

**Universidad Nacional del Nordeste**

**Facultad de Ingeniería**

**Carrera:**

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería**



**Simulación de vientos naturales en el túnel de viento de la  
UNNE por el método de Standen**

**T E S I S**

Para obtener el título de:

**Magister en Mecánica Aplicada al Análisis y Proyecto en Ingeniería**

Presenta:

**Ing. Bruno Natalini**

Resistencia, Chaco Argentina

1997

Bruno Natalini

**"SIMULACION DE VIENTOS NATURALES EN EL TUNEL DE  
VIENTO DE LA UNNE POR EL MÉTODO DE STANDEN".**

Tesis presentada como requisito para la obtención  
del título de Magister en Mecánica Aplicada  
al Análisis y Proyecto en Ingeniería

## Indice

	pag.
Nomenclatura	4
1. Introducción	7
2. Diseño de la investigación y métodos	12
2.1. Desarrollo de los experimentos	12
2.2. El túnel de viento de la UNNE	12
2.3. Valores de diseño del conjunto de simuladores	13
2.4. Diseño de las agujas	13
2.4.1. Para simulación de espesor total	13
2.4.2. Para simulación de espesor parcial	15
2.5 Diseño de la rugosidad	17
2.5.1. Dimensionamiento	17
2.5.2. Verificación por el método de Gartshore y De Croos	18
2.5.3. Verificación por el método de Fang y Sill	19
2.6. Técnica operativa	19
2.6.1. Velocidades medias	19
2.6.2. Componentes fluctuantes	22
2.7. Experimentos	26
3. Resultados	29
Velocidades medias	29
Componentes fluctuantes	32
4. Discusión de resultados	43
4.1. Consistencia de los resultados	43
4.2. Homogeneidad transversal	44
4.3. Correspondencia con la capa límite atmosférica	44
4.4. Correspondencia con valores de diseño	45
4.5. Evolución a lo largo de la cámara de ensayos	46
5. Conclusiones	47
Bibliografía	48
Figuras	51
Apéndice A	56
Capa límite turbulenta	56

Perfiles de velocidad media	57
La ley potencial de velocidades medias	60
Capa límite en equilibrio	61
Capa límite neutralmente estable	61
Apéndice B	63
El coeficiente de correlación lineal	63

## Nomenclatura

$A$	Area plana total donde se coloca la rugosidad
$A_F$	Area frontal de un elemento de rugosidad tridimensional
$A_p$	Area plana efectiva asociada con cada elemento de rugosidad tridimensional
$A_R$	Area de la superficie plana efectivamente cubierta por la rugosidad
$A_S$	Area de superficie mojada del elemento rugoso
$A_W$	Area de superficie a barlovento del elemento rugoso
$b$	Ancho de la base de la placa frontal de las agujas
$B$	Constante de calibración de las sondas del anemómetro de hilo caliente
$(C_D)_b$	Coeficiente de arrastre de barras cuadradas bidimensionales por unidad de superficie
$(C_D)_R$	Coeficiente de arrastre de un área unitaria cubierta por elementos tridimensionales
$C_{Do}$	Coeficiente de arrastre de cada aguja(basado en el área frontal) en ausencia de bloqueo pero incluyendo la interferencia aerodinámica de agujas adyacentes
$d$	Parámetro “desplazamiento del plano cero” de la ley de pared
$e$	Lectura de tensión eléctrica obtenida con anemómetro de hilo caliente y de la cual se obtiene una lectura de velocidad instantánea
$\bar{E}$	Lectura del voltímetro de valor medio del anemómetro de hilo caliente
$E_{RMS}$	Lectura del voltímetro de valor RMS del anemómetro de hilo caliente
$E_0$	Constante de calibración de las sondas del anemómetro de hilo caliente
$f$	Frecuencia
$g$	Aceleración de la gravedad
$h$	Altura de las agujas
$H$	Alto de la cámara de ensayos
$I_u(z)$	Intensidad de turbulencia local de la componente longitudinal, a una altura $z$
$I_{10}$	Intensidad normalizada de turbulencia de la componente longitudinal respecto de la velocidad media a 10 m de altura
$k$	Altura de los elementos rugosos en el túnel
$k$	Escala de longitud relevante en la capa de pared
$k_{eff}$	Altura efectiva de los elementos rugosos
$K$	Cota media de la rugosidad en terreno natural
$l$	Ancho de la cámara de ensayos
$\ell$	Longitud a lo largo de la cámara de ensayos en que el piso está cubierto de rugosidad
$L_{x,u}(z)$	Escala integral de la componente longitudinal de la turbulencia en la dirección del

	flujo. En este trabajo se la llama para abreviar, macroescala
$m$	Constante de calibración de las sondas del anemómetro de hilo caliente
$n$	Dimensión de la muestra en un proceso de muestreo aleatorio
$N$	Número de agujas
$p_{atm}$	Presión atmosférica
$P_1$	Factor que al multiplicarlo por $\bar{U}_{ref}$ da el valor de la velocidad media a la altura gradiente
$q$	Presión dinámica en un punto
$\bar{q}_{ref}$	Presión dinámica media a una altura de 131,4 cm. en el eje vertical central de la sección en estudio
$R$	Coeficiente de correlación lineal entre dos variables aleatorias
$R'$	Constante particular del aire de la ecuación de estado de los gases perfectos
$S$	Factor de escala geométrico del modelo
$S$	Densidad específica (espaciamiento) de los elementos rugosos
$Sx_{n-1}^2$	Estadísticos “varianza poblacional modificada” de las variables aleatorias $x$ e $y$
$Sy_{n-1}^2$	
$T$	Temperatura en grados Kelvin
$u_*$	Velocidad de corte o cizallamiento
$u', v', w'$	Componentes longitudinal, transversal y vertical respectivamente, de la componente fluctuante del vector velocidad
$U_{RMS}$	Valor RMS de $u'$
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$	Componentes longitudinal, transversal y vertical respectivamente, del vector velocidad media
$\bar{U}_1$	Velocidad de corriente libre
$\bar{U}_{10}$	Velocidad media en el tunel a una altura equivalente a 10 m en la atmósfera
$\bar{U}_A$	Velocidad media obtenida de una serie de 5000 valores medidos con anemómetro de hilo caliente
$\bar{U}_{ref}$	Velocidad media a una altura de 131,4 cm. en el eje vertical central de la sección
$x, y$	Variables aleatorias
$z$	Altura sobre el piso
$z_0$	Parámetro de longitud rugosa en condiciones controladas
$z_{10}$	Altura en el tunel equivalente a 10 m en la atmósfera

$Z_0$	Parámetro de longitud rugosa en terreno natural
$Z_g$	Altura gradiente en la atmósfera
$\alpha$	Exponente de la ley potencial de velocidades medias
$\beta$	Parámetro adimensional utilizado en el proceso de cálculo de las agujas
$\delta$	Altura gradiente en condiciones controladas (espesor de la capa límite simulada)
$\delta_{MII}$	Altura gradiente sobre la mesa II
$\delta^*$	Espesor de desplazamiento de una capa límite
$\delta_{6h}$	Altura gradiente a una distancia a sotavento de las agujas de 6 veces su altura (h)
$\Delta P_{AN}$	Diferencia de presión entre anillos piezométricos
$\Phi(f)$	Función de densidad espectral
$\theta$	Factor de bloqueo
$\rho$	Densidad del aire
$\rho_{cen-lat}$	Coeficiente de correlación lineal entre valores experimentales de velocidades medias sobre un perfil central y otros correspondientes a una posición lateral
$\rho_{exp-teo}$	Coeficiente de correlación lineal entre valores experimentales de velocidades medias y los correspondientes a la ley potencial
$\kappa$	Constante de Kármán
$\lambda_e$	Espaciamiento efectivo en dirección de la corriente de barras bidimensionales de rugosidad superficial colocadas transversalmente al flujo
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\psi$	Parámetro adimensional utilizado en el proceso de cálculo de las agujas

# 1.INTRODUCCION

Plate(1) dice que hay dos razones principales para simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento. La primera es ayudar a comprender el flujo en la atmósfera. La segunda es resolver problemas de ingeniería tales como predecir cargas de viento en estructuras, predecir el modo en que las estructuras afectan al viento (problemas de confort) o estudiar problemas de difusión de poluentes. Este trabajo en particular, está dirigido al estudio de cargas de viento sobre estructuras, en una capa límite neutralmente estable; condición que representa bastante bien el comportamiento de las tormentas mas estudiadas y que sirven de base a la mayoría de las normas de vientos.

Es bien conocido que simular un fenómeno físico, requiere reproducir los valores de los números adimensionales que intervienen en las ecuaciones gobernantes del fenómeno cuando éstas han sido previamente adimensionalizadas, así como también requiere reproducir las condiciones de contorno, expresadas éstas también en una conveniente forma adimensional. Ahora bien, si estos números y si las condiciones de contorno son las mismas en modelo y en el fenómeno a escala real, resolver una incógnita en el modelo significa resolverla también en el fenómeno a escala real.

Las escalas que intervienen en la adimensionalización de las ecuaciones del flujo atmosférico, tomadas en este caso de un modelo de Plate(2), son:

Una escala de longitud en dirección vertical que se denota con  $L_R$

Una velocidad de referencia denotada por  $V_R$

Un intervalo de tiempo de referencia que se denota  $t_R$

Una temperatura de referencia que se denota  $T_R$

Un exceso de temperatura que se denota  $\Delta T_R$

Por medio de estas escalas se puede presentar a las ecuaciones de movimiento y energía de la atmósfera en forma vectorial

$$\frac{1}{St} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\vec{\nabla} p + \frac{1}{Re} \vec{\nabla}^2 \vec{V} - \frac{1}{Ro} \vec{k} \times \vec{V} + \frac{1}{Fr^2} \frac{\Delta T}{T} \cdot \vec{k}$$

y

$$\frac{1}{St} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \Delta T = \frac{1}{Pr \cdot Re} \vec{\nabla}^2 \Delta T + \frac{Ec}{Re} \phi$$



Aquí  $\vec{V}$  es el vector velocidad adimensional,  $p$  la presión que fue adimensionalizada por  $\rho V_R^2$ ;  $\Delta T$  que es adimensionalizada por  $\Delta T_R$ , es la desviación adimensional de una adecuada temperatura media, la cual es presentada como  $T$  y es hecha adimensional por  $T_R$ . El vector  $\vec{k}$  es el vector unitario que apunta verticalmente hacia arriba desde la superficie de la tierra; y  $\phi$  es la energía de disipación adimensional por unidad de volumen y masa.

Los parámetros que gobiernan estas ecuaciones y que deberán ser reproducidos son:

$$Ro = \frac{V_R}{L_R f} ; \text{ número de Rossby (con } f = \text{ parámetro de Coriolis)}$$

$$Re = \frac{V_R L_R}{\nu} ; \text{ número de Reynolds}$$

$$St = \frac{V_R}{L_R t_R} ; \text{ número de Strouhal}$$

$$Fr = \frac{V_R}{\sqrt{g^* L_R}} ; \text{ número de Froude ( con } g^* = \frac{\Delta T_R}{T_R} g )$$

$$Ec = \frac{\rho V_R^2}{c_p \Delta T_R} ; \text{ número de Eckert (con } c_p = \text{ calor específico del aire)}$$

$$Pr = \frac{\rho \nu c_p}{k} ; \text{ número de Prandtl ( con } k = \text{ conductividad térmica del aire)}$$

Reproducir estos parámetros junto a las condiciones de contorno en el modelo y en el fenómeno a escala real en forma exacta, sólo es posible si ambos son idénticos. Este inconveniente puede ser salvado porque en la mayoría de los requerimientos de modelado, no son necesario considerar todos los aspectos del flujo.

Se verá entonces como relajar las condiciones de simulación para el propósito de este trabajo, que es estudiar los problemas de cargas en edificios en una capa límite atmosférica neutralmente estable.

El principal efecto del número de Rossby es que describe el efecto de la fuerza de Coriolis, que se manifiesta como una rotación del vector velocidad con la altura. Poco es conocido acerca de cuánto afecta el efecto del virado del viento a las fuerzas en edificios esbeltos, pero se acepta usualmente que no tiene efecto significativo. En cambio si tiene importancia en el estudio de fenómenos de difusión.

La semejanza del número de Reynolds no puede ser conseguida, puesto que siendo la viscosidad cinemática igual en modelo y prototipo, y las escalas geométricas entre 1:50 y 1:5000,

se necesitarían velocidades de flujo en el túnel de viento difíciles o imposibles de alcanzar; y que si fuesen alcanzadas, al estar cerca o superar la velocidad del sonido, provocarían efectos de compresibilidad que no existen en el modelo atmosférico. Afortunadamente, las comparaciones con estructuras reales muestran que para estructuras angulosas basta con asegurar que el  $Re$  sea lo suficientemente grande como para que las fuerzas de inercia sean dominantes, y en el caso de coberturas curvas es suficiente que el  $Re$  esté en el rango subcrítico o supercrítico requerido.

En la mayoría de los casos de importancia práctica es posible suponer un comportamiento estacionario, dado que la gran escala de no estacionariedad del flujo atmosférico toma lugar gradualmente (en el orden de horas), de tal manera que el efecto del número de Strouhal puede ser despreciado.

El número de Froude tiene importancia en la simulación de capa límite con estratificación térmica, o disturbios que introduzcan fluctuaciones horizontales, dos casos que no son de nuestro interés.

Tampoco el número de Eckert, que denota la relación entre energía cinética y exceso de energía interna, parece tener ninguna relevancia dinámica.

Cuando el fluido es aire, el número de Prandtl es el mismo en modelo y prototipo<sup>1</sup>.

En cuanto a las condiciones de contorno, específicamente en lo que respecta a la estructura del flujo, normalmente son verificados solamente algunos de los parámetros que la caracterizan, aceptándose que si estos están bien reproducidos el resto también lo estará.

Este grupo de parámetros controlados, o bien, aquellos que son medidos para luego ser comparados con los obtenidos en vientos naturales, son:

- El perfil de velocidades medias.
- El perfil de intensidad de turbulencia de la componente longitudinal de la turbulencia.
- El perfil de macroescala de la componente longitudinal.
- El espectro de potencia de la componente longitudinal.
- El perfil de tensiones de Reynolds  $\overline{u'v'}$

Hasta aquí fue presentado en términos generales qué debe ser verificado en una simulación tal como la que es de interés en este trabajo, pero nada se ha dicho sobre como materializar esta simulación. Se ha encontrado que la capa límite atmosférica encuentra una correspondencia con la capa límite que se desenvuelve sobre una placa plana con cierta rugosidad en la condición de

gradiente longitudinal de presión nulo. El rol de la rugosidad en el piso es el mismo que juega la rugosidad natural en el flujo atmosférico; ella actúa como un sumidero de cantidad de movimiento, estableciendo un perfil de tensiones de Reynolds que a su vez controla el perfil de velocidades medias y las características de la turbulencia. El problema de simular sólo con rugosidad es que el crecimiento de la capa límite es muy lento, debiéndose contar por ello con longitudes de cámara de ensayos muy grandes para llegar a las escalas usuales en ensayos de estructuras.

Un recurso ante este problema es colocar obstáculos a la entrada de la cámara de ensayos para forzar un brusco crecimiento de la capa límite. Estos tipos de simulaciones son conocidos por el nombre de “métodos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla”.

Varios tipos de esta clase de simuladores han sido estudiados por investigadores como Counihan(5)(6), Standen(7), y Cook(8), pero en general el conjunto de simuladores usados en los distintos túneles de viento se definen por prueba y error. Como resultado, la geometría de los simuladores varía considerablemente entre los distintos métodos, aunque en todos cumplen el mismo rol. La rugosidad establece los parámetros de la ley de pared; las barreras suministran un brusco déficit de cantidad de movimiento y generan un espesor inicial de la capa límite, como si existiera una gran longitud de rugosidad aguas arriba de la cámara de ensayos; los dispositivos de mezcla proporcionan turbulencia a la capa límite en formación y redistribuyen el déficit de cantidad de movimiento.

Standen(7) estudió un tipo de dispositivo que unifica las barreras y los generadores de vorticidad en un solo dispositivo, que en la bibliografía es denominado “spire” y que se conviene en llamar aguja. Estos estudios fueron hechos en el National Aeronautical Establishment de Canadá y se basaron en los ensayos que realizaron Campbell y Standen(9) en los anteriores cuatro años en ese mismo lugar, con grillas, agujas y rugosidad. Posteriormente, en el mismo centro de investigación, Irwin(10) continuó el desarrollo de esta técnica, llegando a aportar expresiones semiempíricas para el diseño de simuladores. Estas expresiones requieren aún el aporte de datos experimentales complementarios para ser verificadas en un mas amplio rango.

El objetivo del presente trabajo es realizar dos simulaciones de capa límite atmosférica neutralmente estable; una del espesor total y una de espesor parcial, para un terreno de la categoría IV de la norma NBR-6123/1988, utilizando las expresiones de Irwin para el diseño de los simuladores. Medir velocidades medias y parámetros turbulentos. Comparar los valores

---

<sup>1</sup> Este análisis, que se da sólo a modo de ejemplo, esta restringido al modelo de Plate, dado que está fuera del alcance de este trabajo recrear la discusión de los criterios de modelado, que puede ser encontrada en (2)(3)y(4). Por ello se omiten los números de Jensen, Richardson, y otros.

obtenidos con los valores de diseño de los simuladores. Comparar los resultados con datos atmosféricos y ajustar los simuladores por prueba y error hasta que el flujo simulado concuerde con los datos atmosféricos.

## 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN Y MÉTODOS

### 2.1. Desarrollo de los experimentos

Los ensayos se llevaron a cabo en el túnel de viento de capa límite de la UNNE.

Se midieron velocidades medias, intensidad de turbulencia de la componente longitudinal, y espectro de potencia de la componente longitudinal en secciones de interés. No se midieron tensiones de Reynolds por limitaciones en el instrumental disponible.

Los ensayos se realizaron en dos etapas. En la primera se midieron velocidades medias y se determinaron los exponentes  $\alpha$  correspondiente a la ley potencial de velocidades medias para los distintos perfiles obtenidos, se calcularon los coeficientes de correlación entre los valores experimentales y la ley potencial teórica, y los coeficientes de correlación entre valores experimentales de perfiles de una misma simulación para analizar la homogeneidad transversal.

En la segunda etapa se midieron velocidades instantáneas y se determinaron las intensidades de turbulencia, y los espectros de potencia. Se determinaron las macroescalas y los factores de escala geométricos para distintos puntos según el procedimiento propuesto por Cook(11) y por último se hicieron comparaciones con datos atmosféricos.

### 2.2. El túnel de viento de la UNNE

Es un túnel de circuito abierto construido en el interior de un hangar. La longitud total del túnel es de 39,65 m. Su cámara de ensayos posee las siguientes dimensiones: 2,4 m (ancho) x 1,80 m (altura) x 22,8 m (longitud); lo que arroja una relación longitud/altura igual a 12,6. El techo de la cámara de ensayos en los últimos 11,6 m. puede desplazarse verticalmente. Las paredes piso y techo de la cámara de ensayos son de madera terciada recubierta por dentro con chapa de fórmica. Posee dos mesas de ensayos giratorias, de 1,2 m de diámetro; una a 3,8 m. del inicio de la cámara (“mesa I”), y la otra a 19,4 m. (“mesa II”). La potencia para el flujo de aire es suministrada por un motor trifásico inductivo de 92 Kw que a través de una correa plana mueve un ventilador axial de 2,25 m. de diámetro. La velocidad máxima en vacío. (velocidad correspondiente al punto de referencia) en la “mesa I” es 24 m/s y 25 m/s en la “mesa II”, variando ligeramente entre ensayos de acuerdo a las condiciones del entorno tales como presión atmosférica, temperatura o vientos exteriores (12). La regulación de la velocidad se hace en forma mecánica, mediante un dispositivo llamado “regulador de caudal” variando el ángulo de ataque del flujo de aire sobre los paletas del ventilador, modificando así su rendimiento. En **figura 1** se puede apreciar un croquis del túnel. Mas detalles del mismo se encuentran en (13).

### 2.3. Valores de diseño del conjunto de simuladores

Se partió de intentar reproducir un viento correspondiente a un terreno de categoría IV, conforme a la definición de la norma NBR- 6123/1988: “terreno cubierto por numerosos obstáculos y poco espaciados en zona forestal, industrial o urbanizada. La cota media de la parte superior de los obstáculos es considerada igual a 10 m. Esta categoría también incluye obstáculos mayores y que aún no puedan ser considerados en la categoría V”. De acuerdo a esta fuente:

$$\alpha = 0,25 \qquad 700 \text{ mm} < Z_0 < 1000 \text{ mm}$$

$$Z_g = 420 \text{ m}$$

Se tomó en cuenta también que según Counihan(14)  $Z_g = 600 \text{ m}$

A su vez se adoptó como intervalo de validez para  $\alpha$ :

$$0,23 \leq \alpha \leq 0,28$$

en función de los valores recopilados en (15).

### 2.4. Diseño de las agujas

#### 2.4.1. Para simulación de espesor total

El tipo de agujas elegido consiste en una placa triangular muy esbelta, que presenta una cara al flujo. Esta placa tiene adherida en la cara a sotavento una placa de refuerzo, tal como se observa en las **figuras 2 y 3**.

Para el dimensionado de las agujas se utilizó las expresiones propuestas por Irwin (10) (16), quien llegó a ellas planteando un balance integral de cantidad de movimiento en un volumen de control que abarcaba la porción de la cámara de ensayos que contenía a las agujas y a la rugosidad, y sobre el cual incidía un flujo uniforme y del cual salía un flujo de capa límite de espesor  $\delta$  y exponente  $\alpha$ .

Primeramente, se calculó la altura de las agujas para obtener un espesor de capa límite  $\delta_{6h} = 1080 \text{ mm}$  a una distancia  $6h$  a sotavento de las mismas, a través de la expresión [1] de (16). (Se verá mas adelante que este valor de  $\delta_{6h}$  conduce a un valor de espesor de capa límite en la segunda mesa, de aproximadamente 1,3 m)

$$h = \frac{1,39\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} = \frac{1,39 \cdot 1080 \text{ mm}}{1 + \frac{0,25}{2}} = 1334 \text{ mm}$$

Se adoptó una separación entre agujas de 600 mm, que es el valor mas cercano al recomendado  $\frac{h}{2}$ . Se usaron por lo tanto 4 agujas; las mas cercanas a las paredes situadas a 300 mm de las mismas.

Luego se calculó la relación  $\frac{b}{h}$  mediante las expresiones [15] y [19] de (10)

$$\beta = \frac{\delta}{H} \frac{\alpha}{1 + \alpha} = \frac{1080\text{mm}}{1800\text{mm}} \frac{0,25}{(1 + 0,25)} = 0,12$$

$$\psi = \beta \left[ \frac{\frac{2}{1 + 2\alpha} + \beta - 6 \frac{0,188\alpha}{(1 + \alpha)(1 + \frac{\alpha}{2})}}{(1 - \beta)^2} \right] = 0,1935$$

$$\frac{b}{h} = 2 \frac{Hl}{Nh^2} \frac{\psi}{(1 + \psi\theta)C_{D_0}} = 2 \frac{1800\text{mm}2400\text{mm}}{4 \cdot 1334^2 \text{mm}^2} \frac{0,1935}{(1 + 0,1935 \cdot 1,7)1,45} = 0,12$$

En estas expresiones los valores introducidos de  $\theta$  y  $C_{D_0}$  son válidos dentro de un rango de  $0,05 \leq \frac{b}{h} \leq 0,2$  y una separación entre agujas igual a  $\frac{h}{2}$ . Esta última condición no se respetará estrictamente, pero el mismo Irwin (16) afirma “no parece ser necesario adherirse rigurosamente a esto en la práctica”.

Se tiene por lo tanto que el ancho de la base de las agujas es:

$$b = 0,12 h = 160 \text{ mm}$$

Se tenía que el espesor de la capa límite a  $6h$  sería de  $\delta_{6h} = 1080$  mm. De (16), para obtener el espesor en la segunda mesa de ensayo  $\delta_{MII}$ , se calculó el crecimiento de la capa límite:

$$\Delta\delta = 0,068 \alpha \left( \frac{1 + 2\alpha}{1 + \alpha} \right) \Delta x = 0,068 \cdot 0,25 \left( \frac{1 + 2 \cdot 0,25}{1 + 0,25} \right) 10996\text{mm} = 224 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$\delta_{\text{MII}} = \delta_{6h} + \Delta\delta = 1304 \text{ mm}$$

#### 2.4.2. Para simulación de espesor parcial

Para el dimensionamiento de las agujas de espesor parcial se usó el mismo procedimiento que para la simulación de espesor total. Cabe advertir que el procedimiento de Irwin es para diseñar simulaciones de este último tipo. Lo que se hizo por lo tanto fue diseñar una simulación de espesor total de características tales que el factor de escala geométrico fuera alrededor de 150. Como tal capa límite y sus correspondientes agujas no entrarían en la cámara de ensayos por exeder sus dimensiones a las de la misma, se truncaron las agujas a una altura de 1400 mm<sup>1</sup>. Por lo tanto cada aguja consiste en una placa trapezoidal que presenta una cara al flujo, con otra de refuerzo adherida en la cara a sotavento, tal como se puede observar en las **figuras 2 y 4**.

Se comenzó a partir de que si  $Z_g$  era 420m y el factor de escala geométrico 150 se debía buscar generar una capa límite de espesor virtual<sup>2</sup>

$$\delta'_{6h} = 2800\text{mm}$$

Para ello la altura virtual de las agujas debía ser

$$h' = \frac{1,39\delta'}{1 + \frac{\alpha}{2}} = \frac{1,39 \cdot 2800\text{mm}}{1 + \frac{0,25}{2}} = 3459\text{mm}$$

Esto arroja un valor de  $6h' = 20754\text{mm}$

En el método tal como fué concebido originalmente (para simulación de espesor total), era importante tener una longitud de rugosidad de  $6h$  a sotavento de las agujas para asegurar una condición cercana al equilibrio, y se tenía entonces que  $6h'$  era mayor que la máxima longitud de rugosidad disponible, que era  $\ell = 17100\text{mm}$

Ahora bien, dado que se ignoraba si seguía siendo conveniente que  $6h'$  fuera mayor que  $\ell$  (puesto que  $h'$  es una altura virtual; cada aguja está truncada a 1400mm) se optó por aumentar el

<sup>1</sup> Esta dimensión es igual al alto de la cámara de ensayos menos el espesor de la capa límite natural del techo. Es de hacer notar que ensayos preliminares mostraron que la utilización de agujas de igual altura que la cámara de ensayos, provoca no sólo un crecimiento abrupto de la capa límite desarrollada sobre la rugosidad, sino también un crecimiento de la capa límite del techo, limitando así el crecimiento de la primera.

<sup>2</sup> Se denominarán virtuales y se las distinguirá con un apóstrofe, a aquellas magnitudes que aparezcan en este procedimiento que no tengan existencia real por exeder la altura de la cámara de ensayos.



factor de escala geométrico a fin de llevar a  $6h'$  a un valor cercano a  $\ell$ , por ello se apuntó a generar una capa límite de espesor virtual  $\delta'_{6h'} = 2300\text{mm}$

Se tuvo entonces que:

$$h' = \frac{1,39\delta'}{1 + \frac{\alpha}{2}} = \frac{1,39 \times 2300\text{mm}}{1 + \frac{0,25}{2}} = 2842\text{mm}$$

Con lo que  $6h'$  quedó en 17052mm; valor que era compatible con los 17100mm de rugosidad disponibles.

Se adoptó una separación entre agujas de 1200 mm, que es el valor mas cercano al de  $\frac{h'}{2}$ . Se usaron por lo tanto 2 agujas, quedando situadas a 600 mm de las paredes.

Luego se calculó la relación  $\frac{b}{h'}$  mediante las expresiones [15] y [19] de (10). En ellas se tomó como valor de altura virtual de la cámara de ensayos el mismo que el de  $h'$ .

$$\beta = \frac{\delta'}{H'} \frac{\alpha}{1 + \alpha} = \frac{2300\text{mm}}{2842\text{mm}} \frac{0,25}{(1 + 0,25)} = 0,1619$$

$$\psi = \beta \frac{\left[ \frac{2}{1 + 2\alpha} + \beta - 6 \frac{0,188\alpha}{(1 + \alpha)(1 + \frac{\alpha}{2})} \right]}{(1 - \beta)^2} = 0,2984$$

$$\frac{b}{h'} = 2 \frac{H' l}{N h'^2} \frac{\psi}{(1 + \psi\theta)C_{Do}} = 2 \frac{2842\text{mm} \cdot 2400\text{mm}}{2 \cdot 2842^2 \text{mm}^2} \frac{0,2984}{(1 + 0,2984 \cdot 1,7)1,45} = 0,1153$$

Se tuvo por lo tanto como ancho de base de las agujas:

$$b = 0,1153 \cdot 2842\text{mm} = 328 \text{ mm}$$

Luego por simples cálculos trigonométricos se determinaron el resto de las dimensiones que pueden observarse en la **figura 2**.

## 2.5. Diseño de la rugosidad

### 2.5.1. Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de la rugosidad se partió de expresiones que Counihan (14) determinó experimentalmente. Una vez definida la geometría de la rugosidad, se verificó que las distintas variables en juego guardaran coherencia con el modelo teórico de Gartshore y De Croos (17)(18) y con las relaciones empíricas de Fang y Sill(19).

Se partió por lo tanto de la expresión (14):

$$\frac{z_0}{k} \cong 1,08 \frac{A_R}{A} - 0,08 \quad [1]$$

La cual es válida para condiciones de equilibrio en situaciones de flujo controlado (en un túnel de viento), donde  $k$  y  $A_R$  son incógnitas.

Se decidió además mantener constante la relación entre el parámetro altura de rugosidad y la altura media de la rugosidad en atmósfera y el túnel.

$$\frac{z_0}{k} = \frac{Z_0}{K} = \frac{700\text{mm}}{10000\text{mm}} = 0,07 \quad [2]$$

Despejando de [1] el valor de  $\frac{A_R}{A}$ , se obtiene para el mismo un valor 0,14.

Para determinar la altura de los elementos rugosos se estimó un factor de escala geométrico dado por la siguiente relación:

$$\frac{\delta}{Z_g} = \frac{1,3\text{m}}{600\text{m}} \cong \frac{1}{460} \quad [3]$$

Con este factor de escala, se estima  $z_0$

$$\frac{Z_g}{460} = z_0 = 1,52\text{mm}$$

Retomando la [2]

$$\frac{z_0}{k} = 0,07 \quad \Rightarrow \quad k \cong 22\text{mm}$$

Se adoptó como elemento rugoso prismas de base cuadrada de 30 mm de lado y altura 22 mm, distribuidos al tresbolillo.

En función de tener una separación cercana a 4 veces  $k$  y que a su vez sea un divisor de 2,4 m, que es el ancho de la cámara de ensayos, se adoptó una separación transversal y longitudinal entre centros de 80 mm, tal como puede apreciarse en las **figuras 5 y 6**.

Se tuvo así que  $\frac{A_R}{A} \cong 0,13$ , el cual es un valor próximo al requerido por la ecuación [1].

### 2.5.2. Verificación por el método de Gartshore y De Croos

a) Gráficamente.

Entrando en la fig. 2 de (16) con los valores de

$$\frac{\delta}{k} = \frac{1300\text{mm}}{22\text{mm}} = 59,09$$

y de

$$\frac{\lambda_e}{k} = \frac{(C_D)_b}{(C_D)_R} \times \frac{A_p}{A_F} = \frac{1,2}{0,9} \times \frac{6400\text{mm}^2}{660\text{mm}^2} = 12,93$$

se obtiene un  $\alpha = 0,26$ , el cual se encuentra dentro del rango de aceptación. Los valores de  $(C_D)_b$  y  $(C_D)_R$  se obtuvieron de la de Figura 5 de (20).

b) Analíticamente.

De (18)

$$\left[ \frac{u_*}{\bar{U}_1} \right]^2 = \frac{F_1(G)}{G_1} = \frac{0,156}{5,86} = 0,00266 \quad [4]$$

siendo

$$G = 2\alpha + 1$$

$$G_1 = 3,3 + \exp[0,4667 - 2,722 \ln(G - 0,6798)]$$

$$F_1(G) = \exp[-3,512 - 0,617 \ln(G_1 - 3)]$$

Tomando la expresión [1] de (18) y reemplazando en el segundo miembro el valor de  $\frac{\bar{U}_1}{u_*} =$

19,49 obtenido a partir de la relación [4]

$$\frac{\bar{U}_1}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \times \ln \left[ \frac{\bar{U}_1 \delta^*}{u_* k} \right] + D - C$$

donde

D = una constante igual a 4,8

y

$$C = -5,95 \left[ 0,48 \ln \frac{\lambda_e}{k} - 1 \right]$$

se tiene un valor de 19,39 para el primer miembro, aceptándose que siendo un valor muy próximo al introducido, la rugosidad adoptada es adecuada.

### 2.5.3. Verificación por el método de Fang y Sill

Para una primera verificación se utilizó el gráfico 2 de (19) entrando en abscisas con el valor de

$$k_{\text{eff}} = \left( \frac{A_s}{S} \right) \cdot k = 1,22 \text{ cm}$$

y en ordenadas con el valor de  $z_0 = 0,15 \text{ cm}$ , obteniéndose puntos coherentes con los correspondientes a otras simulaciones.

Para una segunda verificación por el mismo método, se ingresa al gráfico 3 de (19) con el valor de ordenada de

$$k_{\text{eff}} = 10 \cdot \left( \frac{A_F}{S} \right) \cdot \left( \frac{A_F}{A_w} \right) \cdot k = 2,26 \text{ cm}$$

y en abscisas con el valor de  $z_0 = 0,15 \text{ cm}$ , obteniéndose también puntos coherentes con los correspondientes a otras simulaciones.

## 2.6. Técnica operativa

### 2.6.1 Velocidades medias

Las velocidades medias se determinaron a partir de mediciones de presión dinámica media hechas con dos tubos de Pitot-Prandtl y un micromanómetro tipo Betz de 1 Pa de apreciación. Dada la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia (pulsaciones), cada  $\bar{q}$  fue tomada como el valor medio de 13 lecturas hechas con una frecuencia de muestreo de 0,1 Hz. Es decir:

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad \text{con } n = 13$$

El posicionamiento de los tubos se hizo por medio de un dispositivo llamado ala II (**figura 8**). El ala II es una carcasa de resina epoxi con perfil aerodinámico que oculta un mecanismo accionado por un motor paso a paso. Este mecanismo puede mover en altura dos brazos a los que se sujetan los tubos. El motor es comandado desde el exterior por un programador lógico computarizado.

Además, otras magnitudes complementarias necesarias para el posterior procesamiento de datos fueron medidas: presión atmosférica, temperatura y diferencia de presión entre anillos

piezométricos. Para ello se utilizó respectivamente un termómetro de 1 grado celcius de apreciación, un barómetro de  $\frac{1}{2}$  mm de columna de mercurio de apreciación, y un transductor de presión de  $\frac{1}{2}$  Pa de apreciación.

A su vez, tres grupos de experimentos complementarios fueron realizados antes que los experimentos principales: calibración de tubos de Pitot-Prandtl, verificación del gradiente longitudinal de presión, y relación entre  $\Delta p_{AN}$  y  $\bar{q}_{ref}$ . En el primero de ellos se estableció la función de corrección (función de  $\bar{q}$ ) para el tubo superior, tomando como referencia al tubo inferior, para que las lecturas hechas con uno y otro fueran equivalentes; esto se debió hacer toda vez que se cambió el punto de agarre del tubo superior, puesto que el punto de agarre puede modificar la lectura hasta en 10 Pa. El segundo grupo de experimentos consistió en verificar que la presión estática a lo largo de la cámara de ensayos no estuviera en un rango de variación mayor al 5% de  $\bar{q}_{ref}$  hasta por lo menos 4,2 m a barlovento de la sección en estudio, y de 1,25% hasta 2,6 m, a fin de asegurar una condición cercana a la ideal de gradiente longitudinal de presión nulo. El último grupo de experimentos se hizo para establecer la función  $\bar{q}_{ref}(\Delta p_{AN})$ . Las  $\bar{q}_{ref}$  se tomaron siempre a una altura de 1314 mm en las posiciones centrales de cada simulación, lo que aseguró en todos los casos un valor de  $\bar{U}_{ref}$  muy cercana a la velocidad media en la altura gradiente.

En el procesamiento de datos todo el trabajo de cálculo se realizó con un programa de planilla de cálculo Quattro Pro para Windows 5.0 de Borland, y los gráficos y ajustes de funciones teóricas a datos experimentales se hicieron con un programa graficador de uso científico Microcal Origin 2.8. La secuencia de procesamiento seguida fué la siguiente:

a) Cálculo de  $\bar{U}$  en cada punto:

Se hizo por medio de la expresión (21)

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{2\bar{q}}{\rho}}$$

donde  $\bar{q}$  es introducido en  $\frac{m}{s}$  y  $\rho$  en  $\frac{Kg}{m^3}$

A su vez  $\rho$  es obtenido de la ecuación de estado del aire (22)

$$\rho = \frac{P_{atm}}{T \cdot R'}$$

donde la constante particular del aire es  $R' = 4,6447 \frac{\text{mm.Hg} \cdot \text{m}^3}{\text{Kg} \cdot ^\circ \text{K}}$ , la  $p_{\text{atm}}$  es introducida en mm de mercurio y la temperatura T en grados Kelvin.

b)Determinación de  $\delta$

Se graficó  $\bar{U}$  vs.  $z$  con el eje de las  $z$  en escala logarítmica, y se consideró a los puntos superiores que se apartaban claramente del comportamiento lineal como no pertenecientes a la capa límite.

c)Determinación de  $\alpha$

Se graficó  $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{ref}}}$  vs  $\frac{z}{\delta}$  y se ajustó a estos puntos la función

$$P_1 \left( \frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad [5]$$

siendo  $\alpha$  y  $P_1$  parámetros desconocidos.  $P_1$  en este caso es un factor que al multiplicarlo por  $\bar{U}_{\text{ref}}$  da el valor a la altura gradiente de  $\bar{U}$  correspondiente a la función que resulta del ajuste.

d)Determinación de  $\rho_{\text{exp-teo}}$  (coeficiente de correlación lineal entre valores experimentales y teóricos)

Se calculó a partir de la expresión de Pearson (23)

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)Sx_{n-1}Sy_{n-1}} \quad [6]$$

haciendo

$$x_i = P_1 \left( \frac{z_i}{\delta} \right)^\alpha \quad ; \quad y_i = \bar{U}_i \quad ; \quad R = \rho_{\text{exp-teo}}$$

y siendo

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad ; \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad ; \quad Sx_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad ; \quad Sy_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

e)Determinación de  $\rho_{\text{cen-lat}}$  (coeficiente de correlación lineal entre valores experimentales centrales y laterales)

Se calculó con la expresión [6] haciendo:

$x_i = \bar{U}$  en posición central a una altura  $z_i$

$y_i = \bar{U}$  en una posición lateral a una altura  $z_i$

#### f) Determinación de parámetros de la ley de pared

Estos parámetros se determinaron al solo efecto de ser utilizados en la determinación del factor de escala geométrico, puesto que en este trabajo siempre se describirá al tipo de terreno por el parámetro  $\alpha$  (ver apéndice A: La ley potencial de velocidades medias).

El procedimiento que a continuación se describe presenta una dispersión tolerable para la determinación del factor de escala; pero sólo para ello.

f-1) Se dibujó en un gráfico  $\bar{U}$  vs  $z$  los puntos por debajo de una altura  $0,1\delta$  con  $z$  en escala logarítmica, y se verificó que estuvieran situados sobre una recta.

f-2) Se calculó para estos puntos el valor de la velocidad de corte utilizando un procedimiento ya usado por Blessmann(24) que parte de aceptar a priori que se cumple la ley de déficit de velocidad de Kármán, y que por lo tanto la velocidad de corte puede ser obtenida de :

$$u_* = \frac{\bar{U}(\delta) - \bar{U}(z)}{-5,6 \cdot \log\left(\frac{z}{\delta}\right) + 2,5}$$

Como el valor de  $u_*$  variaba con  $z$ , se tomó como velocidad de corte al valor medio de los valores obtenidos.

f-3) Se ajustó a los puntos la función:

$$\bar{U} = 0,4 u_* \ln \left( \frac{z - d}{z_0} \right)$$

con  $z_0$  y  $d$  como parámetros desconocidos

### 2.6.2 Componentes fluctuantes

Las mediciones se hicieron con un sistema de anemometría de hilo caliente Dantec 56C de un canal, constituido por una unidad central de medición , un puente de Wheatstone, linealizador, acondicionador de señal, voltímetro de valor medio, voltímetro de valor RMS y sondas de hilo recto tipo miniatura. Para la adquisición de datos se usó una plaqueta conversora analógica-digital de 16 canales simples de entradas analógicas, Keithley DAS-1600, de 100000 muestras/segundo instalada en un computador personal con un microprocesador 486DX4-S de 100 Mhz y 8 Mb de memoria RAM.

Al igual que durante las mediciones de velocidades medias se tomó también la temperatura, presión atmosférica y diferencia de presión entre anillos piezométricos.

El posicionamiento de las sondas se hizo de la misma manera que con los tubos de Pitot-Prandtl.

La determinación de las intensidades de turbulencia se hizo a partir de las lecturas de los voltímetro de valores medios y RMS del anemómetro, ajustados para un tiempo de integración de 100 segundos.

Para obtener los espectros de potencia se partió de tomar en cada punto, 5 muestras de valores instantáneos de tensión con las características indicadas en la **Tabla 2.1**.

**Tabla 2.1**

Características de las muestras utilizadas para construir los espectros de potencia.

Serie	Utilización	Tamaño de la muestra[valores]	Frecuencia de muestreo [Hz]	Amplificación	Frec. de filtro pasa altos[Hz]	Frec. de filtro pasa bajos [Hz]
A	Determinación de $\bar{U}$ (sólo para el procedimiento de determinación de espectro)	5000	100	-	-	-
B	Determinación de $U_{RMS}$ (sólo para el procedimiento de determinación de espectro)	5000	100	20	0,3	100
C	Determinación de espectro en rango de baja frecuencia	32000	300	20	0,3	100
D	Determinación de espectro en rango de media frecuencia	32000	900	20	0,3	300
E	Determinación de espectro en rango de alta frecuencia	32000	3000	20	0,3	1000

Para el procesamiento de datos se utilizaron los mismos programas que para las velocidades medias, con el agregado del Microsoft FORTRAN Power Station 1.0. La secuencia de procesamiento seguida fue la siguiente:

a)Obtención del espectro de potencia

a-1)Con una subrutina en Fortran se dividió a cada uno de los valores de las series B, C, D, y E por 20 para anular la amplificación de la señal.

a-2)Obtención de las fluctuaciones de velocidad

Con una subrutina en Fortran se convirtió a los valores de las series B, C, D y E en fluctuaciones de velocidad. El algoritmo utilizado fue :

$$u' = \left\{ \frac{\left[ (\bar{e}_A + e)^2 - E_0^2 \right]}{B} \right\}^{\frac{1}{m}} - \bar{U}_A$$



donde

$e$  = cada uno de los valores de las series B, C, D y E

$\bar{e}_A$  = valor medio de los valores de la serie A

$$\bar{U}_A = \text{velocidad media obtenida a partir de la serie A} = \left[ \frac{(\bar{e}_A - E_0)^2}{B} \right]^{\frac{1}{m}}$$

$E_0$ ,  $B$ ,  $m$  = constantes de calibración de las sondas

#### a-3) Determinación de $U_{RMS}$

Con una subrutina en Fortran se calculó  $U_{RMS}$  a partir de la serie B aplicando

$$U_{RMS} = \frac{\sum (u'_B - \bar{U}_A)^2}{5000}$$

#### a-4) Generación de valores del espectro

Con una subrutina en Fortran de transformada rápida de Fourier se generaron pares de valores  $\Phi(f)$  vs  $f$  (densidad espectral vs frecuencia) a partir de los valores de velocidades instantáneas obtenidas de las series C, D y E.

#### a-5) Edición del espectro

Se editó en un gráfico  $\frac{\Phi(f) \cdot f}{U_{RMS}^2}$  vs  $\log f$  los valores de los tres espectros obtenidos para cada

punto y se verificó primero que no existiesen diferencias groseras entre uno y otro (lo que hubiera significado que se cometió un error durante la toma o durante el procesamiento de los datos). Luego se cortaron y empalmaron aproximadamente a 60 Hz, los espectros de baja y media frecuencia, y aproximadamente a 160 Hz los de media y alta frecuencia

#### b) Determinación de la macroescala

Se ajustó a los valores experimentales correspondientes al rango de frecuencias comprendidas entre aproximadamente 17 y 350 Hz (rango inercial) de cada espectro, la función correspondiente al espectro en la atmósfera según ESDU(25):

$$f \frac{\Phi(f) \cdot f}{U_{RMS}^2} = 4St_u \left[ 1 + 70.8St_u^2 \right]^{-\frac{5}{6}} \quad \text{donde} \quad St_u = f \frac{L_{x,u}(z)}{\bar{U}}$$

[7]

Dejando a  $L_{x,u}(z)$  como parámetro desconocido.

A partir de la lectura de  $\Delta p_{AN}$  se infirió la  $\bar{U}_{ref}$ , y con ésta y la expresión [4] se obtuvo el valor de  $\bar{U}$  utilizado en la [7].

c) Determinación del factor de escala

Se hizo según el procedimiento propuesto por Cook(11) utilizando la expresión

$$S = \frac{91,3(z-d)^{0,491}}{L_{x,u}(z)^{1,403} \cdot z_0^{0,088}}$$

d) Determinación de intensidades de turbulencia

Para cada punto se obtuvo primero el valor RMS de la componente fluctuante de la velocidad por medio de la expresión

$$U_{\text{RMSi}} = \left\{ \frac{(\bar{E}_i + E_{\text{RMSi}})^2 - E_0^2}{B} \right\}^{\frac{1}{m}} - \left[ \frac{(\bar{E}_i^2 - E_0^2)}{B} \right]^{\frac{1}{m}}$$

donde

$\bar{E}_i$  = lectura del voltímetro de valor medio del anemómetro de hilo caliente

$E_{\text{RMSi}}$  = lectura del voltímetro de valor RMS del anemómetro de hilo caliente

Luego, se calcularon las intensidades de turbulencia locales por medio de:

$$I_u(z_i) = \frac{U_{\text{RMSi}}}{\bar{U}(z_i)}$$

con

$$\bar{U}(z_i) = \left[ \frac{(\bar{E}_i^2 - E_0^2)}{B} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Para calcular las intensidades normalizadas se tomó como velocidad de referencia la correspondiente a 10 m de altura en terreno natural. Por ello, con el factor de escala predominante hasta la posición 5 (ver **Tabla 2.3**) se calculó la altura en el túnel, equivalente a 10 m ( $z_{10}$ ) en la atmósfera y se calculó la velocidad media equivalente a 10 m haciendo

$$\bar{U}_{10} = \left( \frac{z_{10}}{\delta} \right)^{\alpha} \cdot P_1 \cdot \bar{U}_{\text{ref}}$$

y finalmente se calculó cada valor de intensidad normalizada de turbulencia como:

$$I_{10i} = \frac{U_{\text{RMSi}}}{\bar{U}_{10}}$$

## 2.7 Experimentos

En ambas simulaciones las mediciones se centraron principalmente en la sección transversal situada sobre la mesa II, zona que es de particular interés puesto que es el lugar destinado para colocar los modelos de estructuras. Otro grupo de mediciones fue realizado 5 m a barlovento a fin de analizar el desarrollo de la capa límite en la dirección del flujo.

A su vez en la mesa II, las mediciones de velocidades medias se realizaron en el perfil vertical central; y como para ambas simulaciones esta posición esta situada en correspondencia al medio del espacio que queda entre dos agujas, se hicieron mediciones en perfiles laterales tales que estuvieran detrás de las agujas. Esto significó que la separación entre perfiles fuera de 30 cm en la simulación de espesor total y 60 cm en la de espesor parcial. Mediciones semejantes se realizaron a barlovento, pero eliminándose una posición lateral. Por cada ensayo de velocidades medias se midieron alrededor de 30 puntos distribuidos en altura. Se densificaron las mediciones en la parte mas baja a fin de poder contar con suficiente información para analizar el comportamiento de la capa de pared, y se densificaron en la parte mas alta para determinar con buena aproximación el espesor de capa límite.

En cuanto a las mediciones de velocidades instantáneas, debido a su mayor complejidad, éstas se efectuaron sólo en las posiciones centrales ; determinándose intensidad de turbulencia en ocho posiciones distribuidas en altura y espectros en cuatro (ver **tabla 2.3**).

En las **figuras 2 , 5 , 7 y 8** se detallan las dimensiones y disposición de los conjuntos de simuladores usados.

En la nomenclatura utilizada, la primera letra identifica el tipo de simulación; la letra T indica que se trata de una simulación de espesor total, y la letra P que se trata de una simulación de espesor parcial. A continuación, el número que le sigue identifica la longitud de rugosidad utilizada; es decir, el número 17 indica que se utilizó 17,1 m de rugosidad, o lo que es equivalente, que son mediciones sobre la mesa II; el número 12 indica que se utilizó 12,1 m de rugosidad, lo que equivale a decir que son mediciones hechas 5 m a barlovento de la mesa II. Los últimos números indican si se trata de una posición central o lateral.

**Tabla 2.2**

Resumen de las características, magnitudes medidas y magnitudes determinadas de los experimentos.

	T17-0	T17-30	T17_-30	T12-0	T12-30	P17-0	P17-60	P17_-60	P12-0	P12-60
Posición en la seccion para un	Central	Lateral de- recha a 30	Lateral iz- quierda a 30	Central	Lateral de- recha a 30	Central	Lateral de- recha a 60	Lateral iz- quierda a 60	Central	Lateral de- recha a 60

observador mirando a barlovento		cm.	cm.		cm.		cm.	cm		cm.
$\bar{U}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$\delta$	X			X		X			X	
$\alpha$	X			X		X			X	
$\rho_{\text{exp-teo}}$	X			X		X			X	
$\rho_{\text{cen-lat}}$		X	X		X		X	X		X
d, $z_0$ , $u_*$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Intensidad	X	X	X	X		X	X	X	X	
Espectro	X	X	X	X		X	X	X	X	
Macroescala	X	X	X	X		X	X	X	X	
Factor de Esc	X	X	X	X		X	X	X	X	

**Tabla 2.3**

Alturas donde se determinaron intensidades de turbulencia y espectros de potencia.

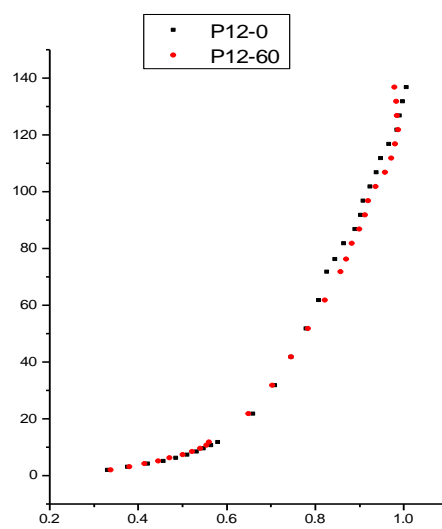
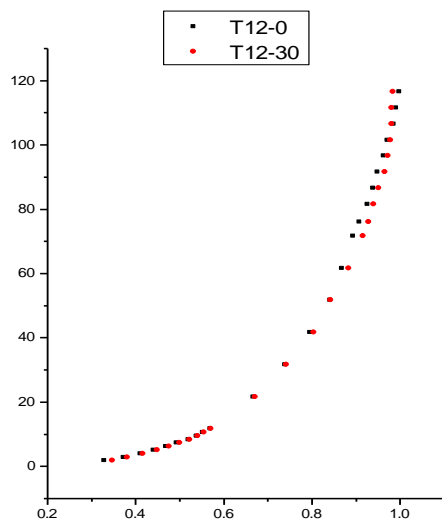
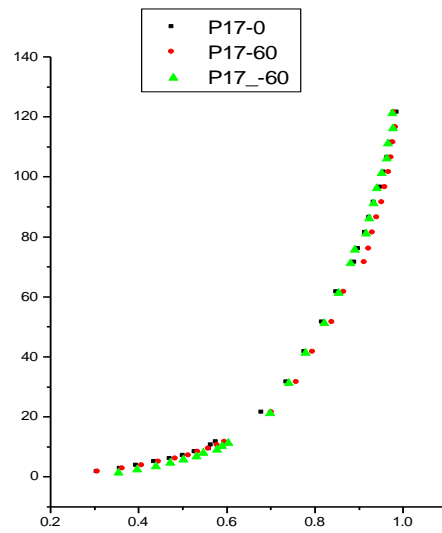
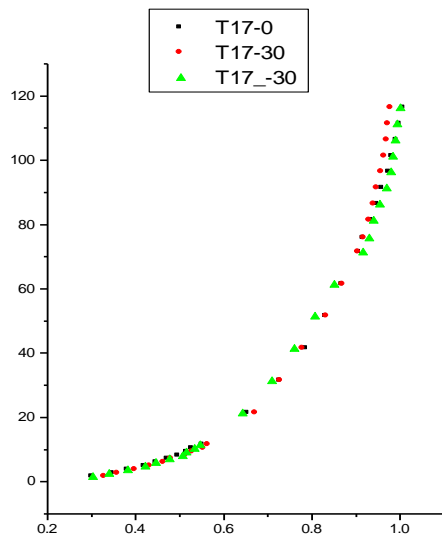
Punto	Espesor total		Espesor parcial	
	Inten. de Turbulencia	Espectro	Inten. de Turbulencia	Espectro
1	0.10 $\delta$		0.096 $\delta$	
2	0.20 $\delta$	0.20 $\delta$	0.192 $\delta$	0.192 $\delta$
3	0.33 $\delta$	0.33 $\delta$	0.317 $\delta$	0.317 $\delta$
4	0.44 $\delta$		0.422 $\delta$	
4'			0.479 $\delta$	
5	0.50 $\delta$	0.50 $\delta$	0.659 $\delta$	0.659 $\delta$
5'	0.66 $\delta$			
7	0.83 $\delta$	0.83 $\delta$	0.796 $\delta$	0.796 $\delta$
8	1.00 $\delta$		$\delta$	

### 3. RESULTADOS

#### Velocidades medias

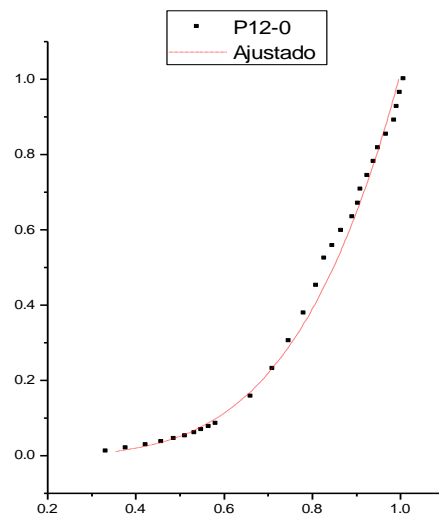
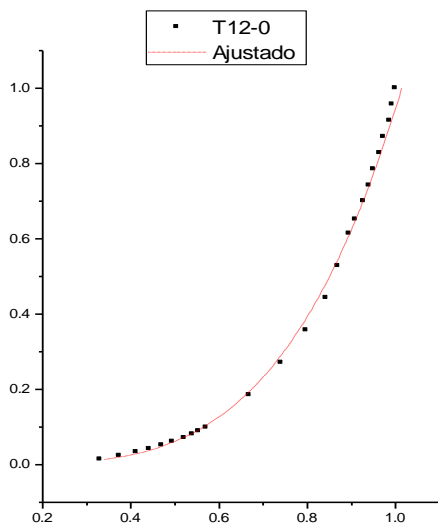
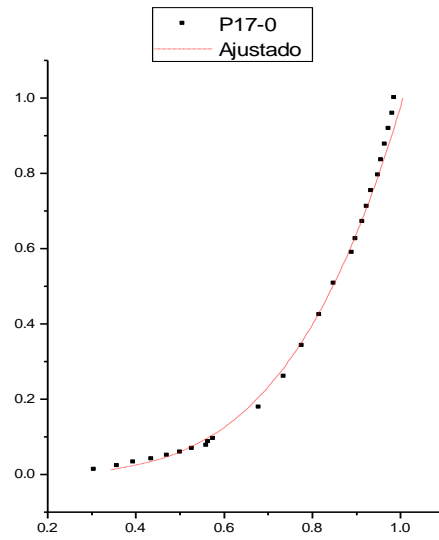
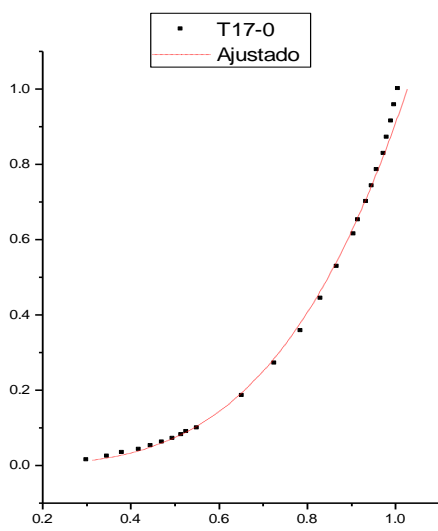
##### Grupo de gráficos 3.1

Se presentan los perfiles de velocidades medias correspondientes a posiciones centrales y laterales de cada simulación. En abscisas aparece  $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{ref}}}$  y en ordenadas la altura en cm.



### Grupo de gráficos 3.2

Se presentan los perfiles de velocidades medias en posiciones centrales y su correspondiente función potencial ajustada. En abscisas aparece  $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{ref}}}$  y en ordenadas la coordenada adimensional  $\frac{z}{\delta}$ .



**Tabla 3.1**

Características de los perfiles generados

Experimento	Espesor de capa límite generado ### [cm###]	Exponente ###	Coefficiente de correlación entre valores experimentales y ley potencial $\rho_{\text{exp-teo}}$
T17-0	116,4	0,277	0,99916
T12-0	116,4	0,254	0,99916
P17-0	121,4	0,249	0,99730
P12-0	136,4	0,232	0,99732

**Tabla 3.2**

Homogeneidad transversal. Se presentan los valores de  $\rho_{\text{cen-lat}}$  (coeficientes de correlación entre los valores experimentales centrales y laterales)

	T17-0	P17-0	T12-0	P12-0
T17-30	0,99946	-	-	-
T17_-30	0,99902	-	-	-
P17-60	-	0,99934	-	-
P17_-60	-	0,99934	-	-
T12-30	-	-	0,99929	-
P12-60	-	-	-	0,99769

**Tabla 3.3**

Parámetros de la ley de pared

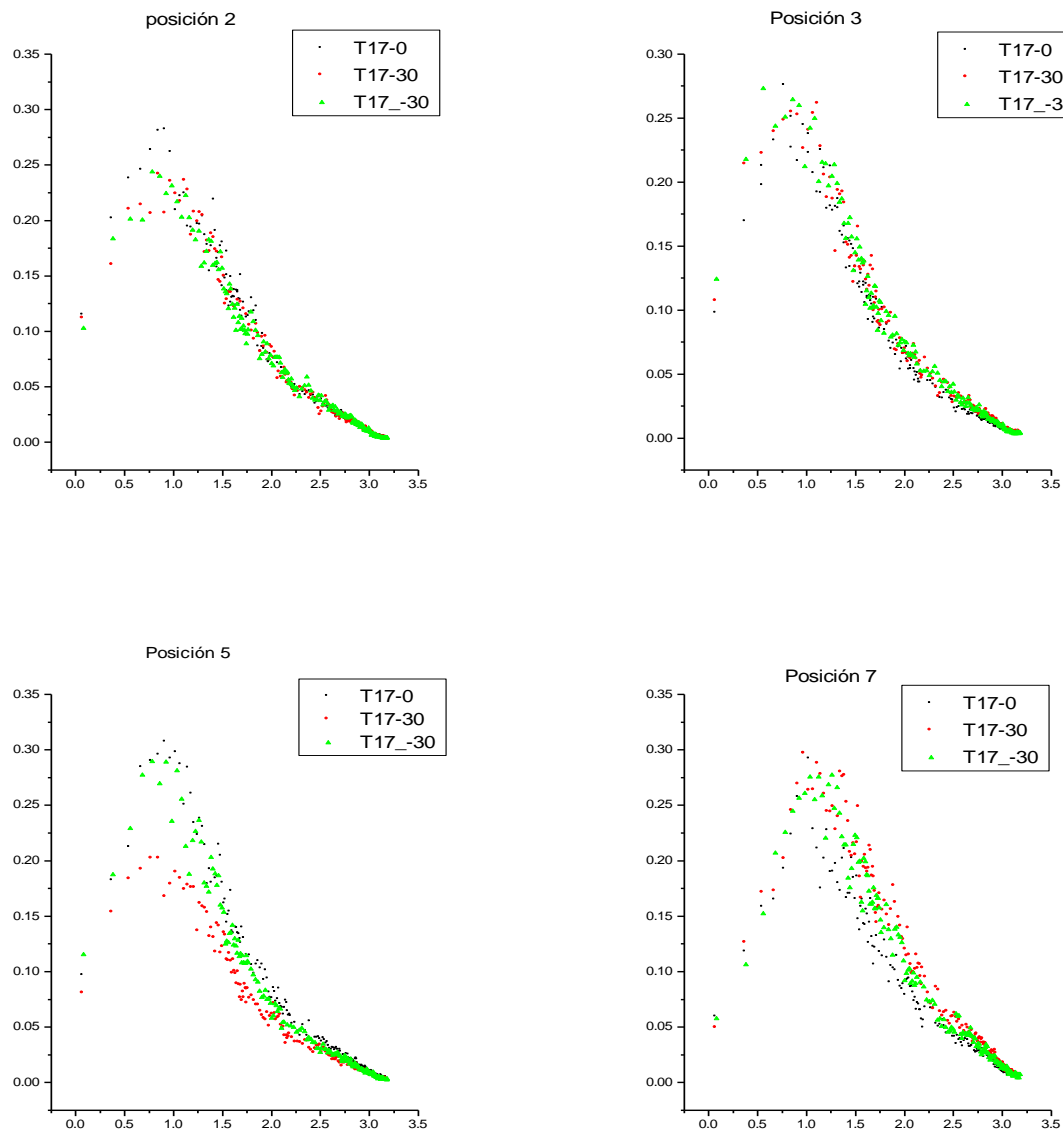
	T17-0	T17-30	T17_-30	T12-0	T12-30	P17-0	P17-60	P17_-60	P12-0	P12-60
d[mm]	5,7	6,3	7,1	7,6	2,2	15,2	16,2	8,6	6,6	2,5
$z_0$ [mm]	1,95	1,8	2	1,4	1,8	1,1	0,8	1,2	1,2	1,5
$u_*$ [m/s]	1,45	1,5	1,5	1,42	1,5	1,35	1,3	1,4	1,35	1,4



## Componentes fluctuantes

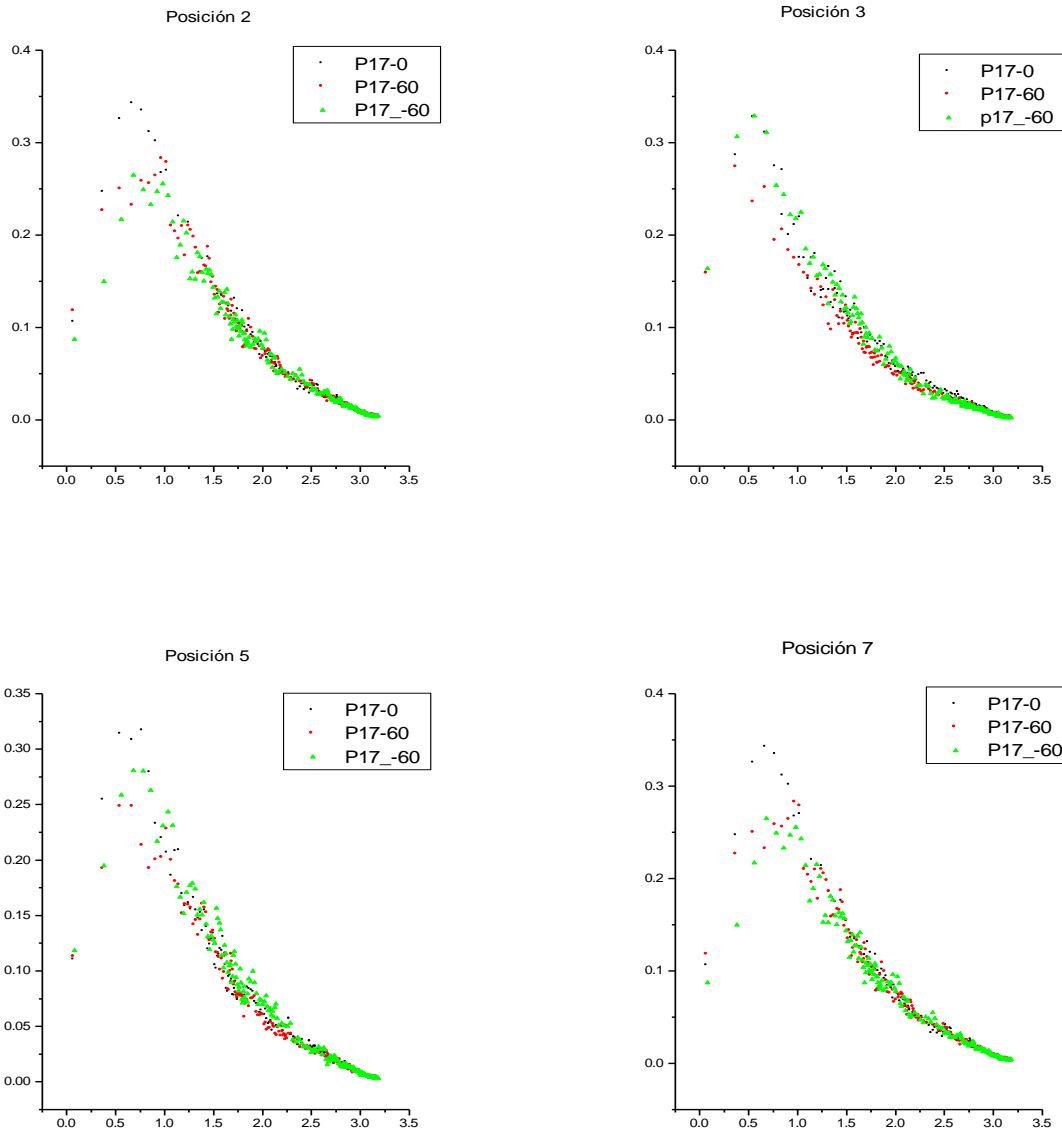
### Grupo de gráficos 3.3

En los siguientes gráficos se presentan superpuestos los espectros de potencia de la componente longitudinal de la turbulencia, en posiciones de igual altura, para las simulaciones T17 a fin de visualizar el grado de homogeneidad transversal. En ordenadas la densidad espectral está adimensionalizada con la velocidad media y la varianza. En abscisas aparece el logaritmo de la frecuencia en Hz.



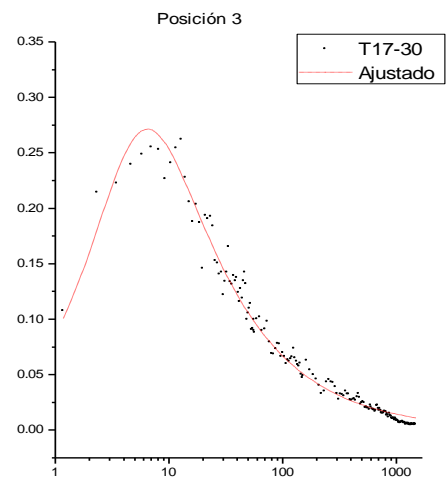
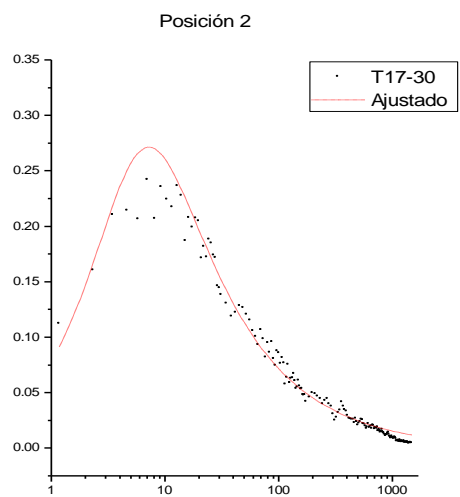
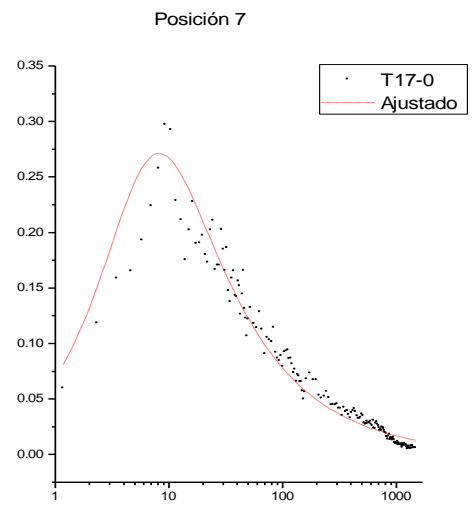
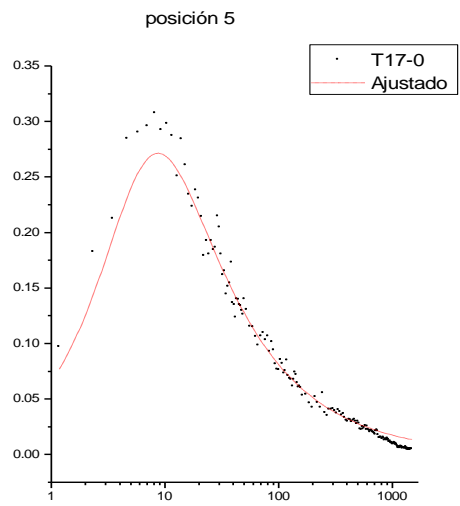
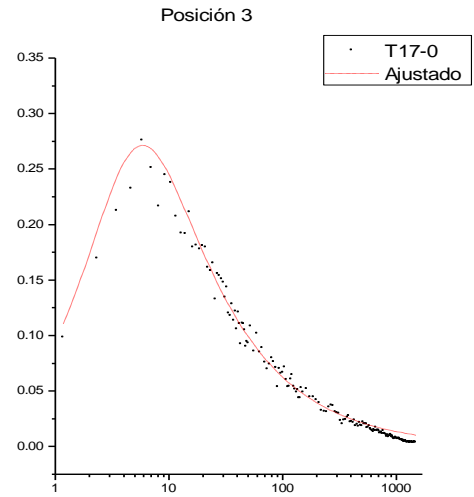
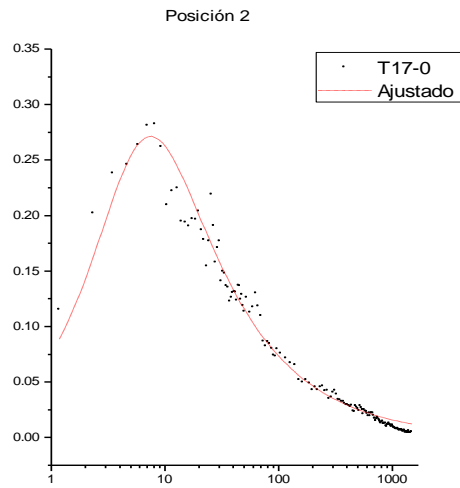
En los siguientes gráficos se presentan superpuestos los espectros de potencia de la componente longitudinal de la turbulencia, en posiciones de igual altura, para las simulaciones P17 a fin de visualizar el grado de homogeneidad transversal. En ordenadas la densidad espectral

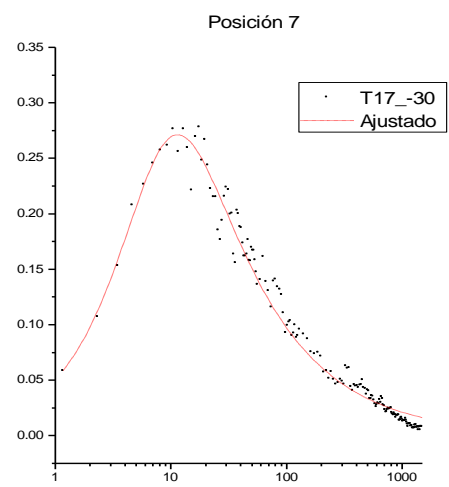
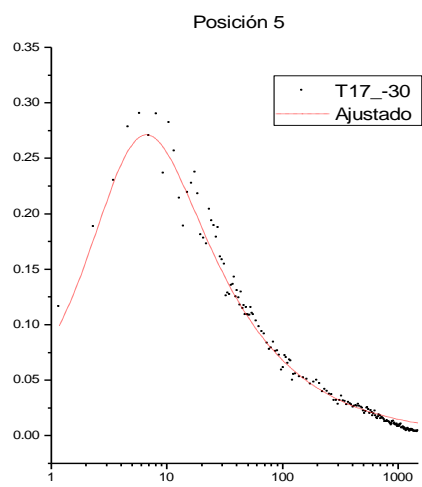
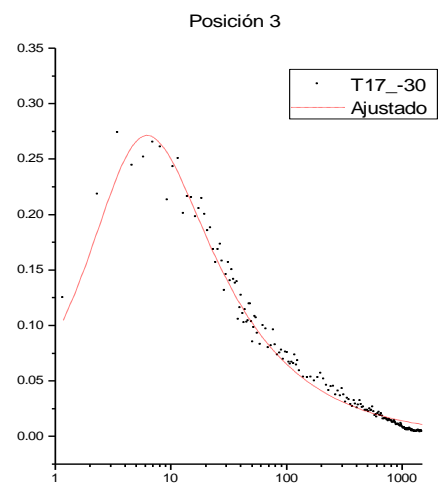
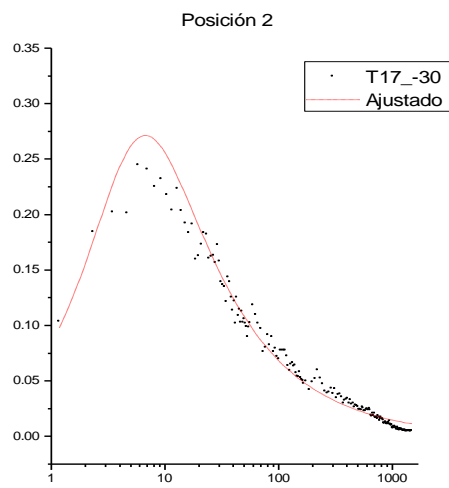
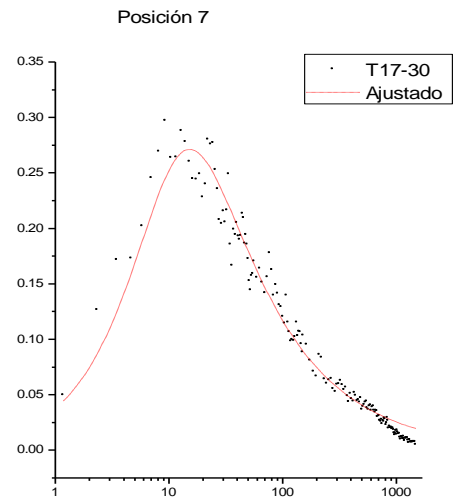
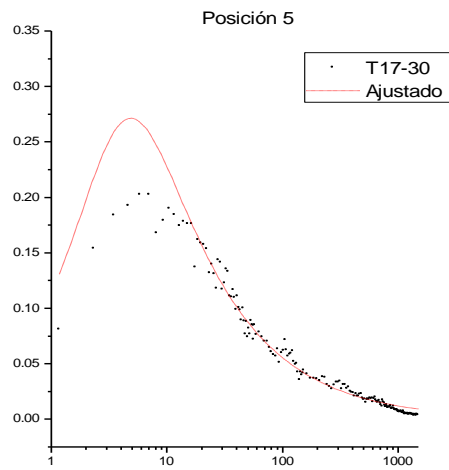
está adimensionalizada con la velocidad media y la varianza. En absisas aparece el logaritmo de la frecuencia en Hz.

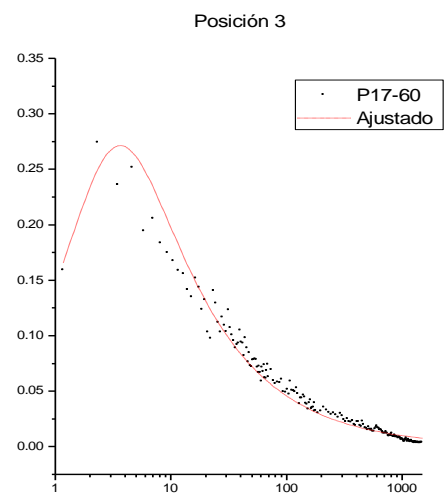
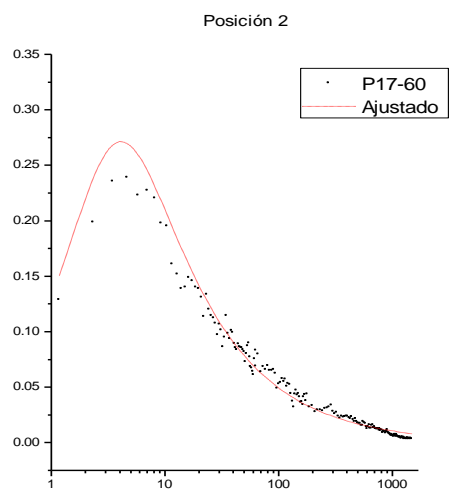
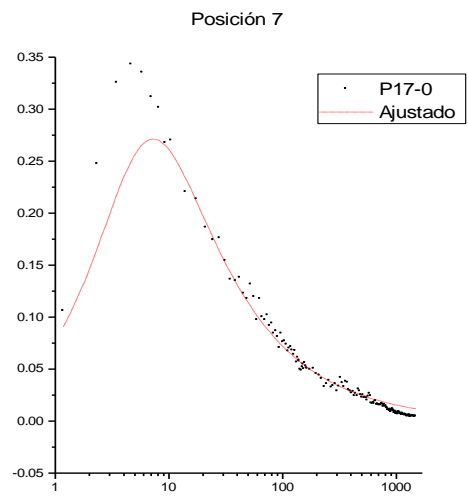
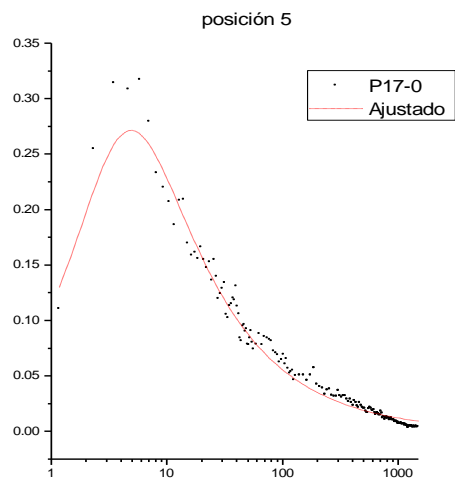
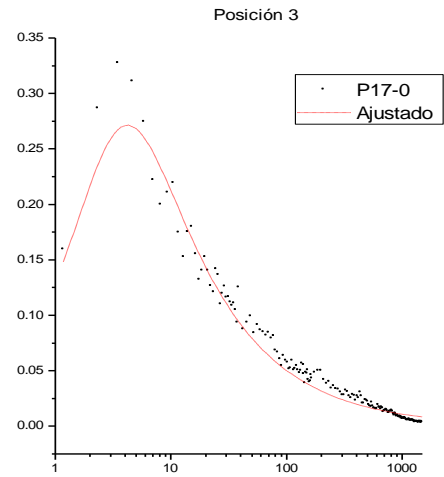
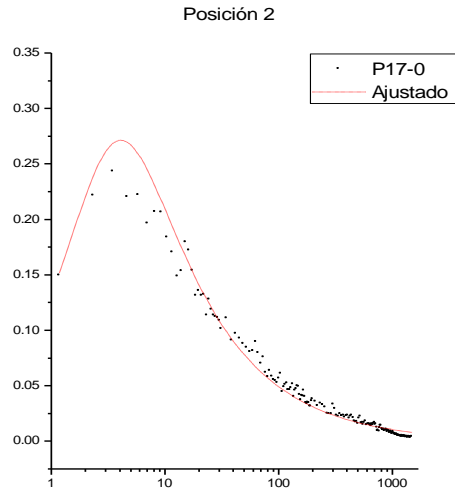


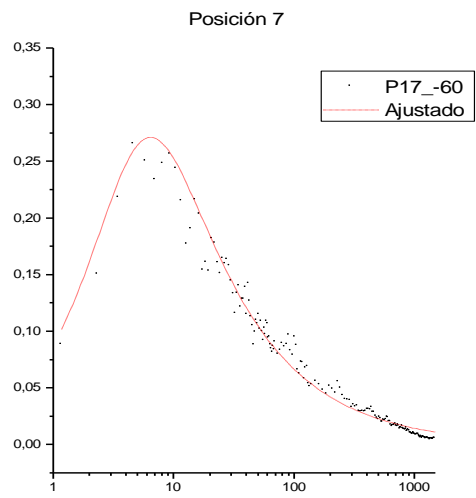
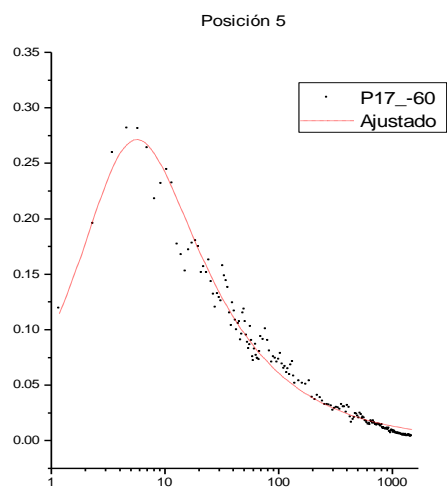
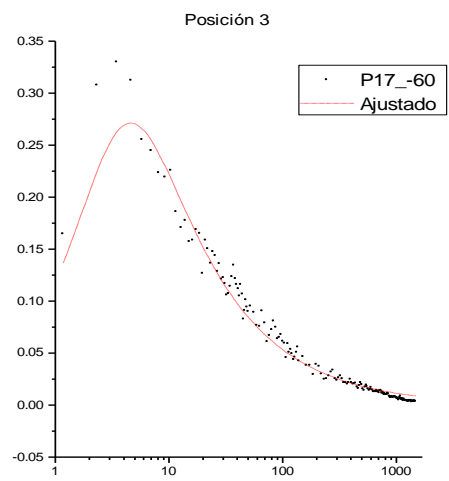
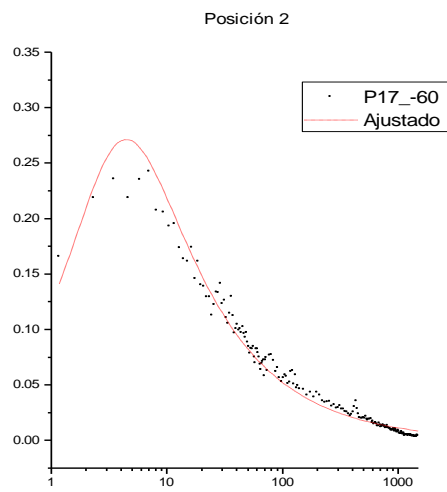
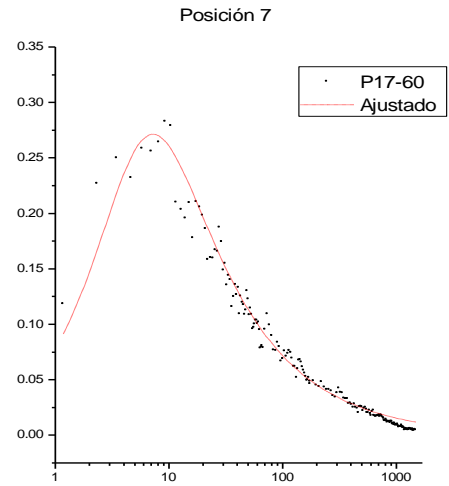
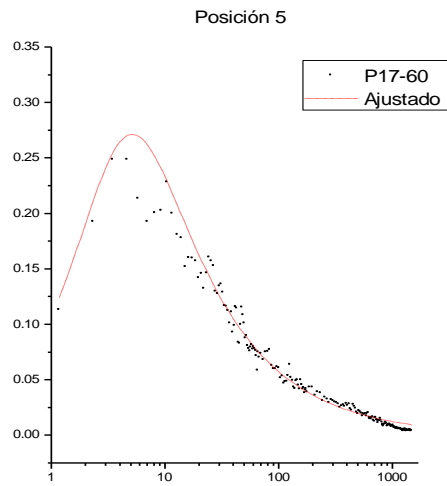
### Grupo de gráficos 3.4

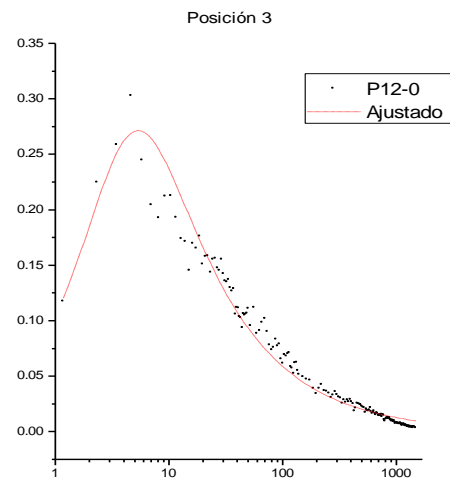
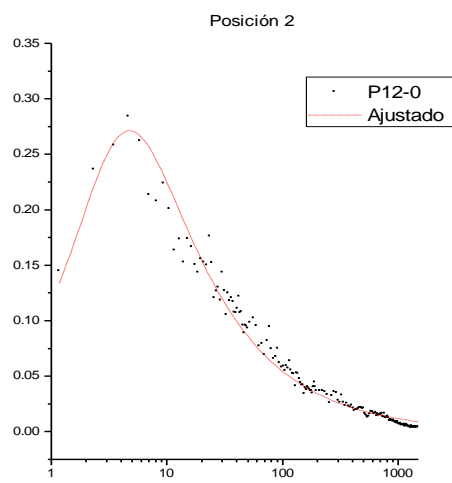
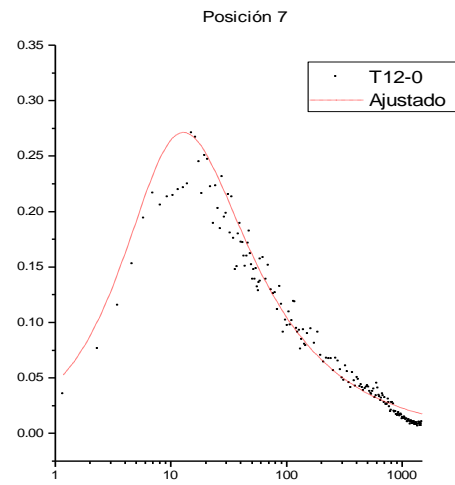
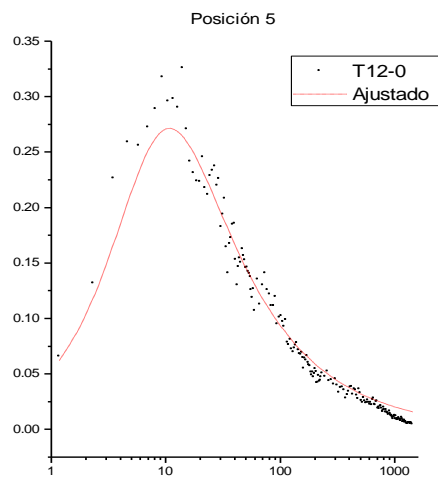
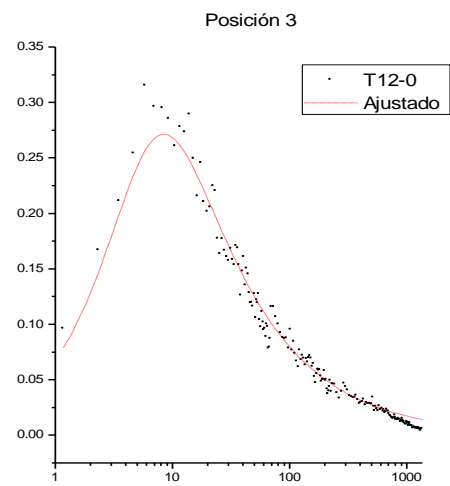
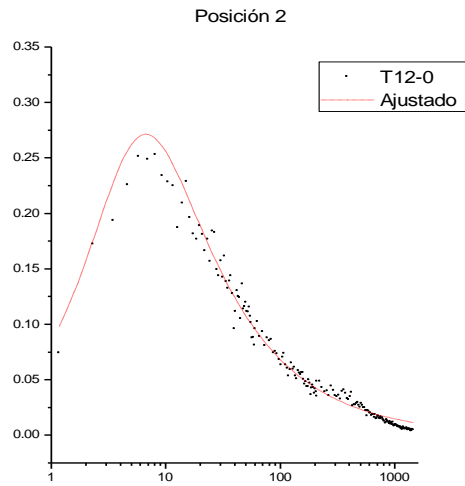
En los siguientes gráficos se presentan los espectros de potencia de la componente longitudinal de la turbulencia, y su correspondiente función teórica ajustada según el modelo de ESDU(23). En ordenadas la densidad espectral está adimensionalizada con la velocidad media y la varianza. En abscisas aparece la frecuencia en Hz.

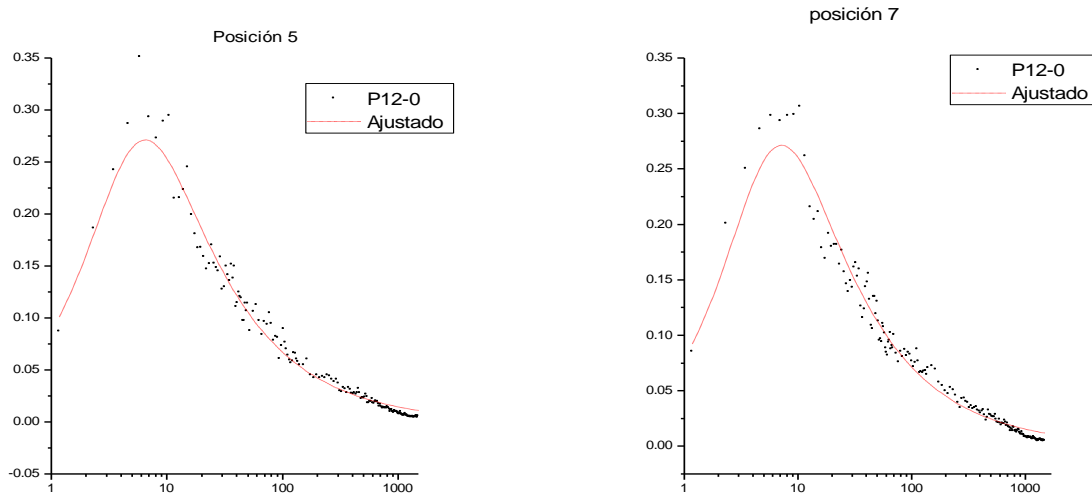










**Tabla 3.4**

Escalas integrales de la componente longitudinal de la turbulencia (macroescalas). Se presentan en mm.

	Posición 2	Posición 3	Posición 5	Posición 7
T17-0	350	516	391	474
T17-30	360	460	668	255
T17_-30	385	442	458	309
P17-0	626	672	721	473
P17-60	638	796	676	506
P17_-60	606	662	651	604
T12-0	393	356	298	300
P12-0	565	564	547	519

**Tabla 3.5**

Factores de escala geométricos del modelo

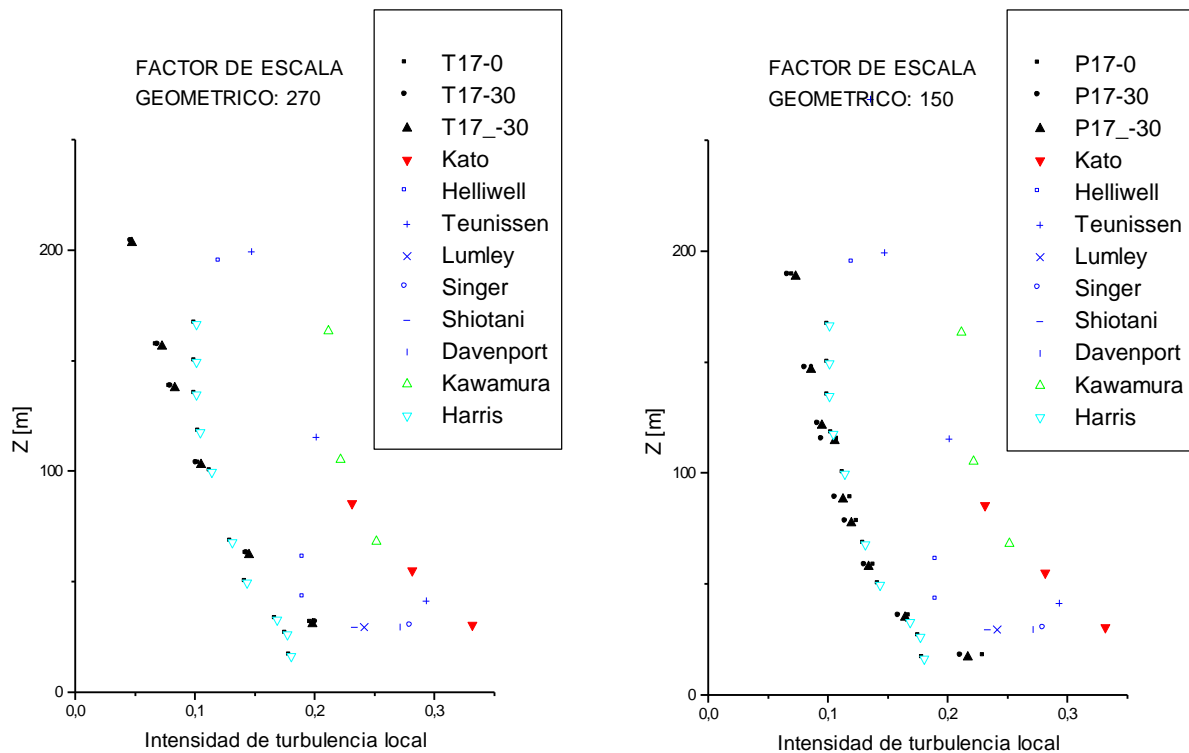
	Posición 2	Posición 3	Posición 5	Posición 7
T17-0	342	199	293	224
T17-30	329	233	138	534
T17_-30	300	245	235	408
P17-0	162	147	133	441
P17-60	158	116	146	219
P17_-60	170	150	154	171
T12-0	295	339	434	430
P12-0	180	177	185	199

**Grupo de gráficos 3.5**



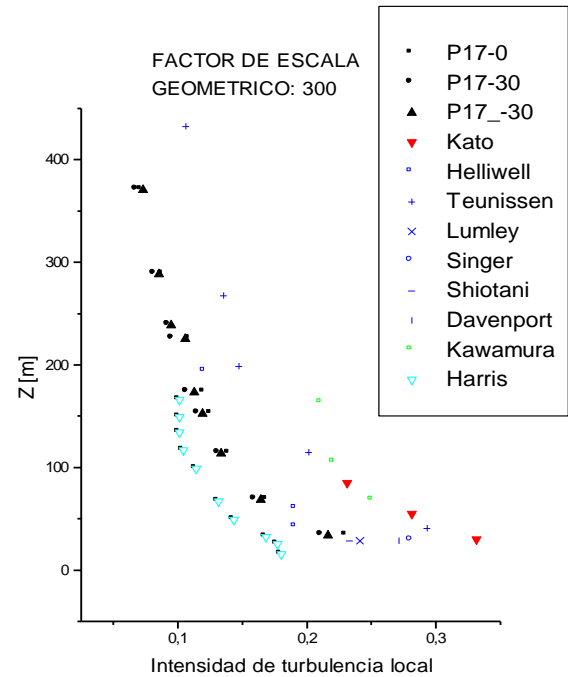
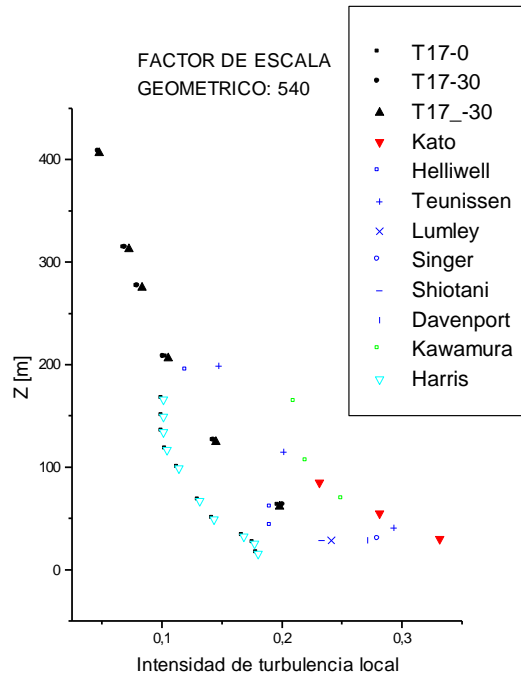
En los siguientes gráficos se presentan los valores de intensidad de turbulencia local de la componente longitudinal, obtenidos en ambas simulaciones junto a valores correspondientes a mediciones en terreno natural de tipo urbano, según Kato(26); de tipo suburbano según Helliwell(27), Teunissen(28), Lumley y Panofsky, Singer, Shiotani, Davenport e Isyumov(29); de tipo rural según Kawamura(30), de tipo de campo abierto según Harris(31)

En ordenadas a parece la altura en metros correspondiente al terreno natural. Para poder representar los valores de las simulaciones se utilizó un factor de escala geométrico acorde a los valores de la **tabla 3.5**.



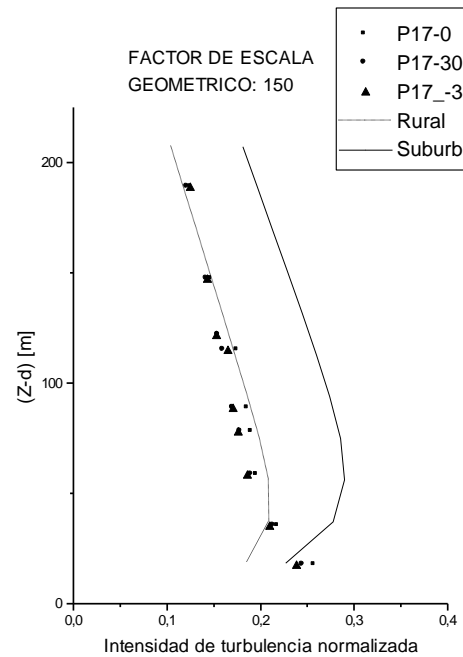
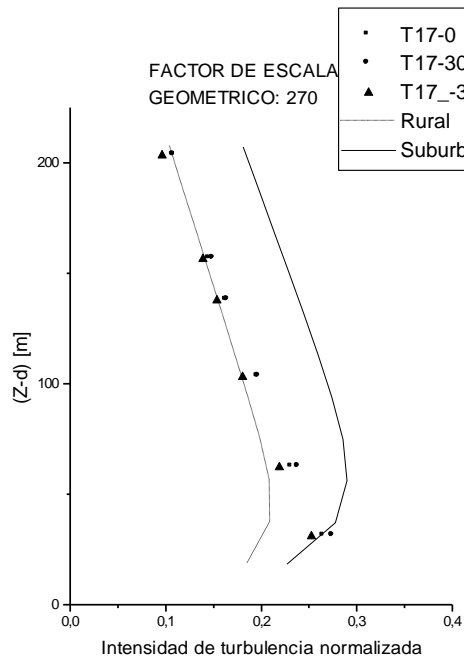
### Grupo de gráficos 3.6

En los siguientes gráficos se presentan los mismos resultados que en el **Grupo de gráficos 3.5** pero distorsionando los factores de escala geométricos al doble de los valores tomados anteriormente.



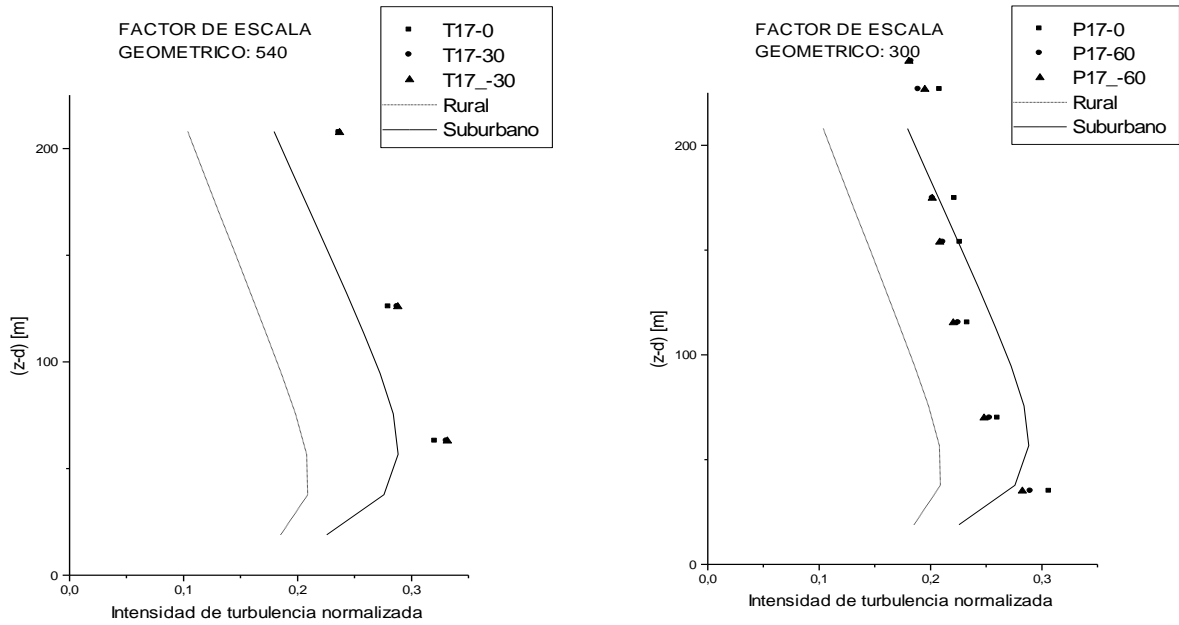
### Grupo de gráficos 3.7

En los siguientes gráficos se presentan los valores de intensidad de turbulencia normalizada (respecto de la velocidad a 10 m de altura) obtenidos en ambas simulaciones. En ordenadas aparece la altura en metros correspondiente al terreno natural descontado el desplazamiento del plano cero. También se grafican los perfiles correspondientes a un terreno rural y a uno suburbano conforme al modelo de Deaves y Harris(25)



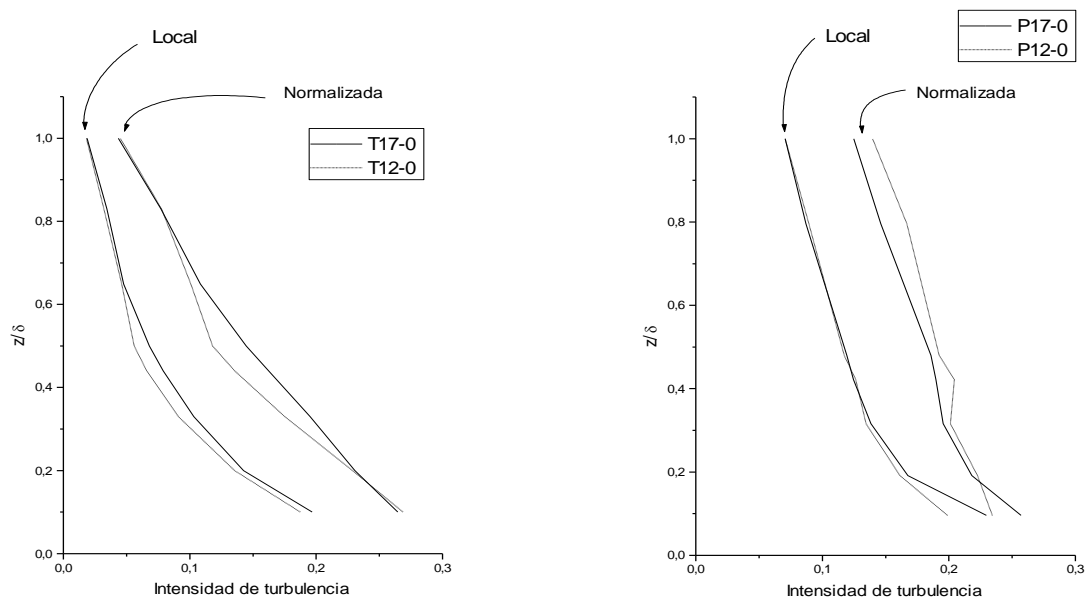
### Grupo de gráficos 3.8

En los siguientes gráficos se presentan los mismos resultados que en el **Grupo de gráficos 3.7** pero distorsionando los factores de escala geométricos al doble de los valores tomados anteriormente.



### Grupo de gráficos 3.9

En los siguientes gráficos se presentan los perfiles de intensidades de turbulencia local y normalizada de las posiciones centrales correspondientes a ambas simulaciones, sobre la mesa II y 5 metros a barlovento.





## 4. DISCUSION DE RESULTADOS

### 4.1 Consistencia de los resultados

a) Se nota una cierta irregularidad en la parte superior de los perfiles correspondientes a la simulación P12, que se manifiesta con mayor claridad en el gráfico P12-0 del **grupo de gráficos 3.2**. Esta irregularidad que está ausente en los otros perfiles llevó a repetir las mediciones de velocidades medias de P12 obteniéndose los mismos resultados. Se consideró por ello a esta irregularidad como un fenómeno observado y no como un error de la medición.

b) En el **grupo de gráficos 3.3** se observa que los espectros correspondientes a:

T17-30    Posición 5

T17-0     Posición 7

T17-60    Posición 3

se apartan respecto de los otros, hacia frecuencias mas bajas. Como consecuencia, las correspondientes macroescalas (resaltadas en rojo en la **tabla 3.4**) arrojan valores de un orden mayor que sus homólogos de posiciones laterales, y por lo tanto los factores de escala geométricos (resaltadas en rojo en la **tabla 3.5**), toman valores mas grandes que sus homólogos laterales.

Esto significa que se produjo algun error durante la toma y procesamiento de datos o que en esos puntos en particular se manifiesta una distribución de la energía de la turbulencia hacia frecuencias bajas.

Considerando que las características constructivas del túnel, el relevamiento con la camara de ensayos vacía, otras simulaciones realizadas, los perfiles de velocidades medias y los valores de intensidad de turbulencia, no muestran señales de una asimetría que pudiera provocar esta anómala distribución de energía en zonas tan restringidas, se consideró a estos espectros de dudosa validez y se los desechó para todo posterior análisis, asimismo como a los valores de macroescala y factor de escala geométrico derivados de ellos.

c) En el **grupo de gráficos 3.7** se observa un desplazamiento del perfil de intensidades de turbulencia normalizadas de P17-0 respecto de los laterales. Dado que este fenómeno no es observado en los perfiles de intensidad local se lo atribuyó a un error en el valor inferido de  $\bar{U}_{10}$  y no a un problema de falta de homogeneidad transversal. La misma causa se atribuyó al aumento de las intensidades de turbulencia normalizadas de P12-0 respecto de P17-0 en el **grupo de gráficos 3.9**, puesto que este aumento no es observado en las intensidades locales.

## 4.2 Homogeneidad transversal

a) El **grupo de gráficos 3.1** muestra una muy buena homogeneidad transversal del campo de velocidades medias en todas las simulaciones excepto en la P12. Los valores de  $\rho_{\text{cen-lat}}$  de la **tabla 3.2** (relacionar con apéndice de  $\rho_{\text{cen-lat}}$ ) confirman esta observación en términos numéricos.

b) En el **grupo de gráficos 3.3** se puede ver que la homogeneidad transversal es buena en cuanto al espectro de potencia (excepción hecha de los ya mencionados en el punto b) de **3.1**)

c) La homogeneidad transversal de los perfiles de intensidad de turbulencia es muy buena tal como puede verse en el **grupo de gráficos 3.5**.

## 4.3 Correspondencia con la capa límite atmosférica

a) Los valores de  $\rho_{\text{exp-teo}}$  de la **tabla 3.1**, muestran que el ajuste entre los valores experimentales y los correspondientes a la ley potencial de velocidades medias son muy buenos para las simulaciones de espesor total. Las simulaciones de espesor parcial no ajustan tan bien como las otras sin que por ello sean malas.

Una inspección al **grupo de gráficos 3.2** muestra de cuan poca magnitud son las diferencias en juego entre valores experimentales y teóricos.

b) Los perfiles de velocidades medias corresponden en todos los casos a un terreno de tipo suburbano, tal como se desprende de los valores de  $\alpha$  obtenidos (**tabla 3.1**)

c) En el **grupo de gráficos 3.4** se puede ver como todos los espectros ajustan razonablemente bien al espectro atmosférico; sobre todo en el rango inercial, que es el de mayor interés para el análisis de estructuras.

d) En las simulaciones T17 el factor de escala geométrico (**tabla 3.5**) se mantiene hasta la posición 5 alrededor de un valor de 270. Esto implica una buena correspondencia con las distribuciones de velocidad media y macroescala en la atmósfera.

En la posición 7 el valor de  $S$  aumenta casi al doble. Sin embargo esta distorsión es tolerable en todos los tipos de ensayos estructurales, si nos atenemos a las opiniones de Cook(25) y Surry(32).

e) En las simulaciones P17 el factor de escala geométrico se mantiene hasta la posición 5 alrededor de un valor de 150, siendo aquí también válidas las consideraciones al respecto hechas en el punto anterior.

f) Los **grupos de gráficos 3.5 y 3.7** muestran que los valores de intensidad de turbulencia tienen una adecuada distribución en altura, aunque mas cercanos a los correspondientes a un

terreno rural que a uno suburbano. Esto puede ser salvado usando modelos a escala mas chicos que los que debieran usarse en caso de atenerse estrictamente al procedimiento de Cook (1:270 para las T17 y 1:150 para las P17).

Esto último puede verse mas claramente en los **grupos de gráficos 3.6 y 3.8**, donde el factor de escala fue llevado al doble. Este recurso puede ser utilizado en determinaciones de coeficientes de presión en ensayos estáticos en que se requiera ser riguroso, pues es en este tipo de determinaciones que las intensidades de turbulencia deben ser bien modeladas(32), aunque, en opinión de Cook(25), la utilización de modelos pequeños trae aparejada la pérdida de detalles geométricos en las maquetas, que pudieran tener relevancia aerodinamica.

#### 4.4 Correspondencia con valores de diseño

a) Los valores de  $\alpha$  y  $z_0$  obtenidos estan muy próximos a los valores de diseño.

b) El valor de  $\delta_{6h}$  obtenido (medido en ensayo complementario) en la simulación de espesor total fué próximo al valor esperado, sin embargo no se observó el correspondiente crecimiento de  $\delta$  a lo largo de la cámara de ensayos.

c) Los valores de los factores de escala geométricos obtenidos fueron en las simulaciones de espesor total mucho menores (en el orden de la mitad) que lo esperado; es decir que la relación  $\frac{Z_g}{\delta}$  no es en este caso un muy buen estimador de  $S$ .

Llama la atención por otra parte el brusco salto de  $S$  en la posición 7; comportamiento mas propio de una simulación de espesor parcial.

Estas contradicciones surgen del hecho de que en el procedimiento de Cook tiene una importancia preponderante el valor de la macroescala, siendo que este procedimiento es posterior a los métodos de diseño del conjunto de simuladores, que se basan unicamente en las características de los valores medios.

d) Curiosamente, el valor de  $S$  fue muy cercano al esperado en la simulacion de espesor parcial. Simulación en la cual se hicieron hipótesis bastante groseras en el proceso de dimensionamiento de las agujas, al adaptar expresiones concebidas para simulaciones de espesor total.

#### 4.5 Evolución a lo largo de la cámara de ensayos

Cuando se pasó de usar 12,1m de rugosidad a usar 17,2m de rugosidad, se observó:

a) En la simulación de espesor total  $\delta$  no cambió.

b) En la simulación de espesor parcial  $\delta$  disminuyó.

Sería difícil decir si ésto se produjo por sí mismo o si fué debido a que la capa límite del techo avanzó sobre la capa límite simulada.

c) En ambas simulaciones el exponente  $\alpha$  aumentó.

d) En ambas simulaciones la calidad del ajuste de los perfiles de velocidades medias a los perfiles teóricos no varió

e) En la simulación de espesor total la homogeneidad transversal no varió.

f) En la simulación de espesor parcial la homogeneidad transversal mejoró.

g) La calidad del ajuste de los espectros de potencia al modelo teórico no varió en ninguna de las dos simulaciones.

h) En ambas simulaciones aparecen algunas variaciones en el factor de escala geométrico. Pero si se considera que este factor depende de las macroescalas y de  $z_0$ , parámetros que fueron obtenidos en forma indirecta y con procedimientos que arrojan considerable dispersión, y se toma en cuenta que en la sección mas a barlovento se midió en una sola posición (la central), sería aventurado inferir un comportamiento de las diferencias en cuestión, dado que no llegan a ser diferencias groseras.

i) En la simulación de espesor total las intensidades de turbulencia aumentaron en los  $\frac{2}{3}$  mas bajos de la capa límite (ver **grupo de gráficos 3.9**).

Esto podría ser un indicador de que en la posición mas a barlovento todavía no se alcanzan condiciones de equilibrio; aunque una adecuada discusión sobre las condiciones de equilibrio requeriría el aporte de mas datos.

j) En la simulación de espesor parcial los perfiles de intensidad de turbulencia local no varían (ver **grupo de gráficos 3.9**).

Esto es contradictorio si se toma en cuenta lo dicho en el punto anterior, puesto que en la simulación de espesor parcial el flujo es perturbado con mas violencia por las agujas que en la de espesor total, y por ello, es menos probable que se alcancen condiciones mas cercanas al equilibrio en la simulación parcial que en la total. Pero al igual que en el caso anterior, se requerirían mas datos para poder analizar adecuadamente las condiciones de equilibrio.



## 5. CONCLUSIONES

a) La simulación T17 es un muy buen modelo a una escala 1:250 de los primeros 260m de la capa límite atmosférica desarrollada sobre un terreno de tipo suburbano, en condiciones de estabilidad neutra, para ser utilizado en todos los tipos de ensayos de edificaciones conforme a las reglas del actual estado del arte.

b) La simulación P17 es un muy buen modelo a una escala 1:150 de los primeros 120m de la capa límite atmosférica desarrollada sobre un terreno de tipo suburbano, en condiciones de estabilidad neutra, para ser utilizado en todos los tipos de ensayos de edificaciones conforme a las reglas del actual estado del arte.

c) La utilización de 17,1m de rugosidad mejoró la calidad de la simulación respecto al uso de 12,1m. Sin embargo 12,1m hubieran sido suficientes para obtener simulaciones de buena calidad.

d) Las expresiones de cálculo utilizadas para el diseño del conjunto de simuladores predijeron muy satisfactoriamente los valores obtenidos; incluso en la simulación de espesor parcial, en la que se hicieron algunas hipótesis sin mayor sustento para poder usar las expresiones de Irwin en un tipo de cálculo para el cual estas expresiones no fueron concebidas.

e) La correspondencia con la capa límite atmosférica en la simulación de espesor total no se da en todo el espesor de la capa límite, dado que el valor de las macroescalas cae bruscamente en la parte superior. Es decir que las agujas provocan no sólo un brusco crecimiento de la capa límite desarrollada sobre la rugosidad, sino también un aumento de las macroescalas; y a su vez, la proporción en que aumentan las macroescalas en la parte inferior es mayor que la proporción en que aumenta el espesor mismo.

Visto desde este punto de vista, el comportamiento es semejante a la simulación de espesor parcial, diferenciándose ambas en que en una, existe por sobre la capa límite simulada una zona de flujo uniforme, y en la otra no.

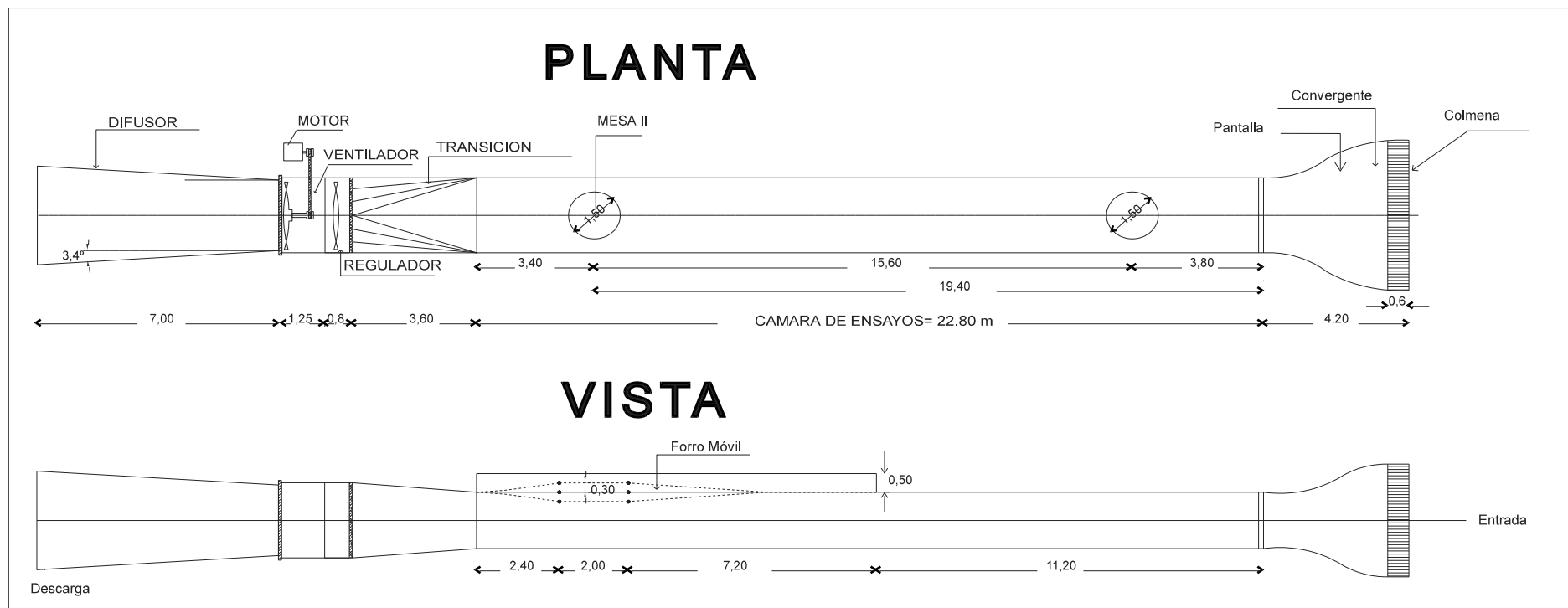
Este mismo fenómeno fue medido por De Bortoli(33) en una simulación de espesor total realizada conforme al método de Counihan; lo que lleva a pensar que podría ser propio de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla.

## Bibliografía

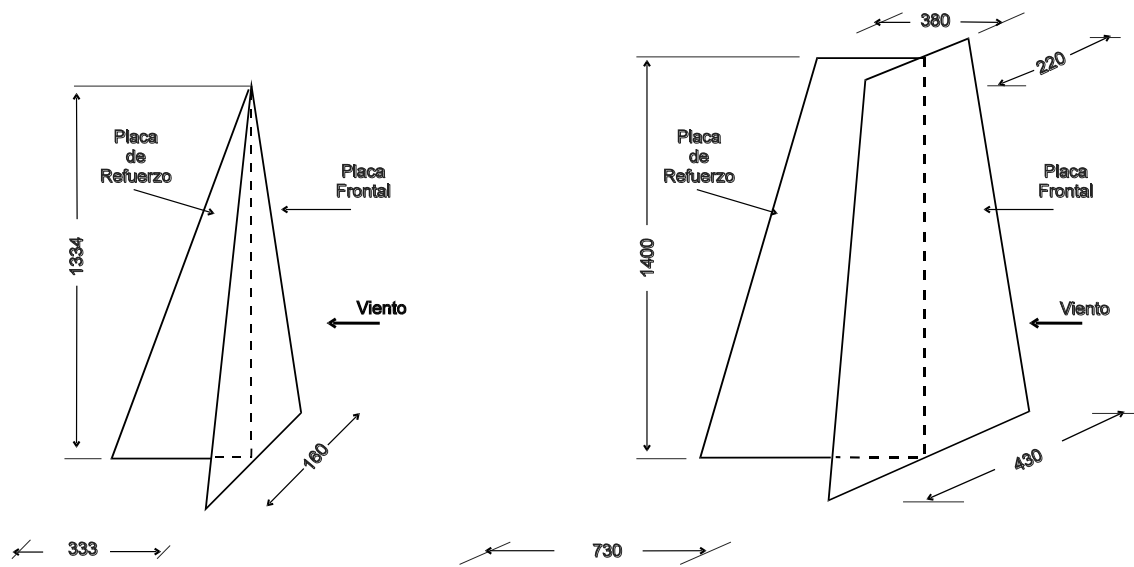
- 1) J.C.R Hunt, H. Fernholz "Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on EUROMECH 50", Cambridge University Press, London, Journal of Fluid Mechanics; vol. 70, part 3, 12 august 1975, pp. 33-49.
- 2) E. Plate "Wind tunnel modelling of wind effects in engineering" Engineering Meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1982.
- 3) J. E. Cermak "Physical modeling of the atmospheric boundary layer in long boundary layer wind tunnels", Cambridge University Press; Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications, Gaithersburg, Maryland, USA, april 1982, pp. 97-125.
- 4) N.J. Cook "The designer's guide to wind loading of building structures", Building Research Establishment report, Part 2: static structures, Butterworths, London, 1990.
- 5) J. Counihan "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel", Atmos. Environ., 3 (1969) 197-214.
- 6) J. Counihan "Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel", Atmos. Environ., 7 (1973) 673-689.
- 7) N. M. Standen "A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels"; Report of National Aeronautical Establishment; Canada; LTR-LA-94; may 1972.
- 8) N. J. Cook "On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel", Atmos. Environ., 7(1973)691-705.
- 9) G. S. Campbell, N. M. Standen "Simulation of earth's surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers", Progress report II, National Research Council of Canada, NAE Rep. LTR-LA-37 (July 1969).
- 10) H.P.A.H. Irwin "Design and use of spires for natural wind simulation", National Research Council of Canada, NAE Rep. LTR-LA-233 (Aug. 1979).
- 11) N. J. Cook "Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer", Journal of Industrial Aerodynamics, 2 (1977/1978) 311-321.
- 12) B. Natalini, M. E. De Bortoli, M. J. Paluch "Relevamiento en vacío del túnel de viento de capa límite de la UNNE", Memorias XV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 8 al 11 de octubre de 1996, Buenos Aires, Argentina, pp. 360-368.

- 13) M.B. Natalini, C. Agosti, M. Paluch “Análisis experimental en tunel de viento”, XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 1995, Vol. 2, pp. 479-493.
- 14) J. Counihan “Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements”, Atmospheric Environments, Great Britain, Vol. 5, pp. 637-642, 1971.
- 15) J. Blessmann “O vento na engenharia estrutural”, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, RS-Brasil, 1995.
- 16) H.P.A.H. Irwin “The design of spires for wind simulation”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7 (1981) 361-366.
- 17) I.S. Gartshore “A relationship between roughness geometry and velocity profile shape for turbulent boundary layers”, N.A.E, LTR-LA-140,-1973, National Research Council of Canada.
- 18) I.S. Gartshore, K.A. De Croos “Roughness element geometry required for wind tunnel simulations of the atmospheric wind”, Transactions of the ASME, New York. Journal of Fluids Engineering. Volume 99. Serie I. September 1977.
- 19) C. Fang, B.L. Sill “Aerodynamic roughness length: correlations with roughness elements”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 449-460.
- 20) Associação Brasileira de Normas Técnicas “Forças devidas ao vento em edificações NBR 6123”, ed. 1988.
- 21) J. Blessmann “Aerodinâmica das construções”, Sagra, Porto Alegre, 2da. Ed., 1990.
- 22) Academia Hütte de Berlin “Manual del Ingeniero”, Tomo I, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, traducción de la 28.ª edición alemana, 1964.
- 23) Michel Venuat, Michel Papadakis “Contrôle et essais des ciment, mortiers, bétons”, Editions Eirrolles, Paris, 1961.
- 24) J. Blessmann “Simulação da estrutura do vento natural em um túnel aerodinâmico”, ITA, São José dos Campos-SP, tesis doctoral, 1973.
- 25) N.J. Cook “The designer's guide to wind loading of building structures”, Building Research Establishment report, Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification, Butterworths, London, 1985.
- 26) N. Kato, T. Ohkuma, J. R. Kim, H. Marukawa, Y. Niihori “Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 67-78.
- 27) N. C. Helliwell “Wind over London”, Proceeding of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokio, 1971, pp. 23-32.

- 28)H. W. Teunissen “Measurements of planetary boundary layer wind and turbulence characteristics over a small suburban airport”, (MSRB)Atmospheric Environment Service, Internal Report No. MSRB - 77 - 4, Downsview, Ont., September 1977.
- 29)J. Counihan “Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880 - 1972”, Pergamon Press, Great Britain, Atmospheric Environment, Vol. 9,(1975), pp. 871-905.
- 30)S. Kawamura, T. Kiuchi, T. Taniguchi “Full scale measurement on a triangular tower-supported stack with two flues”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992) 2177-2186.
- 31)R. I. Harris “The nature of the wind”, Proc. Seminar on the modern Design of Wind-Sensitive Structures,London, UK, June 1970, pp. 29-55.
- 32)D. Surry “Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence” Cambridge University Press; Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications, Gaithersburg, Maryland, USA, april 1982, pp. 137-185.
- 33)M. E. De Bortoli, B. Natalini, M. J. Paluch "Simulaciones de espesor total de capa limite atmosferica neutralmente estable por los metodos de Counihan y Standen", Memorias de las XXVIII JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL , 1 al 5 de septiembre de 1997, São Carlos, SP, Brasil, Volumen 4, pp. 1615-1624.
- 34) H. Teenekes and J. H. Lumley "A first course in turbulence"; The MIT Press; Cambridge , Massachusetts, and London , England; fifteenth printing; 1994.
- 35)J. Blessmann “Considerações sobre o parâmetro  $S_2$  de normas de vento”, Memorias XV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 8 al 11 de octubre de 1996, Buenos Aires, Argentina, pp. 140-156.
- 36)C. Farell, A.K.S. Iyengar “On the experimental determination of roughness length and integral length scales in atmospheric boundary layer simulations”, Proc. of the 2nd. European & African Conference on Wind Engineering, Genova, Italy, June 22-26,1997, Vol. 1,pp. 267-274.



**Figura 1:** Planta y vista lateral del tunel de viento de la UNNE (las dimensiones estan en metros)



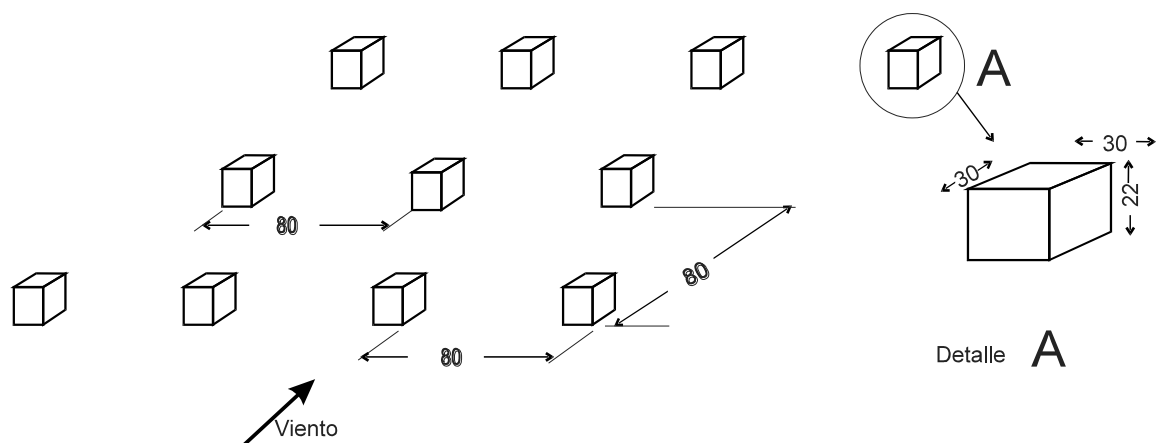
**Figura 2:** Croquis de agujas. (Las dimensiones aparecen en mm)



**Figura 3:** foto de aguja para simulación de espesor total



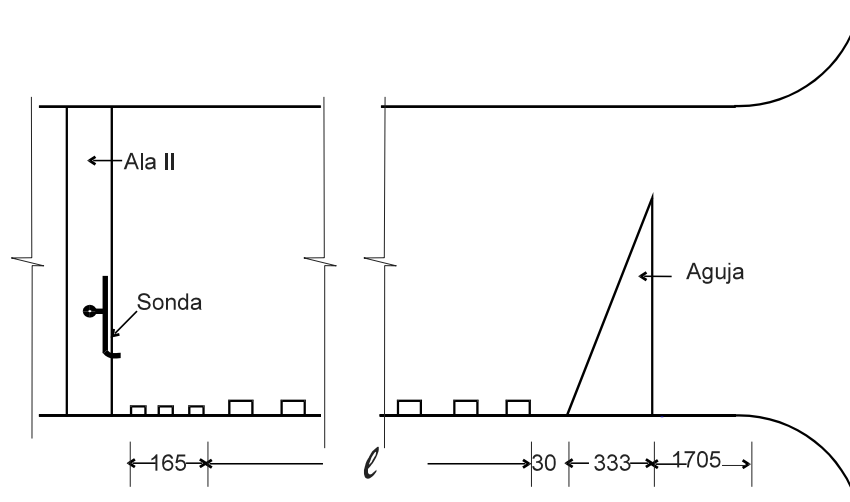
**Figura 4:** foto de aguja para simulación de espesor parcial



**Figura 5:** Croquis de rugosidad (Las dimensiones aparecen en mm)

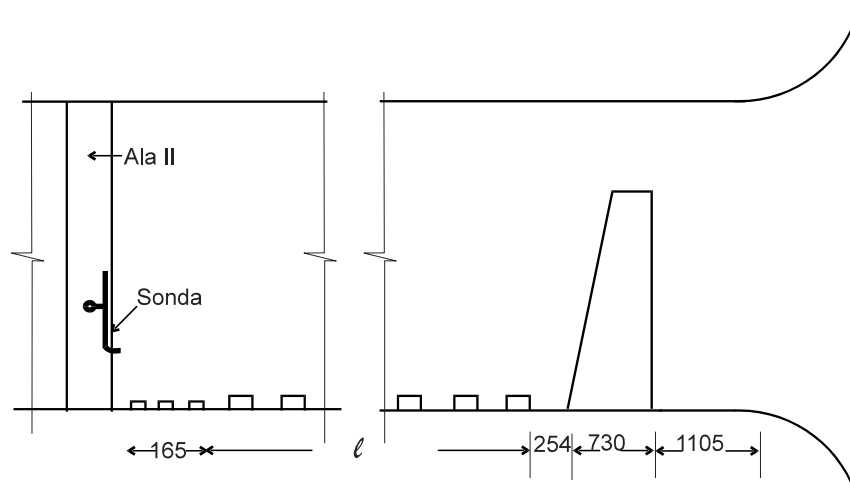


**Figura 6:** foto de la rugosidad

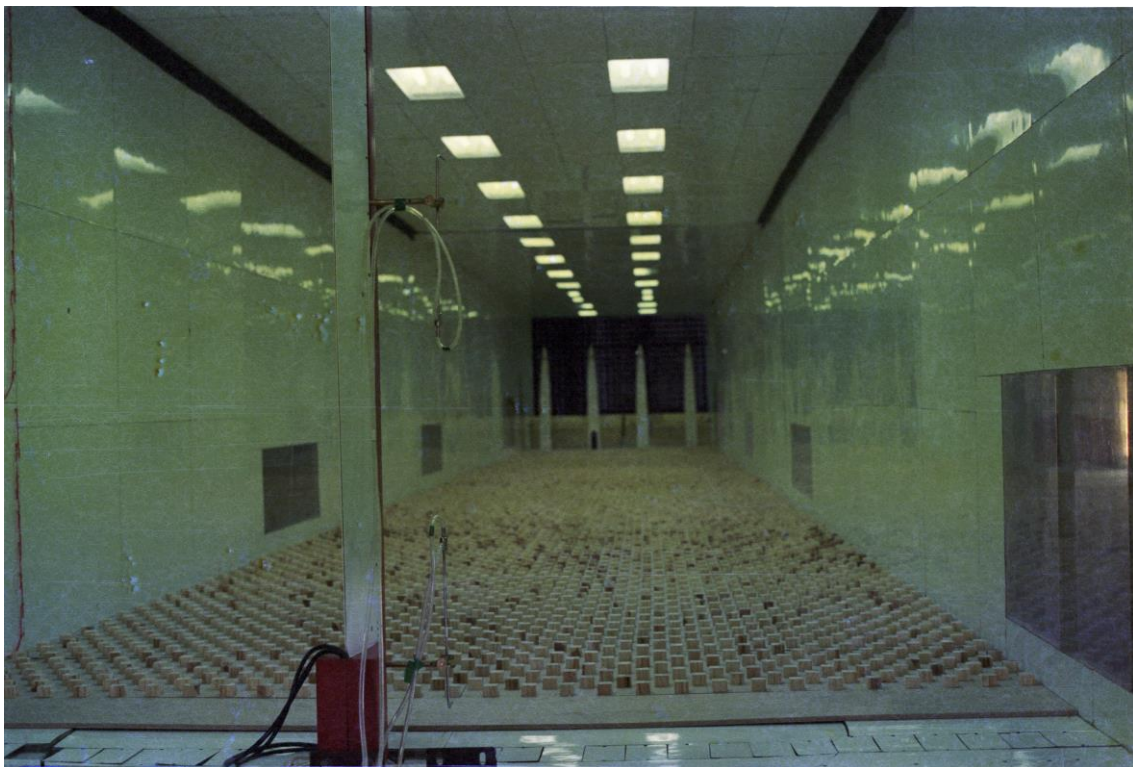


**Figura 7:** Croquis de vista lateral del tunel con disposición de simuladores de espesor total (Las dimensiones aparecen en mm)





**Figura 8:** Croquis de vista lateral del tunel con disposición de simuladores de espesor parcial



**Figura 9:** foto de Ala II y tubos de Pitot-Pandtl

## APENDICE A

### Capa límite turbulenta

Dado que el problema consiste en reproducir el comportamiento de la capa límite atmosférica, por medio de una capa límite desarrollada en un túnel de viento, es pertinente rever algunos conceptos sobre flujos turbulentos limitados por una pared, suave o rugosa, con gradiente de presión cero.

En una capa límite turbulenta completamente desarrollada, se pueden distinguir regiones en las cuales las características de la dinámica del flujo están bien diferenciadas. El flujo en estas regiones es usualmente caracterizado por medio de una muy poderosa herramienta conocida como dinámica de escalas. Al respecto dicen Tennekes y Lumley(34) “La dinámica de flujos a altos números de Reynolds está caracterizada por la existencia de varias escalas de longitud, algunas de las cuales asumen roles muy específicos en la descripción y análisis de flujos. En los flujos turbulentos un amplio rango de escalas de longitud existe, acotado superiormente por las dimensiones del campo de flujo, y acotado por debajo por la acción difusiva de la viscosidad molecular”. Conocer cuales son las escalas dominantes en los fenómenos que se están analizando, permite arribar frecuentemente a útiles conclusiones. Se debe recordar que en un flujo de capa límite turbulenta, si la pared es suave, coexisten dos escalas de longitud que gobiernan la dinámica del flujo. La primera, que llamaremos  $\delta$ , es el espesor de la capa límite, y es la escala dominante en la mayor parte del campo de flujo, excepto en cercanías de la pared. La segunda, que estará dada por  $\frac{v}{\omega}$ , donde  $\omega$  es una velocidad característica del nivel de las fluctuaciones (usualmente se toma  $\omega = u_*$ , siendo  $u_*$  la velocidad de cizallamiento), es la dominante en una zona cercana a la pared que es llamada usualmente capa de superficie o capa de pared. Cuando la pared es rugosa se debe reconocer además en la capa de pared la existencia de otra escala relevante que se conviene en denominar  $k$ , que es una longitud característica de la rugosidad.

La región conocida como capa de pared o capa interna es la zona próxima a la pared donde la escala de longitud dominante es  $\frac{v}{u_*}$  si la pared es lisa; y son  $\frac{v}{u_*}$  y  $k$  si la pared es rugosa. Tiene un espesor de aproximadamente  $0,1\delta$  a  $0,2\delta$ . Esta región no es afectada por las variaciones en el flujo medio y las velocidades medias están gobernadas en la mayor parte de esta región por una ley de validez universal conocida como ley de la pared.

La región de la capa límite fuera de la capa de pared es conocida como capa externa. Aquí la escala de longitud dominante es  $\delta$  y es una zona de turbulencia fuertemente anisótropa. No se

conoce ninguna ley de carácter universal que describa el comportamiento de las velocidades medias en esta región, pero si hay dos leyes universales que describen el comportamiento de la diferencia entre las velocidades medias y la velocidad del flujo fuera de la capa límite; dichas leyes son conocidas como ley de defecto de la velocidad y ley de la estela.

La zona de la capa interna mas próxima a la pared es conocida como subcapa viscosa. Aquí la turbulencia generada no puede sostenerse a si misma y no puede generar tensiones de Reynolds debido a que es predominante la acción de la viscosidad. En la subcapa viscosa el flujo es no estacionario, pero las fluctuaciones de velocidad no contribuyen mucho a las tensiones totales. Algunos autores la llaman subcapa laminar, este nombre sin embargo puede conducir a la idea errónea de que no hay fluctuaciones de velocidad presentes.

Cuando el número de Reynolds es grande, entre la capa de pared y la capa externa existe una región de solape o superposición (“overlapping”) donde no llegan a predominar ni la escala que gobierna la capa externa, ni la que gobierna en la capa de pared, siendo la única escala predominante la misma coordenada  $z$ . Esta zona es conocida como subcapa inercial Es una zona caracterizada por la isotropía local.

Capa intermedia (“Buffer layer”): es una zona de transición entre la subcapa inercial y la subcapa laminar, donde no pueden ser despreciadas las tensiones viscosas ni las tensiones de Reynolds.

### Perfiles de velocidad media

En la subcapa viscosa, la velocidad media se incrementa con la altura en forma lineal.

En la capa de pared, fuera de la subcapa viscosa, y en la subcapa inercial, el perfil de velocidad media esta dado por la ley de la pared. Ésta establece que en proximidades de una pared suave, la velocidad media solo depende de la altura, si la relación es adimensionalizada por las escalas relevantes  $u_*$  de velocidad, y  $\frac{v}{u_*}$  de longitud:

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = f_1\left(\frac{z \cdot u_*}{v}\right)$$

Si la pared es rugosa, el perfil de velocidad dependerá además de la relación entre las escalas de longitud relevantes  $\frac{u_* \cdot k}{v}$  (llamado número de Reynolds rugoso) y la ley de la pared queda:

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = f_2 \left( \frac{z}{k}; \frac{u_* \cdot k}{\nu} \right)$$

Se considera que la pared es lisa si  $\frac{u_* \cdot k}{\nu} < 5$  y completamente rugosa si  $\frac{u_* \cdot k}{\nu} > 80$ .

Ha sido demostrado que la  $f_1$  tiene la forma de una función logarítmica tal que :

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z \cdot u_*}{\nu} \right) + C_1$$

donde  $\kappa$  y  $C_1$  son constantes. Valores usuales de mediciones en laboratorio son  $\kappa = 0,4$  y  $C_1 = 5$ .

Ha sido demostrado que la función  $f_2$  tiene la forma de una función logarítmica tal que :

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{k} \right) + C_3$$

donde  $C_3$  no es una constante universal. Tampoco existe un valor simple de  $k$ , puesto que depende de del tamaño, forma, densidad y distribución de la rugosidad. Por ello una forma usual de expresar la ley de pared para paredes rugosas es

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad [3]$$

donde  $u_*$  y  $z_0$  son ahora parámetros del perfil. Aquí,  $z_0$  es conocido como el parámetro de longitud rugosa ("roughness length parameter"). Además, como es difícil de conocer el origen de la coordenada  $z$ , se encontrará frecuentemente a la ley de pared expresada como

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - d}{z_0} \right)$$

donde  $d$  es ahora un parámetro de la curva, conocido como altura de desplazamiento.

En la capa externa no se puede generalizar respecto del perfil de velocidades medias, pero hasta una altura no mayor de 1000 de la coordenada adimensional de altura  $\frac{z \cdot u_*}{\nu}$  es válida la ley

de defecto de velocidad, ( también llamada ley de déficit de momentum), que establece que para valores de orden uno de la variable adimensional  $\frac{z}{\delta}$  se cumple que

$$\frac{\bar{U} - \bar{U}_1}{u_*} = g\left(\frac{z}{\delta}\right)$$

y es válida tanto para paredes lisas como rugosas. *Nótese entonces que la presencia de rugosidad afecta únicamente a la ley de la pared.*

Ha sido demostrado que la función  $g$  tiene la forma de una función logarítmica tal que :

$$\frac{\bar{U} - \bar{U}_1}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{\delta} \right) + C_2$$

Valores usuales de mediciones en laboratorio dan un valor de  $C_2 = -2,5$

Para valores de la coordenada adimensional  $\frac{z \cdot u_*}{\nu} > 1000$  o lo que es lo mismo, para valores de la coordenada adimensional  $\frac{z}{\delta} > 10^{-1}$ , la curva de defecto de velocidad se aparta de la forma logarítmica. Esta desviación del perfil logarítmico sigue una ley empírica de carácter universal (dentro del rango de datos existentes, puesto que es una ley empírica) conocida como ley de la estela.

En figuras 1 y 2 se pueden visualizar los comportamientos de las leyes universales.

Fig. 2

Fig. 3

### La ley potencial de velocidades medias

Una forma muy usual de describir la distribución de las velocidades medias con la altura, es una ley potencial de la forma:

$$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{ref}}} = \left( \frac{Z}{Z_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}$$

Donde  $\alpha$ , cuando se trata de viento natural, es una magnitud que además caracteriza al tipo de terreno.

Esta forma de describir el comportamiento de  $\bar{U}$  aunque es de origen totalmente empírico, ha servido desde hace mucho tiempo como una adecuada descripción de lo que ocurre en una atmosfera neutralmente estable con vientos fuertes.

Precisamente a causa de su origen empírico, su uso ha sido fuertemente cuestionado por muchos investigadores de prestigio<sup>1</sup>. Los cuestionamientos mas fuertes al uso de la ley potencial se pueden resumir en que:

a) No tiene justificación teórica, y su uso puede conducir a concepciones erroneas en la interpretación de los fenómenos que se producen en una capa límite.

b) La ley logarítmica ajusta mejor en la parte baja.

A su vez, los argumentos mas fuertes a favor de su uso son:

c) “Dar, dentro de la variabilidad de los vientos naturales en estabilidad neutra, resultados compatibles y que en ciertos casos, puede representar mejor el fenómeno natural”(35)

---

<sup>1</sup> Se recomienda el completo resumen que realizó Blessmann(35) al respecto.

d)Simplicidad en su uso.

e)Tiene mejor ajuste que la ley logarítmica en la parte superior.

f)Se aplica también a velocidades medias calculadas en intervalos de tiempo pequeños a partir de ráfagas de sólo 3 segundos. No pasa lo mismo con la ley logarítmica, que sólo funciona bien con ráfagas de 10 minutos o mas.

g)El valor de  $Z_0$  varía mucho de acuerdo al autor.

h)La determinación de  $z_0$  es de muy difícil implementación.

Este último punto no es un argumento menor, y ha sido recientemente señalado por Farell(36) en base a nuevos experimentos, que este punto requiere una nueva discusión.

### **Capa límite en equilibrio**

Se cita a continuación una interesante observación sobre el concepto de equilibrio que se puede encontrar en el trabajo de Gartshore y De Croos(18).

“El equilibrio de capas límite usadas en simulaciones atmosféricas es a menudo mencionado y está usualmente implícito, aunque rara vez el término equilibrio es definido precisamente. Lo que es usualmente entendido por equilibrio es que las características de capa límite tales como forma del perfil de velocidad, espectro adimensional, etc., no cambien significativamente en la dirección de la corriente. Una mas exacta forma de equilibrio es definida por el término autopreservación (self-preservation) usado por Townsend. La autopreservación describe un flujo de corte turbulento cuya turbulencia esta en exacto equilibrio dinámico de tal manera que las distribuciones medias de la turbulencia, adimensionalizadas por una simple escala de longitud y velocidad, no cambien en toda la dirección del flujo”.

### **Capa límite neutralmente estable**

Cuando una masa de aire es desplazada verticalmente hacia arriba es llevada hacia una zona de menor presión, por lo tanto se expande, y por lo tanto se enfría. Si el proceso ha ocurrido con suficiente rapidez como para que el proceso pueda ser considerado adiabático, pueden darse tres situaciones:

a)La disminución con la altitud de la temperatura del aire circundante es igual a la disminución de la temperatura de la masa de aire que sube. En estas condiciones se dice que la atmósfera está en **equilibrio neutro**, o que es una **capa límite neutralmente estable**.

b) La temperatura del aire circundante disminuye más rápidamente que la temperatura de la masa de aire que sube. Puesto que la masa del aire que sube va quedando con menos densidad que el aire circundante, tiende a seguir subiendo y se originan corrientes de convección. Se dice entonces que la atmósfera está en **equilibrio inestable**.

c) La temperatura del aire circundante disminuye menos rápidamente que la temperatura de la masa de aire que sube (o incluso aumenta con la altura) quedándose entonces esta última con mayor densidad, y por lo tanto tiende a volver a su posición inicial. Se dice entonces que la atmósfera está en **equilibrio estable**.

La condición de estabilidad neutra se da en tormentas de larga duración y vientos de alta velocidad de origen ciclónico tanto tropicales como extratropicales en su estadio maduro. En ellos las fluctuaciones de velocidad son casi exclusivamente causadas por agitación mecánica del aire con formación de un gran número de remolinos.

Estos conceptos han sido extraídos de (15), donde se encuentra un extenso y adecuado tratamiento del tema.



## APENDICE B

### El coeficiente de correlación lineal

El coeficiente de correlación lineal entre dos variables aleatorias  $X$  e  $Y$  no independientes, es un parámetro que cuantifica en cuánto se aproxima la relación entre ambas, a una relación lineal. Es decir, cuantifica por un lado si la relación entre ambas tiende a ser lineal, y cuantifica también el grado de dispersión respecto a la relación lineal que mas se le aproxima.

Tratándose de comparar valores experimentales con valores correspondientes a una ley teórica, el coeficiente de correlacion es un buen indicador de la bondad de ajuste; puesto que si el ajuste fuera perfecto, los valores experimentales serían iguales a los teóricos; y si le llamáramos a unos con el nombre de  $X$  y a los otros con el nombre de  $Y$ , estarían vinculados por la relación funcional  $Y=X$ . En el caso de un ajuste perfecto el coeficiente de correlación es:

$$R=1$$

La dispersión de los valores experimentales respecto de la ley teórica, hace que el valor de  $R$  sea menor que 1, alejándose mas de este valor cuanto mayor sea la dispersión; aunque no debe olvidarse en ningun momento que el valor de  $R$  puede alejarse de 1 no sólo por un problema de dispersión sino además porque la relación entre  $X$  e  $Y$  puede no ser lineal, es decir, que los puntos experimentales no se correspondan muy bien con los de la ley adoptada.

Para dar una idea de que grado de dispersión hay asociado a cada valor de  $R$ , se presentan a continuación cuatro ejemplos en los que se han distribuído presuntos valores experimentales, en forma homogénea a ambos lados de la función  $Y=X$ , de cuatro formas distintas.

Ej.	Criterio	R
A	Distribuidos en $\pm 2\%$ respecto de los valores teóricos	0,9993
B	Distribuidos en $\pm 2\%$ respecto del máximo valor teórico de la serie	0,9980
C	Distribuidos en $\pm 4\%$ respecto de los valores teóricos	0,9973
D	Distribuidos en $\pm 4\%$ respecto del máximo valor teórico de la serie	0,9922

En los siguientes gráficos se pueden apreciar visualmente estas dispersiones.

