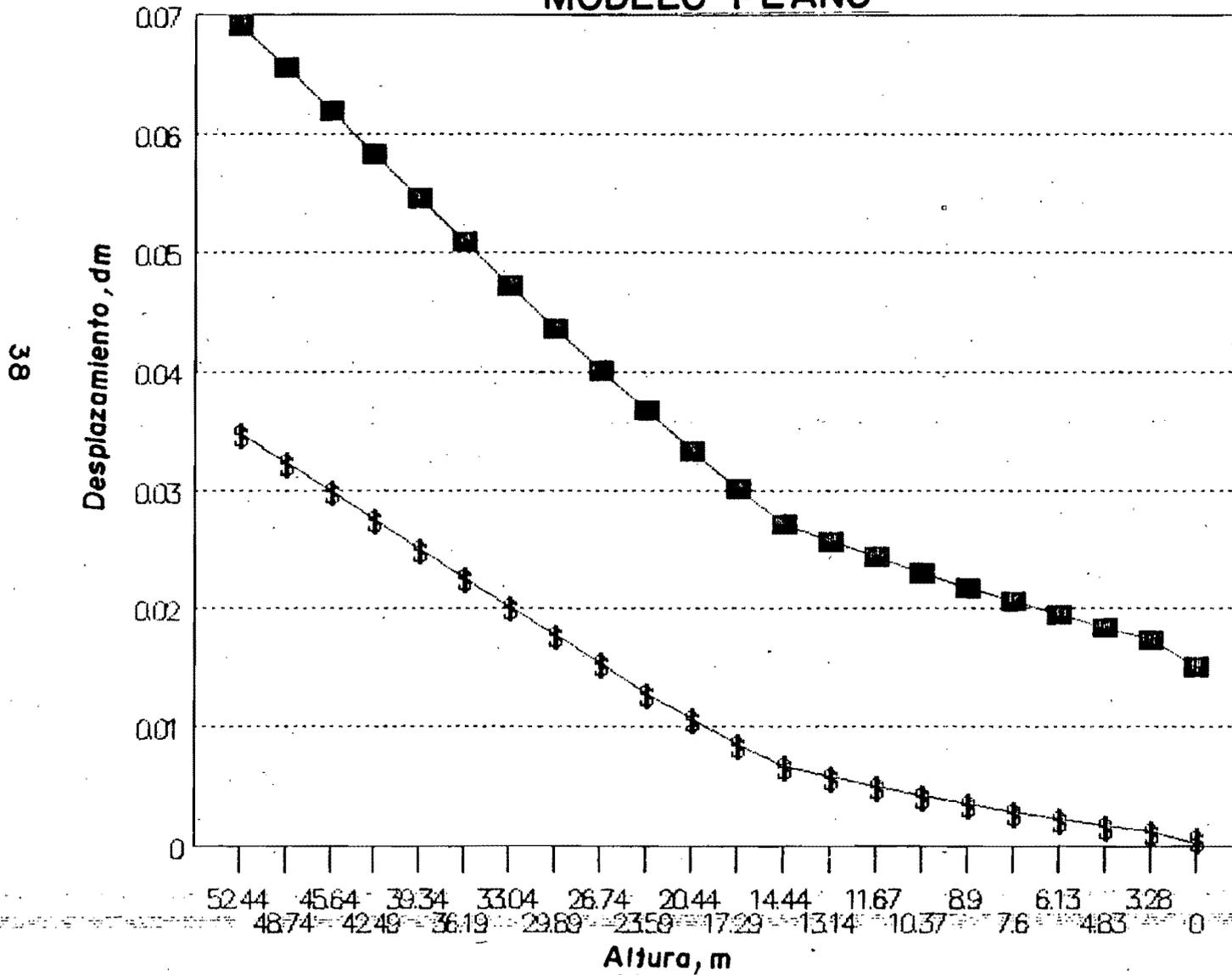


Fig. 4.7.  
 $V_d = 28 \text{ m/s}$

38

# DESPLAZAMIENTOS POR LA ACCION MEDIA (DIRECCION Y) MODELO TRIDIMENSIONAL

39

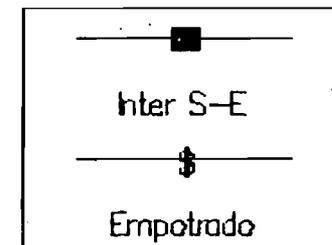
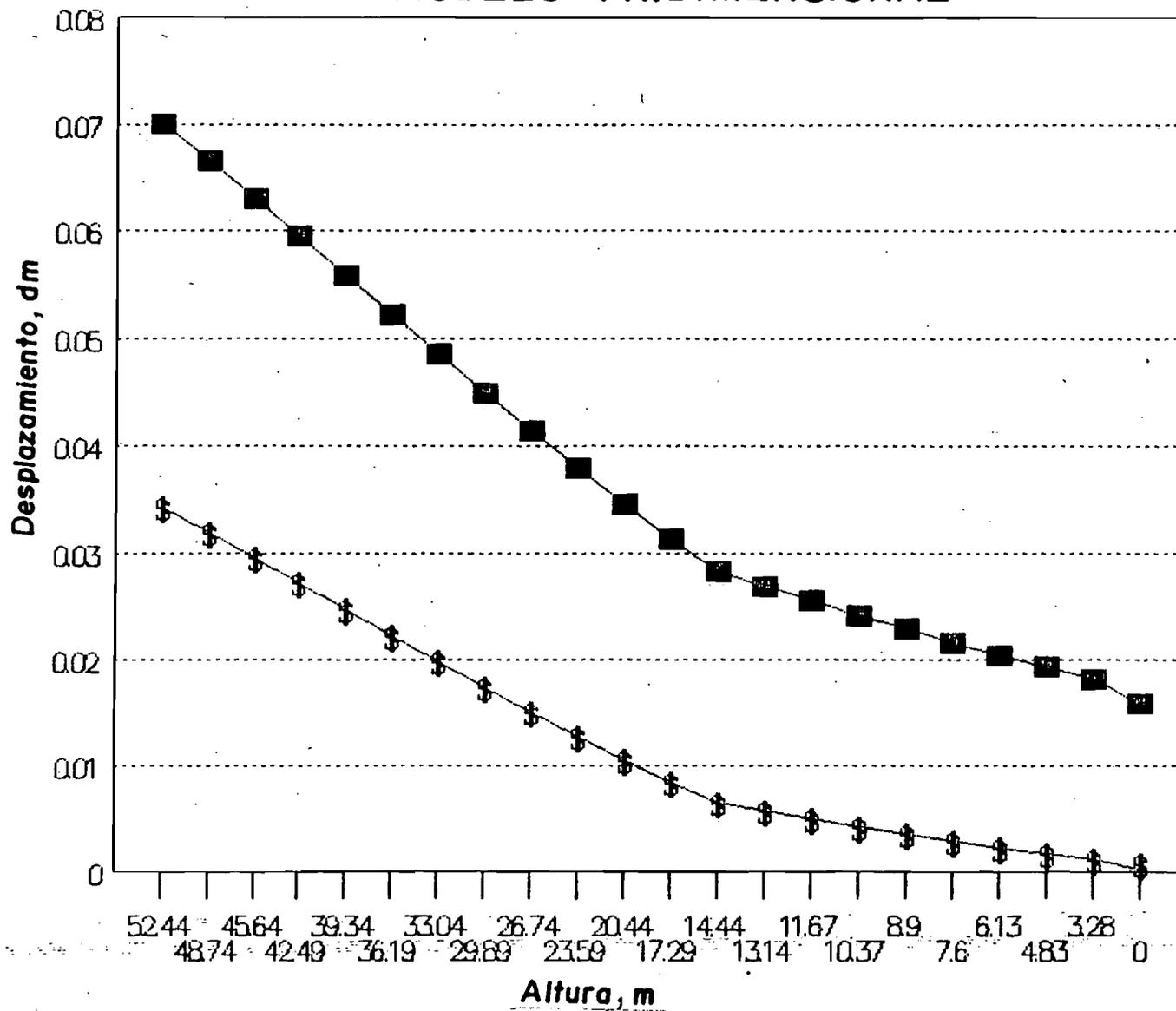


Fig. 4.8.  
 $V_g = 28 \text{ m/s}$



# DESPLAZAMIENTOS POR LA ACCION MEDIA Y TURBULENTO DEL VIENTO (DIRECCION Y)

## MODELO PLANO

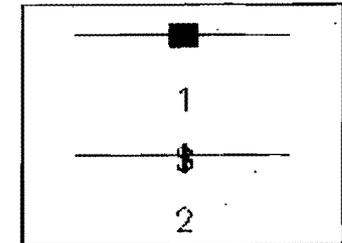
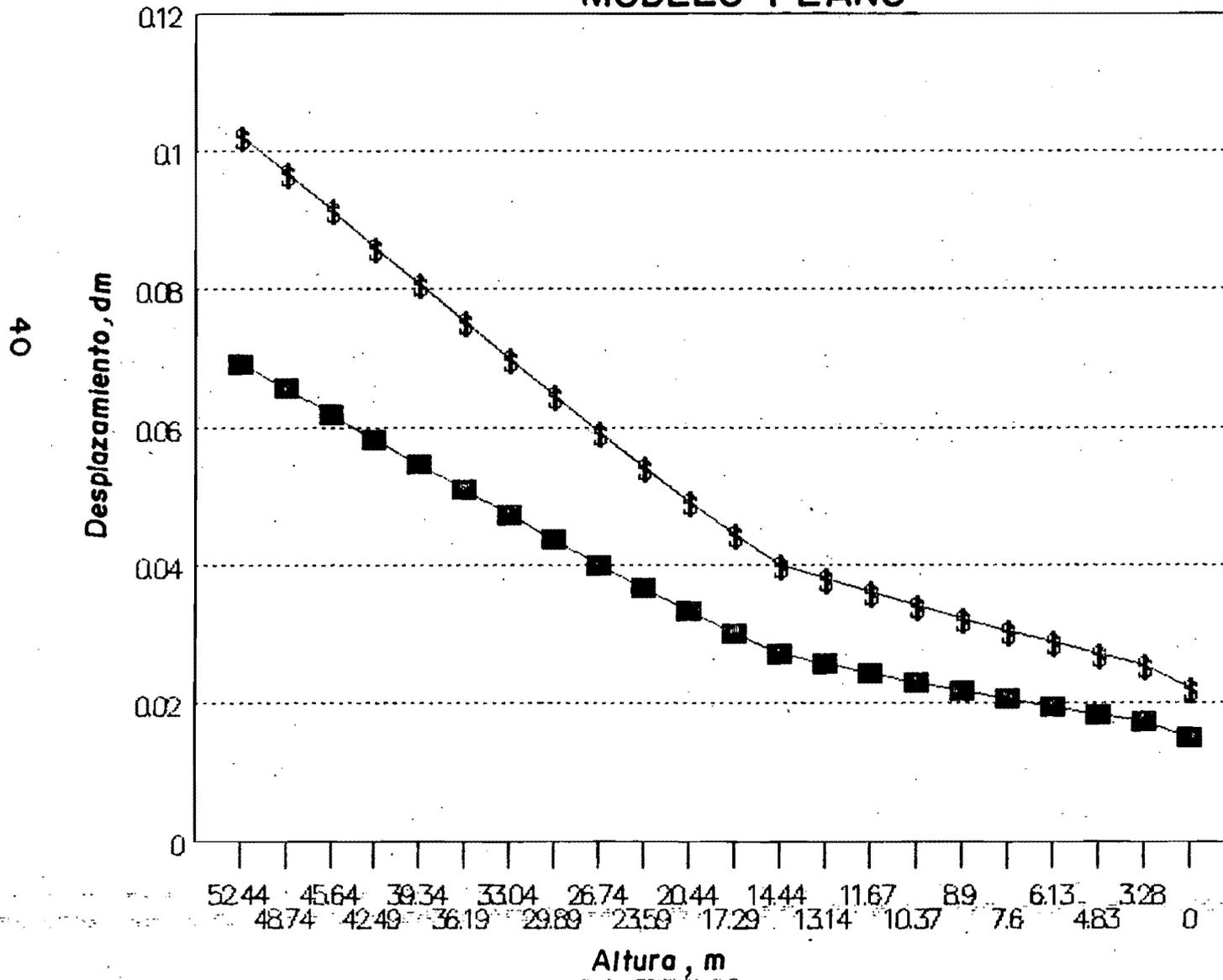


Fig. 4.9.

Mod. interaccion s-e

1) Desplazamiento accion media del viento:

2) Desp. accion turbulenta del viento:

$V_d = 28 \text{ m/s}$

## DESPLAZAMIENTOS POR LA ACCION MEDIA (DIRECCION Y)

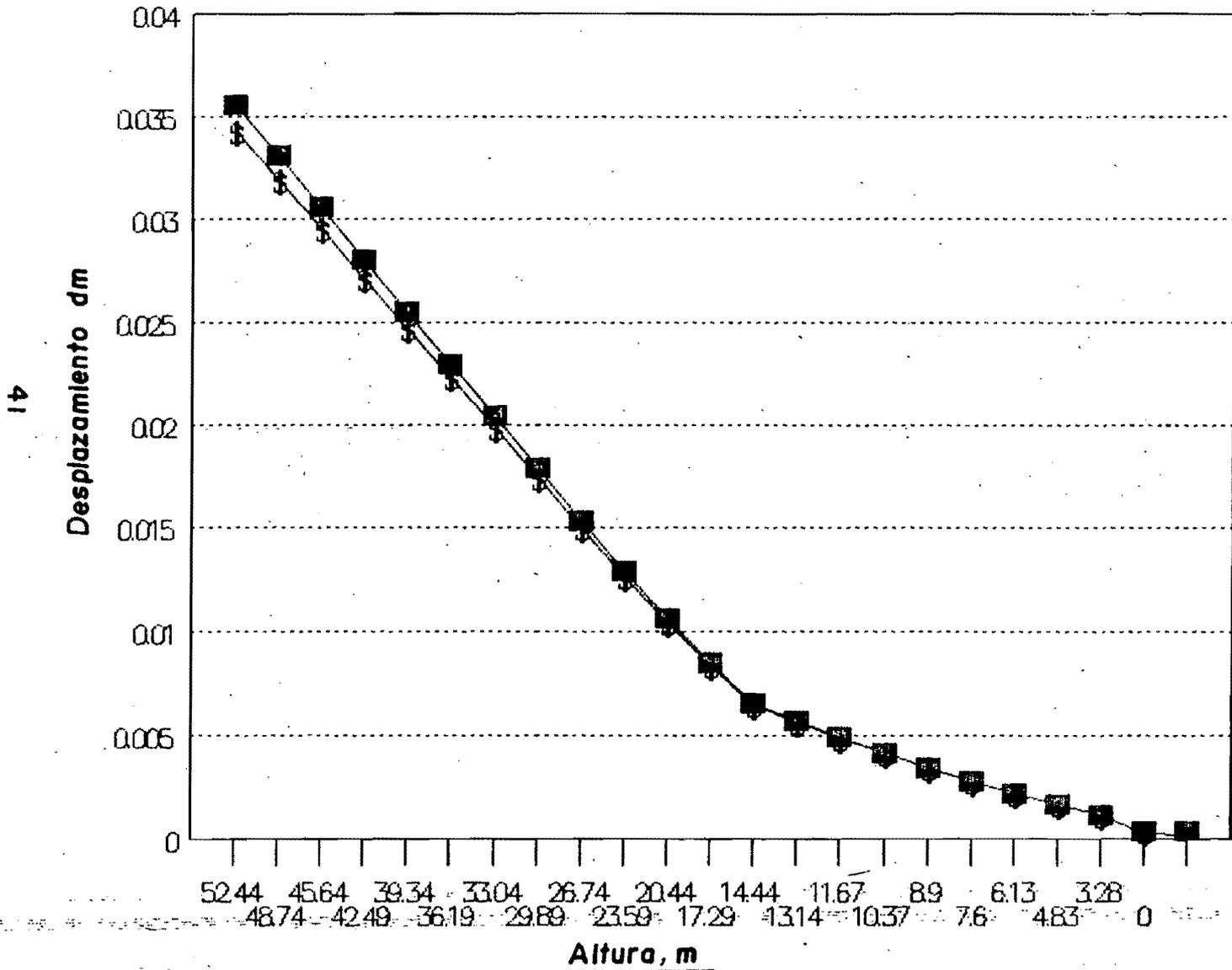


Fig. 4.10.