



## PREDICCIÓN Y EVALUACIÓN EMPÍRICA DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE CARGA EN RELLENOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

JOSÉ A. SIRENA, ÁNGEL GALEASSO, PABLO E. NAJLE

Universidad Nacional de Córdoba  
Pabellón Ingeniería, Ciudad Universitaria, Córdoba, Rep. Argentina

*(Recibido 20 de septiembre de 2010, para publicación 1 de octubre de 2010)*

**Resumen** – En este trabajo se presenta la predicción analítica del coeficiente de pérdida de carga de varias configuraciones geométricas básicas de rellenos de torres de enfriamiento de agua, del tipo de película y salpicado, y su posterior determinación experimental en dos instalaciones experimentales ad hoc. Asimismo se analiza el coeficiente de pérdida de carga por unidad de longitud de relleno, coeficiente con el cual se mejora la comparación en los resultados obtenidos.

**Palabras clave** – Torre de enfriamiento de agua, relleno, pérdida de carga, coeficiente de pérdida de carga, relleno de salpicado, relleno de película.

### 1. INTRODUCCIÓN

En muchos procesos industriales o acondicionamientos ambientales se requiere el empleo de algún sistema o equipo de disipación térmica; entre ellos, las torres de enfriamiento de agua ocupan un lugar preponderante en, por ejemplo: plantas de generación eléctrica, grandes complejos edificios y centros comerciales, industrias químicas y metal-mecánicas, etc.

En la vida útil de las torres de enfriamiento de tiro mecánico, generalmente, el costo operativo directo es el ítem de mayor preponderancia en el costo total, siendo este costo (C.O.D.) proporcional a la pérdida de carga en el relleno, por lo cual su evaluación es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se evalúa la eficiencia de una torre de enfriamiento de tiro mecánico.

El principal motivo que impide determinar o predecir analíticamente las características de pérdida de carga de las superficies evaporativas o rellenos son las características del flujo de aire y agua en el interior de las torres y la conformación geométrica de estas superficies. Por ello y con el fin de predecir la pérdida de carga de rellenos se planteó la construcción de rellenos con formas geométricas simples, que permitan su evaluación analítica y su posterior evaluación empírica.

La complejidad de las formas de las superficies evaporativas de las torres proviene de una solución de compromiso entre ofrecer una gran superficie de contacto o formas en-tramadas para demorar el paso del agua y generar un gran número de gotas de agua, según sea el tipo de relleno, esto con el fin de obtener una eficaz transferencia térmica procurando minimizar la pérdida de carga.

Este trabajo tiene como meta presentar predicciones y evaluaciones empíricas de pérdida de carga en rellenos o superficies evaporativas simples de torres de enfriamiento de agua para conocer y evaluar su comportamiento en función de los parámetros que gobiernan el fenómeno de pérdida de carga.

En estas torres la eficiencia con la cual el grupo motor-ventilador transforma la energía eléctrica en la energía cinética y de presión necesaria para contrarrestar la pérdida de carga que produce el flujo de aire durante el funcionamiento de la torre, se puede realizar mediante el Parámetro de calidad Electro-Fluido Dinámico, QP, que se define como la relación entre la potencia eléctrica activa,  $N_{act}$ , y la energía cinética del flujo de aire en el interior de la torre, ecuación (1), [1].

$$QP = \frac{N_{act}}{E_c} \quad (1)$$

Expresión que en términos de parámetros adimensionales es igual a:

$$QP = \frac{\tau}{\eta_{mtv}} \quad (2)$$

donde  $\tau$  es el coeficiente de pérdida de carga y  $\eta_{mtv}$  la eficiencia del grupo motor eléctrico, transmisión y ventilador. Cuanto menor sea QP más eficiente será el funcionamiento de la torre, bajo el punto de vista del consumo de energía eléctrica.

Los resultados obtenidos permitirán evaluar y analizar la utilización de QP como herramienta válida para ponderar cuantitativamente la utilización de este parámetro para calificar la eficiencia electro mecánica de las torres de enfriamiento de agua de tiro mecánico.

## 2. RELLENOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO

El relleno en una torre de enfriamiento es el elemento a través del cual pasa el agua y tiene el objetivo de aumentar la eficacia general de la transferencia de calor de la torre por unidad de volumen de la misma. Ello se logra aumentando la superficie de contacto entre el líquido y aire y retardando el paso del agua a través del interior de la torre. Hay dos maneras de aumentar el área de contacto: dividiendo el agua en gotas o esparciendo una capa de agua sobre mayores superficies.

Estas dos formas de actuar dan lugar a la siguiente clasificación:

- Rellenos de salpicado o goteo.
- Rellenos de película

El relleno de salpicado es, en general, listones o barras de secciones cilíndricas o prismáticas, transversales a la dirección de la caída del agua. Dichos listones están distribuidos de muchas maneras, Fig. 1, pero de tal forma que obliguen a las gotas golpear los listones inferiores con una velocidad tal que provoquen la división de estas gotas en otras más pequeñas.

Actualmente hay desarrollos de estos rellenos de formas geométricas más complejas, Fig. 2, pero el principio básico es el mismo.

El relleno de película tiene una alta relación de superficie mojada por unidad de volumen. La forma básica es de placas planas u onduladas dispuestas en paralelo y cercanas entre sí, en la misma dirección del flujo de agua, Fig. 3(a). Aquí el principal objetivo del relleno es forzar al agua que descende a adherirse a ambas caras de cada placa y formar una gran área de transferencia de masa y calor. Con este tipo de relleno se logran diseños de torre más compactos.

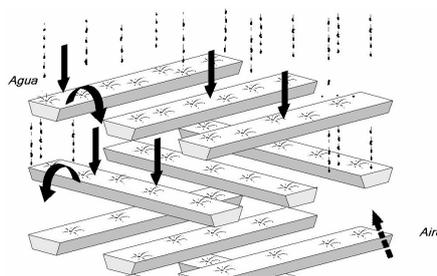


Fig. 1. Forma básica de relleno por salpicado.

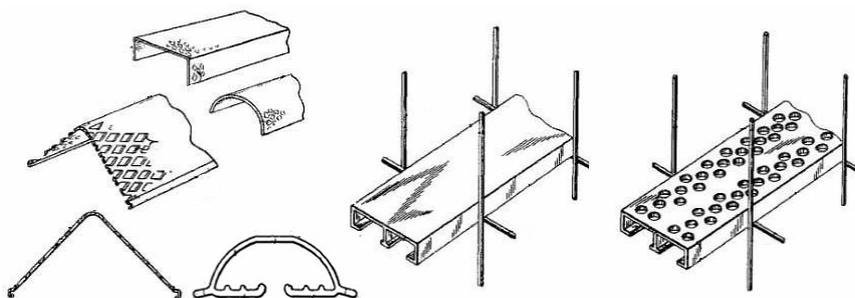
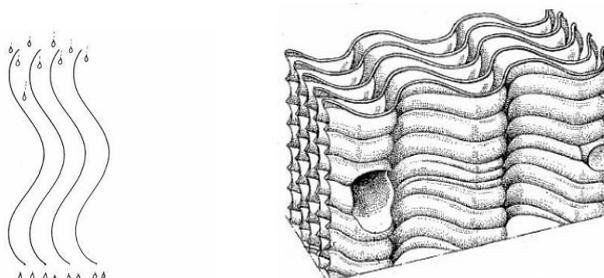


Fig. 2. Formas usuales de rellenos por goteo.



(a) Forma básica del relleno de película.

(b) Forma general de rellenos de película.

Fig. 3. Rellenos de película.

### 3. DEFINICIÓN DE RELLENOS

Con el fin de poder predecir la pérdida de carga en rellenos se analizaron configuraciones geométricas simples, que permitieran la predicción de la pérdida de carga a partir de valores analíticos o empíricos preexistentes. Para el relleno de salpicado se analizaron diseños basados en listones de secciones simples, por ejemplo: cilindros, rectángulos o triángulos, distribuidos en tresbolillo o en corredor y para los rellenos de película se analizaron rellenos compuestos por placas planas dispuestas en forma paralela entre sí, en la dirección de la corriente de aire y agua. Este tipo de rellenos son similares a los primeros rellenos que se utilizaron en torres de enfriamiento de agua.

#### 3.1. Rellenos de salpicado

De las diferentes posibilidades analizadas para rellenos de salpicado, se optó finalmente por el cilindro como elemento principal del empaque, procediéndose luego a estudiar las distintas configuraciones posibles de los cilindros, dispuestos en dirección perpendicular a la dirección de caída del agua, dentro de un área cuadrada de 230 mm de arista. Esto último como consecuencia que el conducto del banco de ensayos, para medir la pérdida de carga, tiene una sección transversal de esas dimensiones.

De las configuraciones estudiadas se optó por la distribución en tresbolillo en razón de que promueve en mayor medida la producción de gotas al estar los tubos más separados en dirección de la caída de agua y menos distanciados en la dirección perpendicular a la dirección del aire. Se eligieron dos distribuciones, una de mayor densidad que la otra, de dieciséis y seis tubos de polipropileno y una pulgada de diámetro, respectivamente. Los detalles y vistas de las configuraciones elegidas se pueden observar en las Figuras 4 y 5.

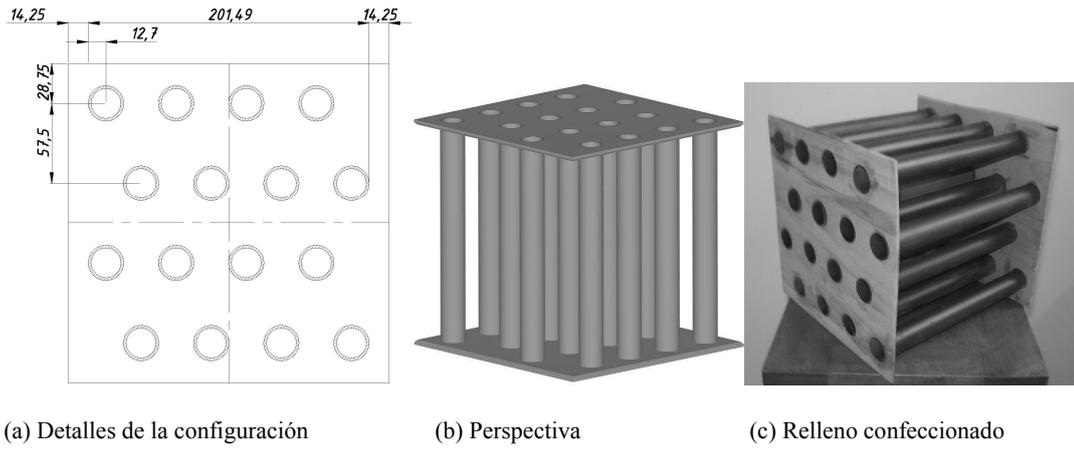


Fig. 4. Detalle y perspectiva del relleno de salpicado de dieciséis tubos.

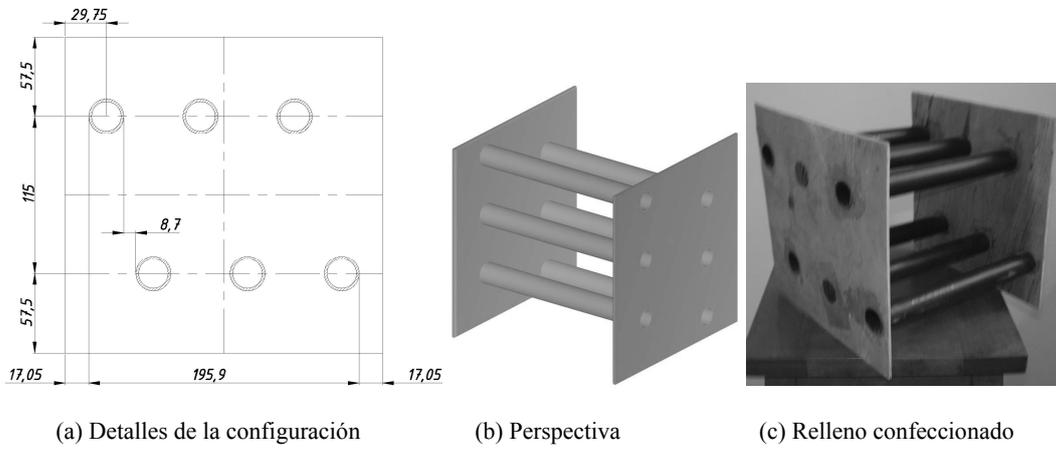


Fig. 5. Detalles y perspectiva del relleno de salpicado de seis tubos.

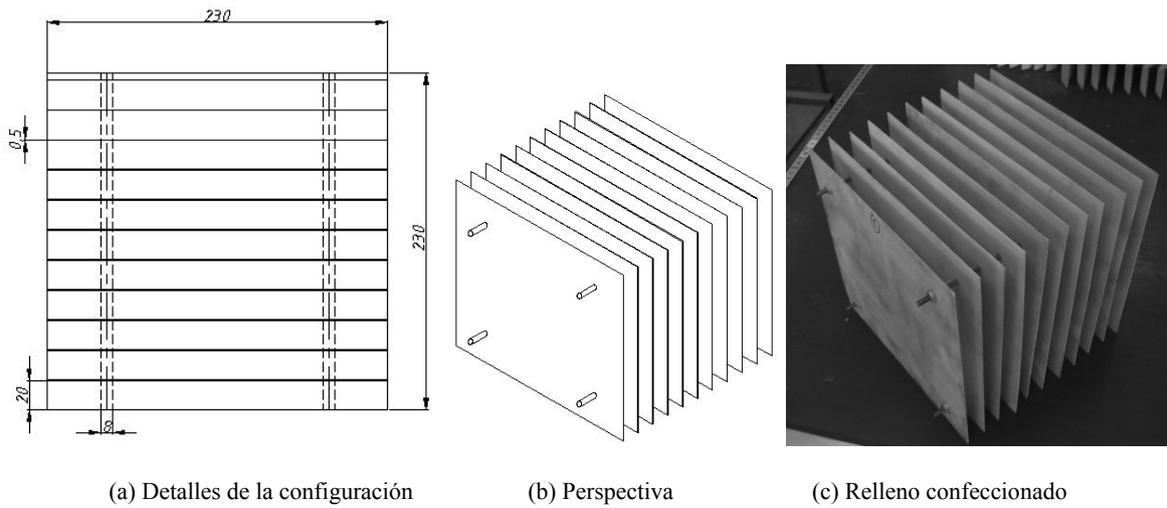


Fig. 6. Detalle y perspectiva del relleno de película.

### 3.2. Rellenos de película

Se propuso para su construcción un material que promoviera la formación de película de agua, ya que es necesario que la superficie sea rugosa, adecuada para que el agua “moje” la placa, decidiéndose por placas de fibra de vidrio, con un espaciado de 20 mm., con un área cuadrada de 230 mm de arista, Fig. 6.

## 4. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LA PÉRDIDA DE CARGA

Los análisis se realizaron en base a métodos tradicionales de la mecánica de los fluidos, de acuerdo con la geometría de cada uno de los diseños de rellenos y bajo las hipótesis que la pérdida de carga que genera cada uno de los rellenos propuestos tienen origen en la resistencia aerodinámica que ofrece cada configuración geométrica. Para los rellenos de salpicado el arreglo de varios cilindros inmersos en una corriente fluida y para el de película la resistencia debida a la fricción sobre una placa plana, más la interferencia producida por los separadores de placas.

### 4.1. Pérdida de carga en el relleno de salpicado

La resistencia fluido-dinámica que ofrece el relleno de salpicado, al estar conformado por cilindros, tiene su origen en la resistencia que ofrecen este tipo de cuerpos geométricos, es decir que hay que tener en cuenta la resistencia que ofrecen los cilindros y la eventual interferencia que se produce entre ellos según sea la disposición de los mismos. Esta resistencia,  $D$  [N], depende de varios factores, a saber: la geometría y dimensión del cuerpo, la velocidad de la corriente, densidad y viscosidad del fluido. La resistencia se expresa:

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (3)$$

donde:  $C_D$  es el coeficiente adimensional de resistencia,  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>] la densidad del fluido,  $V$  [m/s] la velocidad de la corriente y  $S$  [m<sup>2</sup>] la superficie de referencia del cuerpo, pudiéndose escribir:

$$D = C_D \cdot q \cdot S \quad (4)$$

En la cual  $q$  [Pa], conocida como presión dinámica en flujo incompresible, es igual a  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ .

La resistencia fluido dinámica origina una disminución en la presión estática ( $\Delta p$  [Pa]) aguas abajo del flujo interno a través de un obstáculo, Fig. 7, la cual se puede expresar como:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (5)$$

La disminución de la presión estática en un flujo interno, con área transversal constante, se puede expresar en términos de un coeficiente adimensional de pérdida de carga del relleno ( $\tau$ ) mediante la relación:

$$\Delta p = \tau \cdot q \quad (6)$$

La resistencia que producen cilindros, inmersos en una corriente fluida, se debe principalmente a la resistencia de presión o de forma y en menor medida a la resistencia de fricción, siendo ambas clases de resistencia función del número de Reynolds, basado en el diámetro de los cilindros.

La caída de presión  $\Delta p$  asociada al flujo a través del arreglo de tubos de estas características se calcula [2]:

$$\Delta p = NL \cdot f \cdot \left( \frac{\rho \cdot V \max^2}{2} \right) \cdot X \quad [Pa] \quad (7)$$

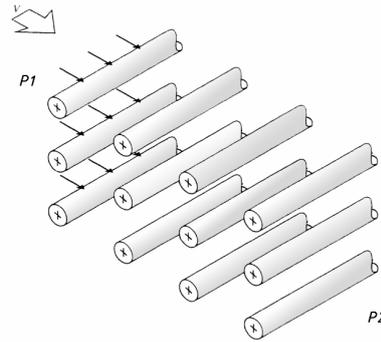


Fig. 7. Caída de presión aguas debajo de la corriente.

Tabla 1. Pérdida de carga del relleno de salpicado de dieciséis tubos.

Capas de relleno	1	2	3	4
$V$	$\Delta p$	$\Delta p$	$\Delta p$	$\Delta p$
1.5	4.72	9.44	14.17	18.89
3.0	16.21	32.42	48.64	64.85
4.5	32.48	64.96	97.44	129.92
6.0	53.43	106.85	160.28	213.71

Tabla 2. Pérdida de carga del relleno de salpicado de seis tubos.

Capas de relleno	1	2	3	4
$V$	$\Delta p$	$\Delta p$	$\Delta p$	$\Delta p$
1.5	1.54	3.08	4.62	6.16
3.0	4.83	9.66	14.49	19.32
4.5	10.03	20.07	30.10	40.13
6.0	16.80	33.60	50.39	67.18

Ecuación en la cual:  $NL$  es el número de hileras,  $f$  es un factor de fricción para distribuciones estándar para corredor y tresbolillo,  $X$  un factor de corrección debido a configuración,  $\rho$  la densidad de la corriente y  $V_{\max}$  la máxima velocidad según sea el caso de distribución de cilindros.

Utilizando la ecuación (5) se calculó la pérdida de carga  $\Delta p$  para distintos números de capas de rellenos de salpicado en función de la velocidad del flujo de aire, obteniéndose los valores presentados en las Tablas 1 y 2, [2]:

Una vez calculada la pérdida de carga ocasionada por el relleno, se procedió al cálculo del coeficiente de resistencia  $\tau$  de los mismos utilizando la ecuación (4), previo cálculo de la presión dinámica correspondiente y considerando una densidad media del aire igual a  $1.225 \text{ Kg/m}^3$ . Los valores obtenidos del coeficiente de pérdida de carga se muestran en las Tablas 3 y 4 y en Fig. 8 se presenta el  $\tau$  correspondiente al relleno de salpicado de dieciséis tubos, en función del número de capas de relleno.

Resulta útil expresar el coeficiente de pérdida de carga por unidad de altura y teniendo en cuenta que la altura de cada capa de relleno es de  $0.230 \text{ m}$  se obtuvo  $\tau / \text{m}$ , dividiendo el coeficiente  $\tau$  por la altura de cada configuración de relleno. Los valores del coeficiente de pérdida de carga, por unidad de longitud, en función de la velocidad de aire de los rellenos de salpicado de seis tubos y dieciséis tubos se presentan en Fig. 9.

Tabla 3. Pérdida de carga,  $\tau$ , del relleno de salpicado de dieciséis tubos.

Capas de relleno	1	2	3	4
$V$	$\tau$	$\tau$	$\tau$	$\tau$
1.5	3.44	6.85	10.28	13.71
3.0	2.94	5.88	8.82	11.76
4.5	2.62	5.24	7.86	10.48
6.0	2.42	4.85	7.27	9.69

Tabla 4. Pérdida de carga,  $\tau$ , del relleno de salpicado de seis tubos.

Capas de relleno	1	2	3	4
$V$	$\tau$	$\tau$	$\tau$	$\tau$
1.5	1.12	2.23	3.36	4.47
3.0	0.88	1.75	2.63	3.50
4.5	0.81	1.62	2.43	3.24
6.0	0.76	1.52	2.29	3.05

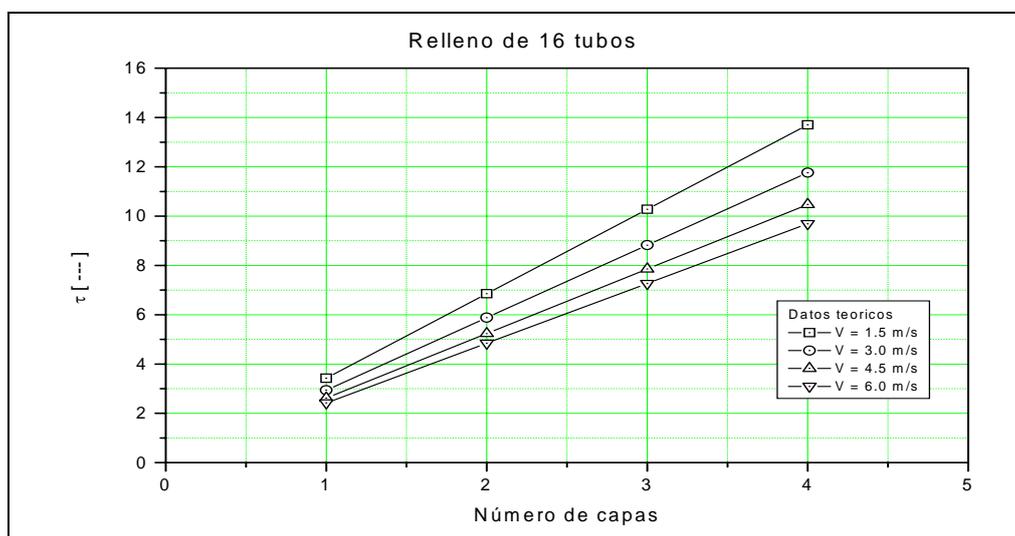


Fig. 8. Valores de  $\tau$  en función del número de capas.

#### 4.2. Pérdida de carga en el relleno de película

Como el relleno de película está conformado por placas planas paralelas, la pérdida de carga dependerá del tipo y comportamiento de la capa límite, como así también de la evolución del espesor de la capas límites y cuando éstas se unan, [2].

Es de destacar que el flujo interno considerado se desarrolla en conductos de sección no circular, ya que el aire se mueve entre las placas que conforman el relleno de película, a través de múltiples conductos de sección rectangular, Fig. 10.

El análisis de la resistencia de fricción en el caso de movimiento turbulento es complejo; no hay una única solución exacta. Las soluciones disponibles son, básicamente, generalizaciones de distribución de velocidad a lo largo de la capa límite, las cuales fueron determinadas experimentalmente y resultaran adecuadas según sea el caso considerado.

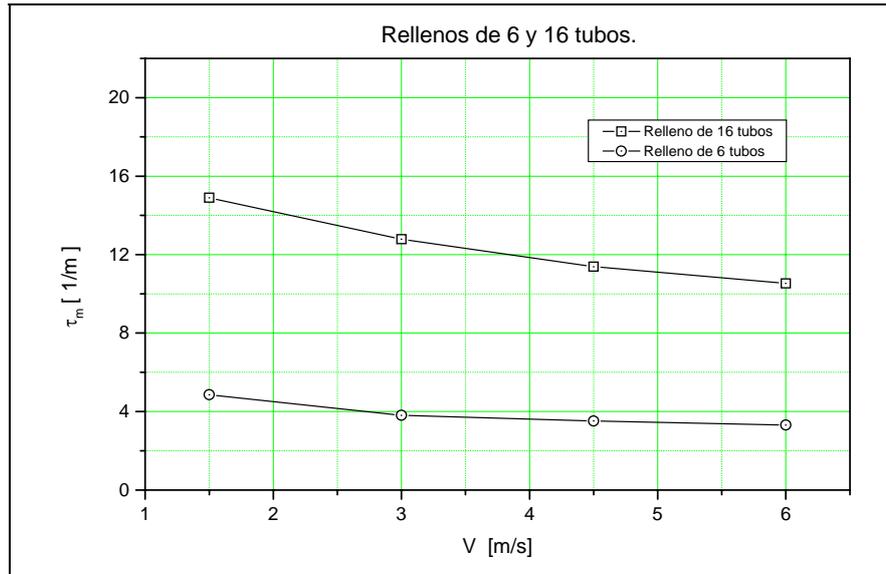
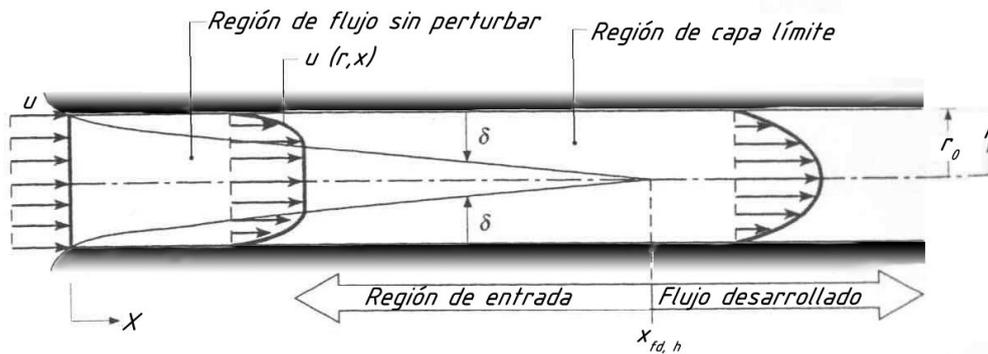
Fig. 9. Valores de  $\tau/m$  en función de la velocidad.

Fig. 10. Desarrollo de la capa límite en flujo interno.

Al evolucionar las capas límites de placas contiguas, se unen a una cierta distancia del comienzo de las placas del relleno. Ésta distancia se calculó en [2] mediante el análisis de las funciones del espesor de la capa límite según las velocidades; el análisis se realizó bajo la hipótesis de flujo turbulento. Luego de la unión de las capas límites, se consideró al flujo como completamente desarrollado.

El coeficiente de pérdida de carga en el relleno de película, en la zona de entrada, será función de las pérdidas producidas por fricción, la resistencia de impacto, que se estima en el orden del 5% del coeficiente de resistencia por fricción, por placa, y la resistencia que introducen los soportes de forma cilíndrica.

$$\tau_{pel} = \tau_f + \tau_{imp} + \tau_{sop} \quad (8)$$

A partir de las uniones de las capas límite, se consideró al flujo interno como flujo totalmente desarrollado en conductos de sección no circular [3] y [4]. En este caso la pérdida de carga se puede expresar:

Tabla 5. Pérdida de carga,  $\tau$ , para el relleno de película.

Capas de relleno	1 capa	2 capas	3 capas	4 capas
$V$	$\tau$	$\tau$	$\tau$	$\tau$
1.5	0.52	1.41	2.14	3.01
3	0.47	1.15	1.75	2.47
4.5	0.45	1.03	1.58	2.21
6	0.43	0.95	1.46	2.05

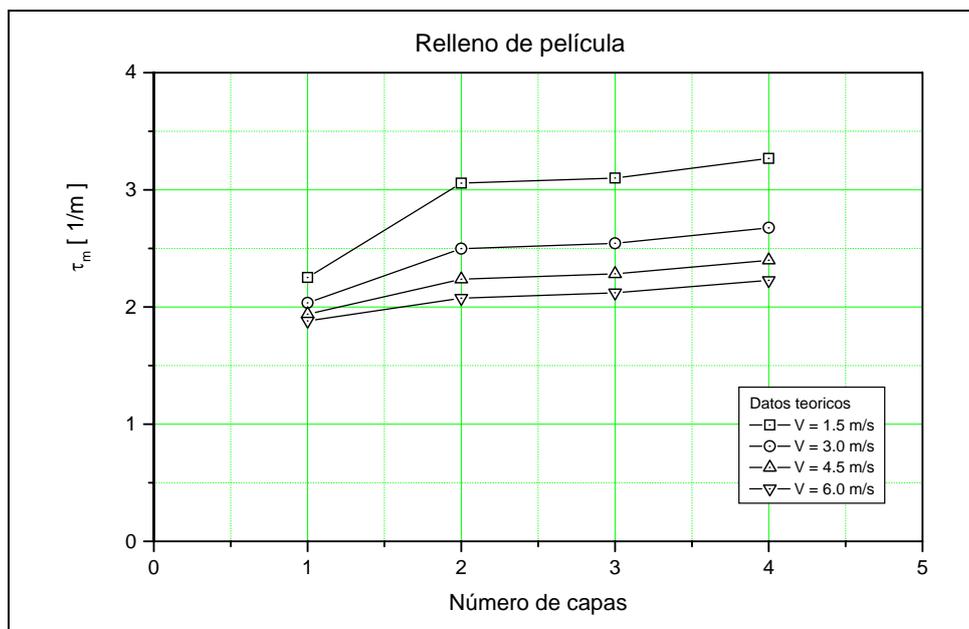


Fig. 11. Valores de  $\tau/m$  en función del número de capas, relleno de película.

$$\Delta P = 12 \cdot f \cdot q \cdot \frac{(L - x_u)}{D_e} \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

donde  $f$  es el coeficiente de fricción adimensional según Nikuradse, [4],  $L$  la longitud [m] del relleno,  $x_u$  [m] la longitud del tramo del flujo de entrada donde se unen las capas límite de las placas aledañas y  $D_e$  [m] el diámetro equivalente de la sección no rectangular. El factor 12 es consecuencia de que el relleno al poseer once placas divide la sección cuadrada en doce partes, de modo que se tienen once conductos de sección rectangular de dimensiones 20 por 230 mm.

Los valores de los coeficientes de pérdida de carga y pérdida de carga por metro ( $\tau/m$ ), para los distintos números de capas de rellenos y en función de la velocidad del aire, se muestran en Tabla 5 y Fig. 11, respectivamente.

### 5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PÉRDIDA DE CARGA

La determinación experimental de los coeficientes de pérdida de carga de los rellenos definidos y construidos en el Taller del Laboratorio del Departamento de Aeronáutica se realizó en dos tipos de instalaciones experimentales. Por un lado un banco de ensayos de rellenos, en el cual el flujo es muy uniforme y por otro lado en una instalación experimental similar a una torre de enfriamiento de agua mecánica del tipo de tiro inducido. Ambas instalaciones experimentales se utilizaron con el fin de analizar

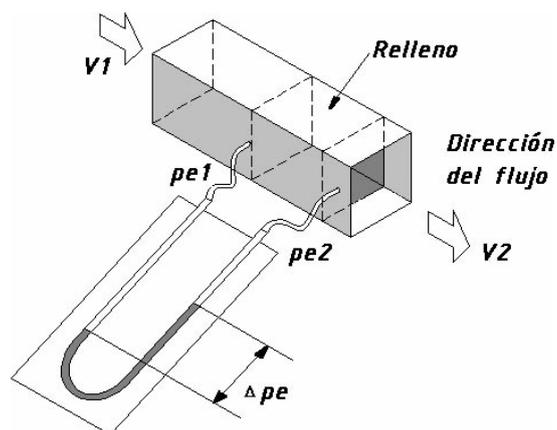


Fig. 12. Esquema para la medición de pérdida de carga dentro de un conducto.

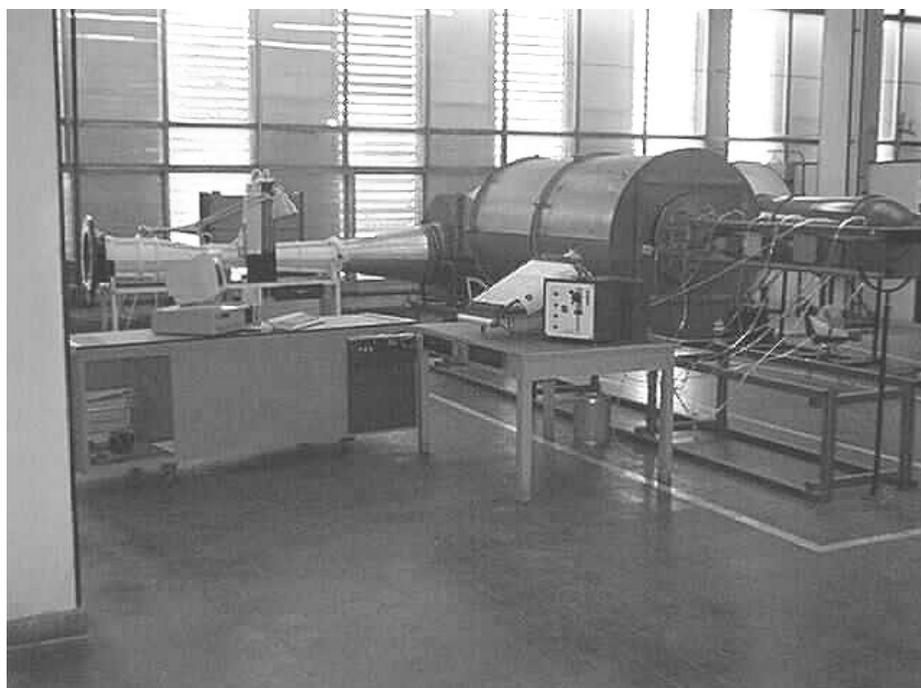


Fig. 13. Banco de ensayos.

y contrastar las predicciones efectuadas previamente bajo dos diferentes condiciones de flujo, uno muy uniforme como el que existe en el banco de ensayos y otro similar a las condiciones de operación en torres de enfriamiento de agua como el que se obtiene en la instalación experimental.

### 5.1. Banco de ensayos. Descripción

Para medir la pérdida de carga que producen los rellenos en un flujo uniforme se utilizó un banco de ensayos conformado por un sistema de generación y control de flujo de aire que descarga a través de un conducto recto, de sección uniforme, en cuyo interior se coloca el relleno del cual se determinará la pérdida de carga producida por el mismo, Fig. 12 [2,5].

Tabla 6. Valores de  $\tau$  y  $\tau/m$ , relleno de salpicado de dieciséis tubos.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$
1.58	4.52	19.66	1.72	7.99	17.37	1.43	12.07	17.49
3.08	3.94	17.14	2.84	7.64	16.61	2.81	11.30	16.38
4.59	3.74	16.24	4.24	7.26	15.79	4.27	10.77	15.60
6.16	3.65	15.85	5.91	6.60	14.33	5.52	9.79	14.19

Tabla 7. Valores de  $\tau$  y  $\tau/m$ , relleno de salpicado de seis tubos.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$
1.57	0.95	4.15	1.20	2.45	5.32	1.46	3.60	5.22
3.01	1.31	5.69	3.10	2.44	5.31	3.01	3.63	5.26
4.43	0.87	5.80	4.30	2.46	5.35	4.34	3.97	5.76
5.99	1.40	6.10	5.85	2.44	5.31	5.71	3.64	5.27

Tabla 8. Valores de  $\tau$  y  $\tau/m$ , relleno de película.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$	$V$	$\tau$	$\tau/m$
1.52	1.11	4.81	1.52	1.66	3.61	1.52	2.18	3.16
3.04	0.43	1.85	3.03	1.10	2.40	3.00	1.68	2.43
4.50	0.44	1.93	4.50	0.94	2.05	4.50	1.56	2.27
6.00	0.45	1.96	6.00	0.80	1.73	6.00	1.49	2.16

El sistema permite controlar el caudal del flujo de aire que ingresa al conducto mediante la velocidad de giro del ventilador centrífugo del banco, controlada por un variador digital de frecuencia. Una vista de la instalación utilizada se ve en Fig. 13.

El conducto de ensayo posee una sección cuadrada de 230 mm de arista interior y 1600 mm de longitud. La cara superior es desmontable para permitir colocar fácilmente los rellenos a ensayar y modificar su configuración. A lo largo del conducto hay once tomas de presión estática, a fin de determinar la variación de presión estática que cada relleno produce. Una sonda de presión total esta posicionada en la boca de entrada del conducto con el objeto de medir la velocidad del aire en el ingreso al mismo.

### 5.1.1. Resultado de los ensayos

Las velocidades adoptadas para los ensayos fueron: 1.5, 3, 4.5, 6 m/s y los valores de presión y velocidad relevados durante los ensayos fueron registrados en planillas de cálculo para determinar los valores corregidos a medida que se realizaba el ensayo, facilitando el seguimiento del mismo. En forma simultánea se realiza el procesamiento de los datos.

En Tablas 6 y 7 se presentan los valores obtenidos del coeficiente de pérdida de carga ( $\tau$ ) y de pérdida de carga por unidad de longitud ( $\tau/m$ ), para los rellenos de dieciséis y seis tubos, respectivamente, en función del número de capas de relleno de salpicado y en Tabla 8 los correspondientes al relleno de película, con capas intercaladas.

### 5.2. Instalación experimental. Descripción

La instalación experimental, Fig. 14, es similar a una torre del tipo de tiro inducido a contracorriente, esto significa que es una torre que cuenta con un ventilador en su parte superior y la máxima altura de re-



Fig. 14. Torre experimental.

Tabla 9. Valores de  $\tau$  y  $\pi/m$ , relleno de salpicado de dieciséis tubos.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$
1,70	4,16	16,64	1,70	8,32	16,64	1,79	11,96	15,94
3,00	4,13	16,50	2,97	8,01	16,01	2,98	11,56	15,41
3,91	4,18	16,72	3,91	7,80	15,61	3,91	11,22	14,96
4,73	4,01	16,04	4,72	7,64	15,29	4,73	11,00	14,66

Tabla 10. Valores de  $\tau$  y  $\pi/m$ , relleno de salpicado de seis tubos.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$
1,77	1,43	5,72	1,79	3,03	6,06	1,82	4,86	6,48
3,01	1,52	6,06	3,03	3,04	6,09	2,99	4,87	6,49
3,95	1,61	6,43	3,93	3,22	6,44	3,94	4,92	6,57
4,74	1,64	6,56	4,77	3,20	6,39	4,73	4,73	6,31

Tabla 11. Valores de  $\tau$  y  $\pi/m$ , relleno de película.

1 capa			2 capas			3 capas		
$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$	$V$	$\tau$	$\pi/m$
2,11	0,60	2,40	2,12	1,01	2,01	2,12	1,43	1,90
3,16	0,56	2,26	3,18	0,97	1,93	3,18	1,34	1,79
4,01	0,51	2,04	4,03	0,89	1,77	4,00	1,31	1,75
4,79	0,61	2,43	4,81	0,99	1,99	4,79	1,34	1,78

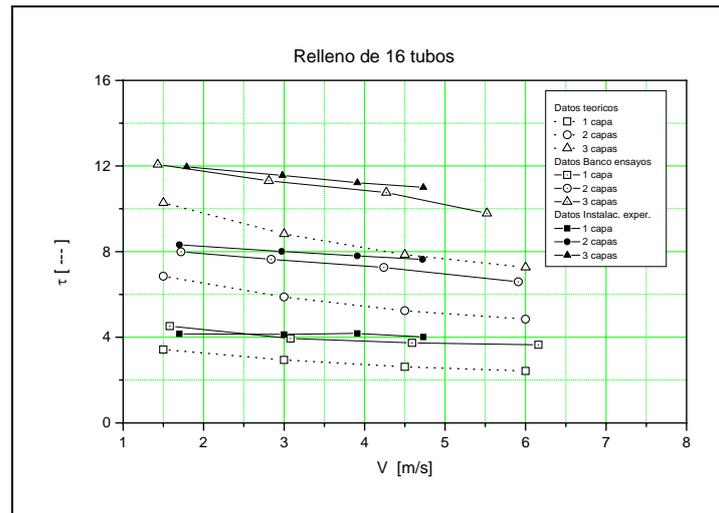


Fig. 15. Coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad.

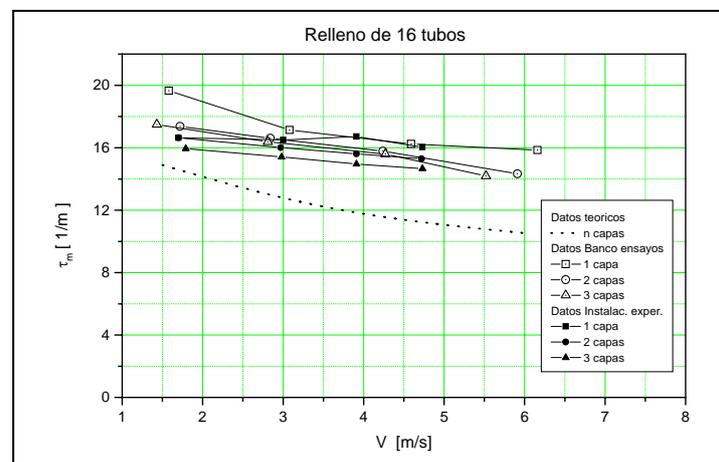


Fig. 16. Coeficiente de pérdida de carga por metro, en función de la velocidad.

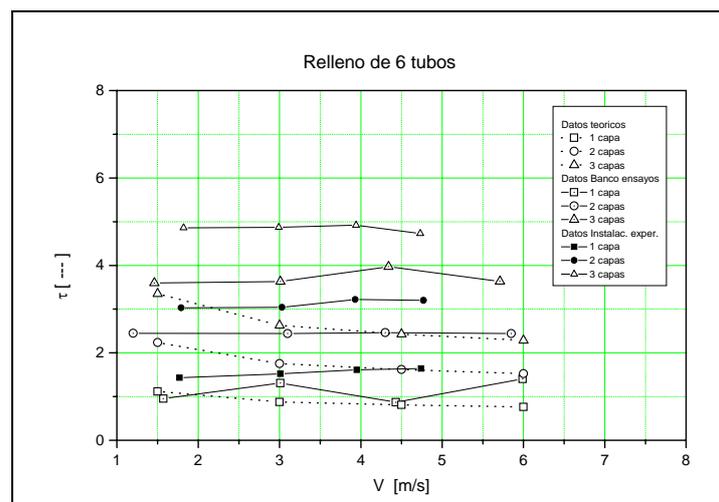


Fig. 17. Coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad.

relleno que se puede utilizar en ella es de 750 mm, lo cual corresponde a tres capas de relleno comercial, del orden de 250 mm de altura. La sección transversal de la torre es cuadrada, de 750 mm por 750 mm, lo que conforma una sección de trabajo de  $0.56 \text{ m}^2$  [6].

El sistema impulsor de aire consta de una zona tranquilizadora del flujo de aire, un convergente, un ventilador axial y un difusor de aire, calibrados en conjunto respecto a velocidades y saltos de presión con la torre de enfriamiento de agua para establecer de esta manera la presión interna y el caudal de aire con el que se trabaje en cada instante durante los ensayos.

### 5.2.1. Resultado de los ensayos

En Tablas 9 y 10 se presentan los valores obtenidos del coeficiente de pérdida de carga y de la pérdida de carga por unidad de longitud del relleno aislado, en función del número de capas de relleno para el relleno de dieciséis y seis tubos, respectivamente y en Tabla 11 los correspondientes al relleno de película.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En Fig. 15 se han graficado los valores del coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad del flujo de aire, para el relleno de salpicado de dieciséis tubos, obtenidos mediante la predicción empírica y las evaluaciones experimentales en el banco de ensayos de rellenos y en la torre de enfriamiento. Se observa que el comportamiento o variación de  $\tau$  es bastante similar en función de la velocidad y que ambos valores experimentales son bastante similares cuantitativamente, en particular, para un número de capas mayor que uno.

Los valores predichos son ligeramente inferiores a los valores experimentales, probablemente se subestimó el coeficiente de pérdida de carga de los cilindros o no se ponderó correctamente los parámetros de similitud que gobiernan el proceso, a saber: Número de Reynolds, rugosidad superficial o factor de turbulencia del flujo libre.

El coeficiente de pérdida de carga por metro permite tener una visión ampliada de las discrepancias, o no, mencionadas para  $\tau$ . En la Fig. 16 se muestran los valores de  $\tau/m$  predichos y los obtenidos experimentalmente, se aprecia la diferencia cuantitativa mencionada precedentemente para el coeficiente de pérdida de carga y se corrobora el comportamiento en función de la velocidad y del número de capas.

En Fig. 17 se ha graficados los valores del coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad del flujo de aire, para el relleno de salpicado de seis tubos, obtenidos mediante la predicción empírica y las evaluaciones experimentales en el banco de ensayos de rellenos y en la instalación experimental similar a una torre de tiro inducido. Para este relleno, si bien el comportamiento de  $\tau$  en función de la velocidad sigue siendo similar, las diferencias cuantitativas en el valor del coeficiente de pérdida de carga, entre los diferentes métodos de obtención son más marcadas, probablemente las diferencias en la similitud de los fenómenos sea mayor que en el caso del relleno de dieciséis tubos. El hecho de tener menor obstrucción al paso del aire el relleno de seis tubos da mayor preponderancia a las condiciones del flujo que embiste los cilindros.

El coeficiente de pérdida de carga por metro, Fig. 18, muestra un comportamiento relativamente ordenado excepto por la discrepancia más marcada que presentan los datos experimentales a bajas velocidades de aire, esto último como consecuencia de los bajos valor de presión leídos para ese rango de velocidades; asimismo se puede apreciar la diferencia entre los valores predichos y los obtenidos experimentalmente.

Para el relleno de película la correspondencia entre los valores experimentales y los predichos es bastante buena, Fig. 19. La mayor discrepancia se produce a bajas velocidades y para el menor número de placas de relleno, probablemente al bajo valor de las presiones a medir para esas condiciones. El mismo comportamiento se produce para el coeficiente de pérdida de carga por unidad de longitud, Fig. 20.

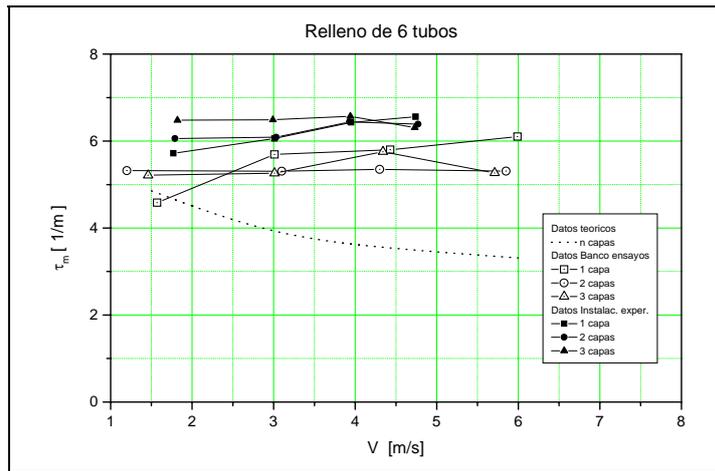


Fig. 18. Coeficiente de pérdida de carga por metro, en función de la velocidad.

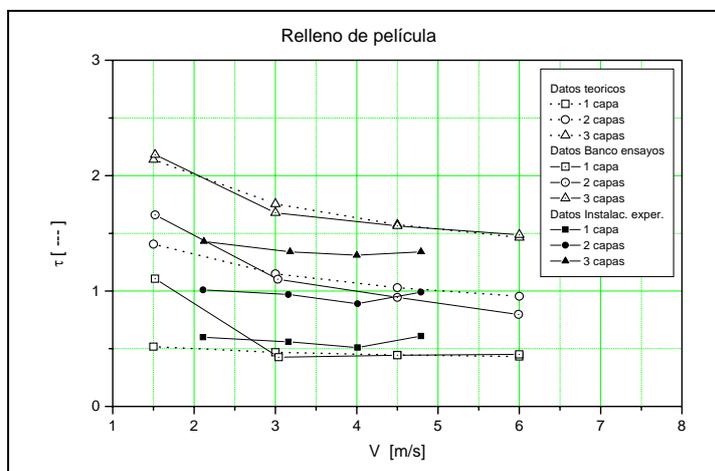


Fig. 19. Coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad.

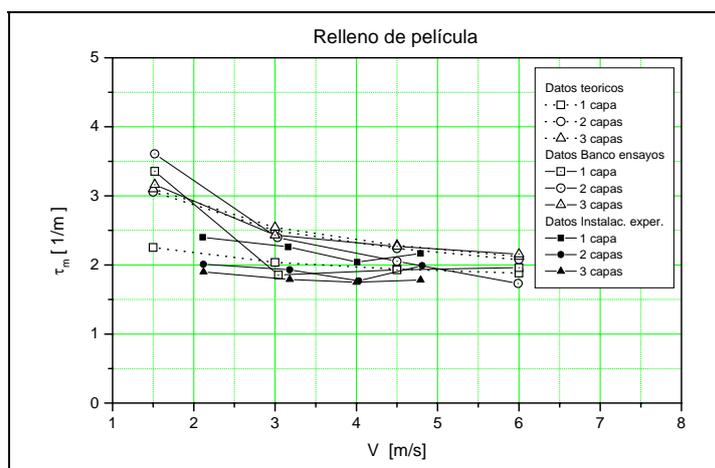


Fig. 20. Coeficiente de pérdida de carga por metro, en función de la velocidad.

## 7. CONCLUSIONES

El comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad del flujo de aire es bastante similar en los tres métodos seguidos para su obtención si bien difieren en los valores absolutos, probablemente como consecuencia que los parámetros de similitud que gobiernan el fenómeno no son los mismos.

Ello resulta satisfactorio pues garantiza que los valores que se obtuvieron en la torre experimental son válidos y podrán ser utilizados para validar la utilización del parámetro calidad electro-mecánica de torres de enfriamiento de agua en trabajos posteriores, porque se respetaran las condiciones de similitud en esa circunstancia.

## REFERENCIAS

- [1] Sirena, J.A., "The use of an Electrical-Fluid Dynamic parameter in cooling towers", *American Power Conference Proceedings*, Session 46, 867-870 (1999)
- [2] Najle, P.E., "Pérdida de carga en superficies evaporativas", Escuela de Ingeniería Mecánica Aeronáutica. Universidad Nacional de Córdoba (2008)
- [3] Fox, R., McDonald, A., *Introducción a la mecánica de los fluidos*, McGraw Hill México, segunda edición, (1995)
- [4] Schlichting, H., *Teoría de la capa límite*, Urmo (1972)
- [5] García, J., Sirena, J.A., "Método para la determinación experimental de la pérdida de carga en rellenos de torres de enfriamiento", Univ. Nac. de Córdoba, Fac. de Ciencias Exactas, Fís. y Nat. - Depto. de Aeronáutica, Informe Técnico (2000)
- [6] Sirena, J.A., Cogott, H.G., " Evaluación experimental de superficies evaporativas de torres de enfriamiento de agua", Depto. de Aeronáutica, Facultad de C. E. F. y Nat., U.N.C. (2004)

## PREDICTION AND EMPIRICAL EVALUATION OF LOSS COEFFICIENT OF WATER COOLING TOWER FILLS

**Abstract** – In this paper it is presented the analytical predictions of the loss coefficient of various basic geometric shapes of water cooling tower fills, film and splash type, and subsequent experimental measurements in two test facilities ad-hoc. It also analyzes the loss coefficient per unit length of fill, coefficient with which the comparison is improved between the results.

**Keywords** – Water cooling towers, Fill, Pressure drop, Loss coefficient, Splash fill, Film fill.