

Estimación del Coeficiente Aerodinámico para Chimeneas en Túneles de Viento

D. Torres Bello¹, M. Nozaki Uribe² y P. Fuentes Aguilera³

RESUMEN

El coeficiente aerodinámico corresponde a la velocidad relativa de la corriente de aire incidente sin perturbar, la cual depende de la forma del cuerpo. Este se obtiene de forma experimental en túneles de viento, siendo indispensable para calcular la resistencia aerodinámica de una estructura. Para obtener el coeficiente aerodinámico se realizaron mediciones de velocidad y fuerza utilizando el túnel de viento de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Por medio de estas mediciones se estimó el coeficiente aerodinámico y se compararon los resultados con los valores descritos en la literatura. El coeficiente obtiene un buen ajuste entre los valores experimentales y los teóricos, validando el método de medición. Finalmente se comparó el coeficiente aerodinámico con los valores de la norma NCh 432.Of1971 y el código ASCE 7-10, estableciendo que el coeficiente es sobreestimado en dicha normativa y código. Se concluye que las cargas aplicadas están subestimadas debido al poco conocimiento del desprendimiento de torbellino y galope transversal.

ABSTRACT

The aerodynamic coefficient corresponds to the relative speed of the unperturbed incident air stream, which depends on the shape of the body. This is obtained experimentally in wind tunnels, being essential to calculate the aerodynamic resistance of a structure. To obtain the aerodynamic coefficient, velocity and force measurements were made using the wind tunnel of the Catholic University of the Santísima Concepción. By means of these measurements the aerodynamic coefficient was estimated and the results were compared with the values described in the literature. The coefficient obtains a good fit between the experimental and the theoretical values, validating the measurement method. Finally, the aerodynamic coefficient was compared with the values of the NCh 432.Of1971 standard and the ASCE code 7-10, establishing that the coefficient is overestimated in said regulations and code. It is concluded that the applied loads are underestimated due to the little knowledge of whirlwind detachment and transversal gallop.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dotorres@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Macrosteel - Soluciones Integrales de Ingeniería, Chacabuco 485, 5to piso, Concepción, CHILE, minornozaki@gmail.com

² Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, pifuentes@ing.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El viento en Chile es un factor considerable a la hora de diseñar cualquier estructura. Debido a esto, se realizan estudios a las estructuras para evaluar el comportamiento de estas y proporcionar un diseño cada vez más óptimo. Este diseño lo estudia La aeroelasticidad que está dentro de la gama de fenómenos aeroelásticos, es la que estudia con un especial interés, la interacción entre el movimiento de la estructura y el aire circulante a través de ella (Moreno Regan, 2008) Para estos estudios, de manera experimental se utilizan principalmente túneles de viento, empleados en diferentes campos como lo son el automovilismo y la aeronáutica (Moreno Regan, 2008) La rama de la aerodinámica que se encarga de estudiar los efectos del viento sobre estructuras y construcciones se denomina aerodinámica civil. Uno de los tópicos más importantes en la aerodinámica civil es el coeficiente aerodinámico, que relaciona la fuerza que genera el viento sobre la estructura, con la velocidad del mismo. El presente estudio aborda la forma de realizar mediciones de velocidades y fuerzas provocadas por viento sobre estructuras esbeltas de sección tanto circular como rectangular, con el fin de obtener el coeficiente aerodinámico y compararlo con la norma NCh 432.Of1971 y la ASCE 7-10, que son ampliamente utilizadas en Chile.

El objetivo de este trabajo es estudiar mediante ensayos de túnel de viento relaciones entre los coeficientes aerodinámicos experimentales y el de la norma NCh 432.Of1971 utilizada en Chile y la ASCE 7-10 que se emplea en Estados Unidos, en estructuras de sección circular y cuadrada con diferentes alturas, sometidas las cargas de viento. Se omitió el uso de la norma NCh 432.Of2010 debido a que no se incluyó información relevante a este artículo. Adicionalmente los objetivos específicos de este trabajo son: implementar instrumentos de medición en túnel de viento dado la norma a analizar en relación a la acción del viento, determinar el rango de velocidades para la obtención de los coeficientes aerodinámicos según la sección ensayada y determinar las propiedades de la estructura sometida a cargas de viento mediante un análisis teórico, para comparar los datos

2. MÉTODOS

2.1. Túnel de Viento

El túnel de viento es una herramienta muy utilizada para el estudio experimental de los efectos del aire en estructuras o cuerpos sólidos. En la Figura 1 se muestra el túnel de viento utilizado, el cual es de tipo abierto y subsónico ($Mach < 0,3$) (Cifuentes, 2017). Este túnel, como muestra la Figura 2, posee distintas secciones. Los datos se obtienen en la sección de prueba (Figura 2) debido a que en esta zona las mediciones son más estables (Garcés, 2009).



Figura 1: Túnel de viento de la UCSC.



Figura 2: Diagrama de las secciones del Túnel de Viento.

El túnel de viento utilizado posee un servomotor como el que se muestra en la Figura 3. Éste corresponde a un servomotor modelo YBL17B-200L.Z y una hélice de 9 palas con el cual se genera el input de viento (Cifuentes, 2017). El motor puede utilizar inputs que varían entre las 2000 y las 8000 $\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$. Inputs inferiores a las 2000 $\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$ no permiten registrar datos, mientras que los inputs superiores a las 8000 $\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$ activan la medida de seguridad del motor, deteniendo su funcionamiento.



Figura 3 Servo Motor y Hélice de Túnel de viento.

A continuación, se definirán conceptos básicos tanto de mecánica de fluidos como de ingeniería estructural, que son la base para el posterior análisis de este artículo.

2.2. Capa Límite

La capa límite de un fluido es la capa que se ve perturbada por la presencia de un sólido con el que encuentra en contacto. Esta capa puede ser laminar o turbulenta. La primera de ellas posee menor resistencia al movimiento en comparación a la segunda (Moreno Regan, 2008).

2.2.1. Flujo laminar

Es el movimiento de un fluido cuando este es perfectamente ordenado, es decir, el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse entre otros planos paralelos, en donde el mecanismo de transporte es exclusivamente molecular (Moreno Regan, 2008)

2.2.2. Flujo Turbulento

Es la corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, este tipo de flujo ocurre cuando las velocidades de flujo son muy altas o en donde las fuerzas viscosas son muy pequeñas, es decir, la turbulencia puede producirse por el paso del fluido sobre las superficies justo en sus fronteras, o por el flujo de capas a diferentes velocidades haciendo que forme vórtices en la capa límite, generando discontinuidades bruscas en las paredes del túnel de viento (Moreno Regan, 2008).

2.2.3. Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es un instrumento que permite medir el flujo de forma experimental, tal como se muestra en la Figura 4, este es una de las mediciones más exactas para medir la velocidad de un fluido, este consiste en un tubo con un diámetro el cual tiene una abertura

delantera, el cual se dispone contra un flujo de forma que este choque de manera frontal en el orificio del tubo.

El tubo Pitot mide la diferencia entre la presión total y la presión estática que es proporcional al cuadrado de la velocidad (Lascano & Velázquez Pérez, 2008).

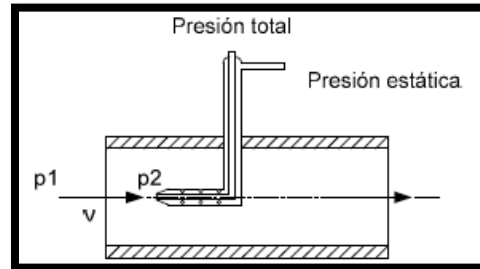


Figura 4: Tubo de Pitot (Lascano & Velázquez Pérez, 2008).

2.3. Números Adimensionales

A continuación, se definirán los siguientes números adimensionales los cuales son el número de Reynolds y el número de Mach.

2.3.1. Numero de Reynolds

El número de Reynolds el cual se muestra en la Ec. 1. Éste es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Las variables que relaciona son: velocidad (v) longitud de trayectoria del flujo (D), densidad del flujo (ρ) y la viscosidad dinámica del fluido (μ).

$$N_r = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho * D * V}{\mu} \quad \text{Ec. 1}$$

2.3.2. Numero de Match

El número de Mach, el cual se aprecia en la Ec. 2, relaciona la inercia con la compresibilidad del objeto, en donde se vinculan la velocidad del flujo en relación a la velocidad que alcanza el fluido en cuestión, vale decir la velocidad del objeto y la velocidad del sonido, (Cifuentes, 2017). Las variables más importantes son la velocidad local (v) y la velocidad del sonido (c), las cuales permiten este desarrollo.

$$N_m = \frac{\text{Inercia}}{\text{Compresibilidad}} = \frac{v}{c} \quad \text{Ec. 2}$$

2.4. Factor de escala

En los ensayos experimentales de flujo como el analizado en el presente estudio (aire), para obtener una buena relación, entre el modelo y el prototipo de una estructura a analizar, se debe tener en cuenta las siguientes semejanzas:

2.4.1. Semejanza Geométrica

dos fenómenos son geoméricamente semejantes si todas las correspondientes dimensiones lineales que los caracterizan son proporcionales. Esta semejanza viene dada por la longitud característica referencial (L_r), la cual es igual a la longitud característica del modelo (L_m) dividido por la longitud característica del prototipo (L_p), esto viene dado por la Ec. 3.

$$L_{referencia} = \frac{L_{modelo}}{L_{prototipo}} = \frac{L_m}{L_p} = L_r \quad \text{Ec. 3}$$

2.4.2. Semejanza Cinética

Se cumple si las trayectorias de las partículas móviles son geoméricamente semejantes, y si las relaciones entre las velocidades de las partículas son iguales, es decir, la velocidad característica de referencia ($V_{referencia}$) es igual a la velocidad característica del modelo (V_{modelo}) dividido por la velocidad característica del prototipo ($V_{prototipo}$).

Por medio de estas relaciones también se puede obtener el tiempo característico del modelo (T_m), como el tiempo característico del prototipo (T_p). Esta definición se aprecia en la Ec. 4.

$$V_{referencia} = \frac{V_{modelo}}{V_{prototipo}} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_p}{T_p}} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{L_r}{T_r} \quad \text{Ec. 4}$$

2.4.3. Semejanza Dinámica

Las condiciones de semejanza se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton, donde todas las fuerzas actúan (fuerzas viscosas, gravitatorias, etc.), es decir, la fuerza característica referencial (F_r) toma en cuenta todas las fuerzas que actúan en donde convergen la fuerza característica del modelo (F_{modelo}) dividido con la fuerza característica del prototipo ($F_{prototipo}$), estas relaciones se desarrollan en la Ec. 5.

$$F_r = \frac{F_{modelo}}{F_{Prototipo}} = \frac{M_m * a_m}{M_p * a_p} = \frac{\rho_m * L_m^3 * L_r}{\rho_p * L_p^3 * T_r^2} = \rho_r * L_r^2 * \left[\frac{L_r}{T_r} \right]^2 \quad \text{Ec. 5}$$

2.4.4. Criterio de semejanza por Numero de Mach

Para este caso, al ser subsónico el túnel de viento, el número de Mach es una buena referencia para obtener la velocidad real que se aplicó a las estructuras. Esta relación se muestra en la Ec. 6.

$$V_m = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}}} * \sqrt{\frac{E_m}{\rho_m}}$$

Ec. 6

2.5. Medición de la velocidad

Para obtener la velocidad se realizaron mediciones con un anemómetro como el que se muestra en la Figura 5. Las mediciones se realizaron en tramos de 10 cm a lo largo de la altura de las estructuras analizadas, con el fin de obtener el perfil de velocidades.

En cada medición se mantuvo fijo el instrumento para evitar vibraciones debido al viento. Se midió tanto a la entrada de la sección de prueba como a la salida, que se denotan como *E* y *S* en la Figura 2, respectivamente Figura 5. Además de esto, se aplicaron distintos inputs de viento con el fin de obtener distintas mediciones de velocidades.



Figura 5: Medición de la velocidad a diferentes alturas.

2.5.1. Anemómetro

Se utilizó un anemómetro digital de lcd Portatil gm8901, el cual posee una sonda de molinete conectado a la unidad principal como se muestra en la Figura 6. El equipo utilizado posee una medición de la velocidad de 0 a 45 m/s, además de un modo de velocidad de viento que es: La velocidad actual, la máxima y mínima del viento. La sensibilidad del equipo es de $0.1 \frac{m}{s}$.



Figura 6: Anemómetro utilizado en este estudio.

2.6. Medición de la fuerza sobre la estructura

Para la medición de la fuerza, se utilizó una balanza digital como la de la Figura 8, con un carro unido a esta con una hebra de manera unidireccional para así disminuir la fricción como se muestra en la Figura 7. El objetivo de esto fue registrar su fuerza para las distintas estructuras, utilizando diferentes inputs para obtener distintas mediciones de fuerza.



Figura 7: Mecanismo para la medición de fuerza.

2.6.1. Balanza Digital

Se utilizó una balanza digital EBalance 50 kg mini LCD, la cual es una báscula digital de mano utilizada para la medición de la fuerza, como se muestra en la Figura 8. Ésta posee un rango de medición entre 0.010 hasta 50 kg con una precisión de 0.02 kg.



Figura 8: Balanza digital.

2.7. Fuerza de fricción o de rozamiento

La fuerza de fricción es la fuerza que hay que vencer para mover un cuerpo con respecto a otro los cuales están en contacto (Perez, 2009), Esta fuerza no es la misma cuando están en reposo y cuando está en movimiento estas vienen descritas a continuación.

2.7.1. Fuerza de fricción estática

La Fricción estática es la fuerza de resistencia que se opone al inicio del movimiento y que se da cuando los objetos están en reposo, es decir, la que se produce por debajo del umbral de movimiento (Rios, 2005).

2.7.2. Fuerza de fricción dinámica

La fuerza de fricción dinámica es la fuerza de resistencia al movimiento que se da cuando los objetos ya están en movimiento, en donde es necesario aplicar menos fuerza para mantener el objeto en movimiento que para el inicio, (Harris, 2014).

2.8. Coeficiente aerodinámico (C_D)

Uno de los aspectos más importantes a la hora de diseñar vehículos o estructuras como chimeneas o silos, es el coeficiente aerodinámico (C_D), el cual se define en la Ec. 7. El coeficiente aerodinámico se puede obtener tanto de manera experimental como utilizando la norma NCh 432 Of1971 como el código ASCE 7-10, el C_D corresponde a la resistencia que ofrece un cuerpo en el momento en que se mueve dentro de un fluido por razón de su forma (Munson, Young, & Okiishi, 1999), en donde (F) es la fuerza, (ρ) es la densidad del aire, (v) es la velocidad sin perturbación en el aire y (S) es la superficie en donde se aplica el aire

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * S} \quad \text{Ec. 7}$$

El coeficiente aerodinámico no es utilizado propiamente tal, sino que tanto en la norma NCh 432 Of1971 como en el código ASCE 7-10 se usa el coeficiente de forma lo cual para medidas prácticas es lo mismo. Estos dependen del tipo de construcción de la estructura, los materiales utilizados (hormigón o acero), si son estructuras lisas o rugosas y también del punto analizado de la estructura.

2.9. Comparación con la Norma NCh 432 Of1971

La norma NCh 432.Of1971 también llamada “Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones”, revisa el procedimiento al utilizar el viento y los cálculos de resistencia en cualquier tipo de construcción. El factor de forma C , presentado en la norma NCh 432.Of1971, posee una relación con el coeficiente aerodinámico en correlación a las estructuras de sección transversal circular.

La estructura de sección transversal circular está relacionada con las chimeneas industriales, tuberías de gas, etc, tal como se muestra en la Figura 9.



Figura 9: Torre de la siderúrgica huachipato.

Las estructuras rugosas cumplen la Ec. 10 y las estructuras lisas cumplen con la Ec. 11. Estos valores obtenidos de la norma son comparados con los valores extraídos de manera experimental con el fin de poder obtener sus relaciones.

$$\frac{diámetro}{\sqrt{Presión}} > 100 ; C = 0.7 \quad \text{Ec. 8}$$

$$\frac{diámetro}{\sqrt{Presión}} < 100 ; C = 0.55 \text{ en Tuberías Lisas} \quad \text{Ec. 9}$$

2.10. Comparación con la Codigo ASCE 7-10

El código ASCE 7-10 cuyas siglas significa *American Society of Civil Engineers* el cual se encarga de revisar todo lo necesario para el diseño por tensiones admisibles(ASD) y del diseño por factores de carga y resistencia(LFRD).

Para este estudio se revisaron los factores de forma que permiten realizar una comparación directa con los datos obtenidos experimentalmente, estos datos son los que se obtienen de capítulo 29, cargas de viento en otras estructuras y accesorios de construcción (ASCE 7-10).

2.11. Importancia del coeficiente aerodinámico

En el diseño de estructuras de sección circular se calcula el empuje del viento en la estructura el cual viene definido a continuación:

$$W = C * P \quad \text{Ec. 10}$$

Donde C es el coeficiente de forma multiplicado por sección transversal diametral y P es la presión total ejercida en la pared siendo estos datos relevantes a la hora de diseñar chimeneas industriales. Una correcta estimación del coeficiente aerodinámico permite estimar de manera correcta la carga de viento, permitiendo así que al diseñar se tome en consideración tanto la seguridad de la estructura como el costo de ella asociado a diseño.

2.12. Consideraciones para la utilización del túnel de viento

1)El túnel de viento de la UCSC posee distintas características entre las cuales se encuentra su motor. De este motor es capaz de producir distintas revoluciones, de las cuales, los instrumentos utilizados no se pueden distinguir valores inferiores a las 2000 pulsaciones por segundo.

2)Aunque se realizaron ensayos con tubos de Pitot, no fue posible obtener resultados cuantificables, debido a que, la densidad del agua es mucho mayor a la del aire y no se produjeron diferencias de alturas dentro del tubo de Pitot. Además, debido a las características del túnel de viento utilizado, no fue posible obtener presiones de manera experimental, a diferencia de túneles de viento a menor escala.

3) Las mediciones a lo largo de los modelos a escala, las cuales fueron realizadas en tramos de 10 cm. Esto permitió comprobar la velocidad a distintas alturas, con el fin de obtener un promedio de estas.

4) Se realizaron varias mediciones, con el fin de conocer la sensibilidad de la balanza digital esta medida permitió saber que los datos a partir de las 6000 pulsaciones por segundo son congruentes, debido a que inputs inferiores a este, la balanza digital no registra datos.

5) La rigidez utilizada para el modelo es la del acero basándose en la literatura para obtener el módulo de Young, por otro lado la rigidez del prototipo está apoyada de los datos experimentales (Cifuentes, 2017) teniendo en cuenta que se utiliza una escala de 1:50 obteniéndose una altura de 75 m.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1 se detallan las velocidades reales en las estructuras obtenidas, utilizando la Ec. 6 y los E_p experimentales (Cifuentes, 2017), las cuales concuerdan con la norma NCh 432.Of1971.

Tabla 1: Velocidades reales en los diferentes perfiles.

Vel Promedio	Em Acero	Ep Cajón	Ep Circular	$\rho_m = \rho_p$	Vel. Real Cajón	Vel. Real Circular
$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	$\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	$\left[\frac{kg}{cm^3}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$
5.745	2.10E+06	5.07E+04	5.18E+04	1.225	36.986	36.572
6.150	2.10E+06	5.07E+04	5.18E+04	1.225	39.593	39.150
6.805	2.10E+06	5.07E+04	5.18E+04	1.225	43.810	43.320
7.395	2.10E+06	5.07E+04	5.18E+04	1.225	47.609	47.076

Se realizaron mediciones desde las 2000 $\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$ hasta las 8000 $\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$, en la Figura 10 se muestra el resultado de las mediciones de velocidad en el perfil circular, mientras que en la Figura 10 b se aprecia el resultado de las mediciones de velocidad sobre el perfil cajón. Estos datos son obtenidos directamente del túnel de viento, con el fin de observar el comportamiento de las estructuras desde un punto de vista de la velocidad, permitiendo así obtener el perfil de velocidades de cada input de viento usado.

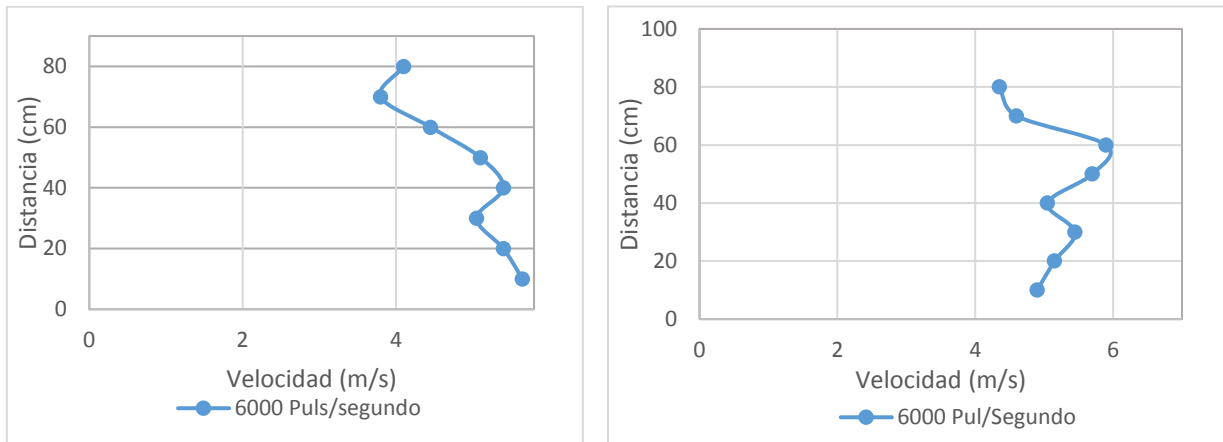


Figura 10: Gráficas de la variación de velocidad a) sobre perfil circular y b) sobre perfil cajón. Ambas para $6000 \frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}$.

Se realizaron mediciones de fuerza a través de la pesa digital descrita anteriormente, cuyos resultados, para el perfil circular, se encuentran en la Tabla 2. El variación obtenida en las mediciones con respecto al valor promedio se aprecia en la Tabla 2, estos datos permiten analizar que el método de medición resulta inadecuado para valores extremos. En inputs bajos de viento no se obtienen resultados cuantificables debido a la precisión de los equipos utilizados, mientras que, para inputs mayores, las diferencias se asocian a las turbulencias generadas dentro del túnel de viento.

Tabla 2 Fuerzas en Perfil Circular

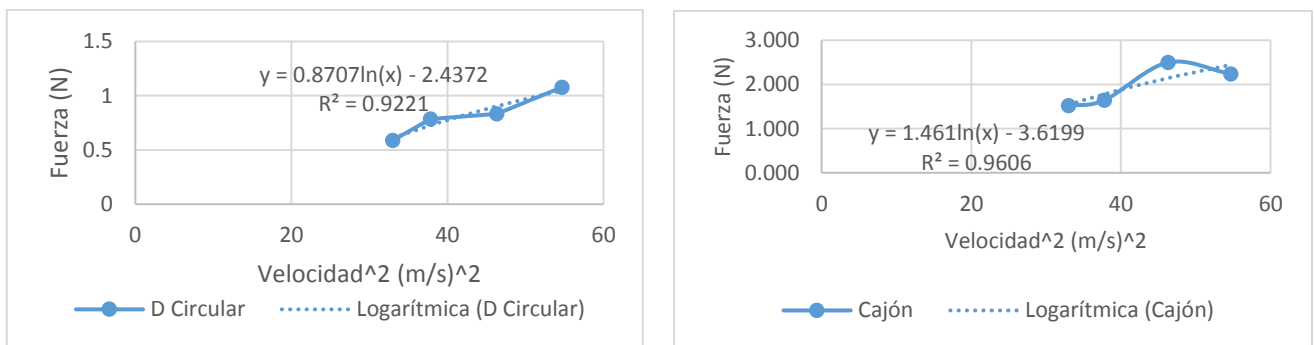
$\left[\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}} \right]$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	F. Max [N]	F. Min [N]	F. Promedio [N]	Des. Estándar
6000	5.150	0.065	0.045	0.054	31%
6500	5.745	0.065	0.06	0.063	8%
7000	6.150	0.095	0.08	0.085	16%
7500	6.805	0.085	0.07	0.078	18%
8000	7.395	0.12	0.11	0.115	8%
8500	7.805	0.15	0.115	0.132	23%

Tal como en el caso anterior, en la Tabla 3 se resumen los resultados de las mediciones de fuerza del perfil cajón. A diferencia del caso anterior si es posible medir la fuerza para todos los inputs de viento generados. Esto es debido a la forma que tiene el cajón ya que este opone una mayor resistencia al viento en comparación al perfil circular.

Tabla 3: Resumen de Fuerzas en Perfil Cajón.

$\left[\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}\right]$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	F. Max [N]	F. Min [N]	F. Promedio [N]	Desv. Estándar
6000	5.150	0.12	0.11	0.114	8%
6500	5.745	0.17	0.15	0.155	12%
7000	6.150	0.175	0.16	0.168	9%
7500	6.805	0.26	0.25	0.255	4%
8000	7.395	0.235	0.21	0.228	11%
8500	7.805	0.285	0.265	0.277	7%

Dado la variación de las mediciones se optó por no utilizar los valores extremos, luego se buscó una relación significativa entre la fuerza y la velocidad (Harris, 2014), dado que el Coeficiente aerodinámico las relaciona permite esto obtener lo siguiente.


Figura 11: Gráficas de la relación entre la fuerza medida y de la velocidad a) sobre perfil circular y b) sobre perfil cajón.

Dados los resultados de la Figura 11 y que poseen una buena correlación entre ellos, permitió obtener la fuerza de fricción estática. Esto permitió obtener la fuerza faltante que impedía el movimiento, aunque se estuviera aplicando una cierta velocidad tanto para el perfil circular como para el perfil cajón estos resultados vienen mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Velocidad en relación a la fuerza tanto para el perfil circular como para el perfil cajón.

$\left[\frac{\text{Pulsaciones}}{\text{segundo}}\right]$	F de P. Circular [N]	F de P. Cajón [N]	Vel Promedio $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
6500	3.025	5.139	5.745
7000	3.221	5.266	6.150
7500	3.270	6.119	6.805
8000	3.515	5.858	7.395

A partir de los resultados de la Tabla 4 y utilizando la Ec. 7 que corresponde al coeficiente aerodinámico, se obtienen los resultados de la Tabla 5. Se aprecia que los resultados del coeficiente aerodinámico asociado a la sección circular son mucho menores que del perfil cajón. Además, para el rango de número de Reynolds utilizados en los experimentos, se aprecia que los resultados de los coeficientes aerodinámicos para ambos perfiles se mantienen constantes.

Tabla 5: Variación del coeficiente aerodinámico con respecto al número de Reynolds.

Vel Promedio [$\frac{m}{s}$]	Cd Circular	Cd Cajón	Re
5.745	1.069	1.816	3.24E+05
6.150	0.993	1.624	3.46E+05
6.805	0.824	1.541	3.83E+05
7.395	0.750	1.249	4.17E+05

En la Figura 12 se muestra el valor teórico del coeficiente aerodinámico (C_d) de sección circular (Munson, Young, & Okiishi, 1999). De manera adicional, se superponen los resultados experimentales, los cuales se muestran detalladamente en la Tabla 5.

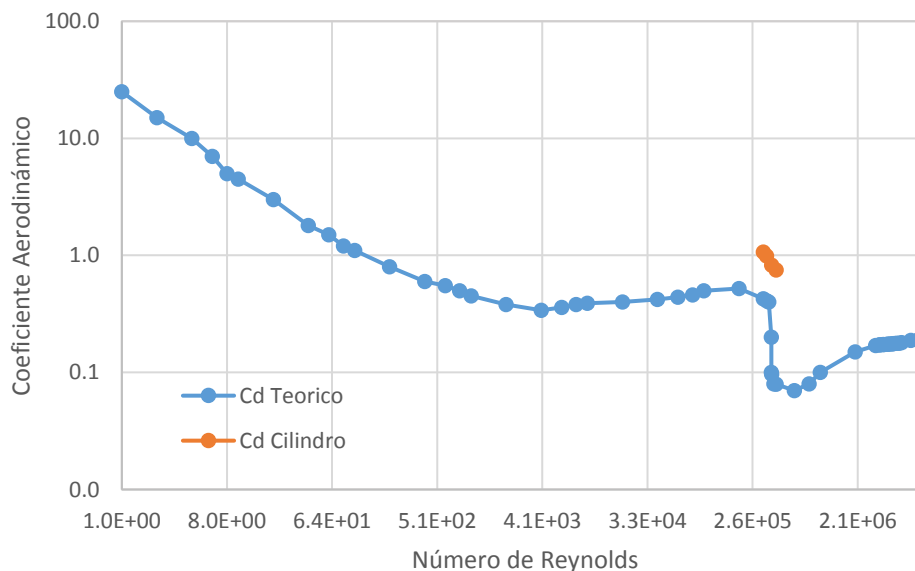


Figura 12: Variación del coeficiente aerodinámico del perfil circular con respecto al número de Reynolds. En línea azul se muestran los resultados teóricos y en línea anaranjada los resultados experimentales.

Con el fin de visualizar correctamente los resultados, en la Figura 13 se aprecian los valores del coeficiente aerodinámico, experimental y teórico, para perfil circular en el rango de números de Reynolds descritos con anterioridad. Se observa un buen ajuste en las mediciones, lo que valida el método experimental de este estudio.

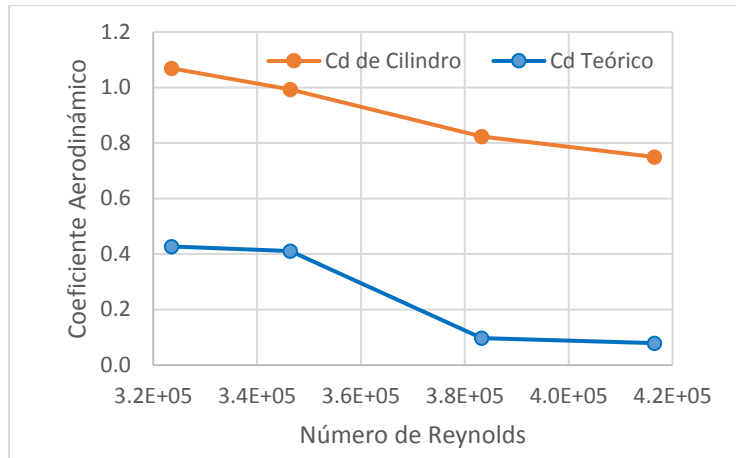


Figura 13: Variación del coeficiente aerodinámico del perfil circular con respecto al rango de número de Reynolds utilizado en este estudio. En línea azul se muestran los resultados teóricos y en línea anaranjada los resultados experimentales.

3.1. Resultados de la Norma NCh-432.Of1971

Los resultados mostrados en la Tabla 6 comparan los coeficientes aerodinámicos experimentales del perfil circular con el coeficiente aerodinámico de un perfil circular rugoso y liso descritos en la norma NCh-432.Of1971. Dicha normativa no varía su coeficiente aerodinámico, independientemente del número de Reynolds. Además, los valores en la NCh 432.Of1971 sobreestiman el valor del coeficiente aerodinámico.

Tabla 6: Factor de forma experimental y de la norma NCh 432.Of1971.

Datos Experimentales		NCh 432.Of1971.	
Cd Circular	Re	Cd Rugoso	Cd Liso
1.0689	3.24E+05	0.7	0.55
0.9932	3.46E+05	0.7	0.55
0.8235	3.83E+05	0.7	0.55
0.7496	4.17E+05	0.7	0.55

En la Figura 14 se aprecian las diferencias entre la norma NCh-432.Of1971 y los resultados experimentales de manera gráfica.

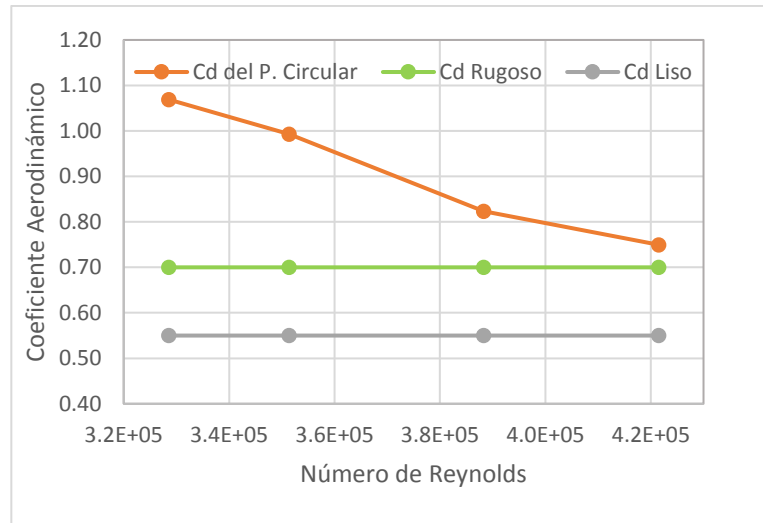


Figura 14: Gráfica que relaciona los coeficientes aerodinámicos experimentales y la norma NCh 432.Of1971.

Como se detalla en la Tabla 7: , los datos experimentales poseen diferencias con respecto a la norma NCh 432.Of1971. Se muestran las variaciones del perfil circular tipo liso y tipo rugoso descritos en la mencionada normativa.

Tabla 7: Variación de datos experimentales con respecto a la norma NCh 432.Of1971.

NCh 432.Of1971	
Desv. Típica Liso	Desv. Típica Rugoso
94%	53%
81%	42%
50%	18%
36%	7%

Como se observa en la Tabla 7 hay grandes diferencias entre los datos experimentales con los teóricos, los perfiles circulares tipo liso poseen una diferencia media de un 65% en comparación del perfil circular rugoso que tiene una desviación media de un 30% lo que da a entender que por las características del ensayo los resultados obtenidos se comportan como un perfil circular rugoso. Otro aspecto importante es que el coeficiente aerodinámico a medida que aumenta el número de Reynolds tiende a disminuir su valor provocando cambios significativos a la hora de elegir este parámetro.

3.2. Resultados de la ASCE 7-10

Los datos de la Tabla 8 son extraídos de la ASCE 7-10 con el fin de compararlos con los resultados obtenidos experimentalmente, con el fin de obtener una relación entre ellos.

Tabla 8 Coeficiente aerodinámico en relación a $[h/D]$

Sección Transversal	Tipo de Superficie	$[h/D]$		
		1	7	25
Cuadrado (viento normal a la cara)	Todos	1.3	1.4	2
Cuadrado (viento normal a lo largo de la diagonal)	Todos	1	1.1	1.5
Hexagonal u Ortogonal	Todos	1	1.2	1.4
Redondo $\frac{D}{\sqrt{q}} > 2.5$ $\frac{D}{\sqrt{q}} > 5.3$ (con D en m y q en $\frac{N}{m^2}$)	Moderadamente Suave	0.5	0.6	0.7
	Áspero ($\frac{D'}{D} = 0.02$)	0.7	0.8	0.9
	Muy Áspero ($\frac{D'}{D} = 0.08$)	0.8	1	1.2
Redondo $\frac{D}{\sqrt{q}} > 5.3$ (con D en m y q en $\frac{N}{m^2}$)	Todos	0.7	0.8	1.2

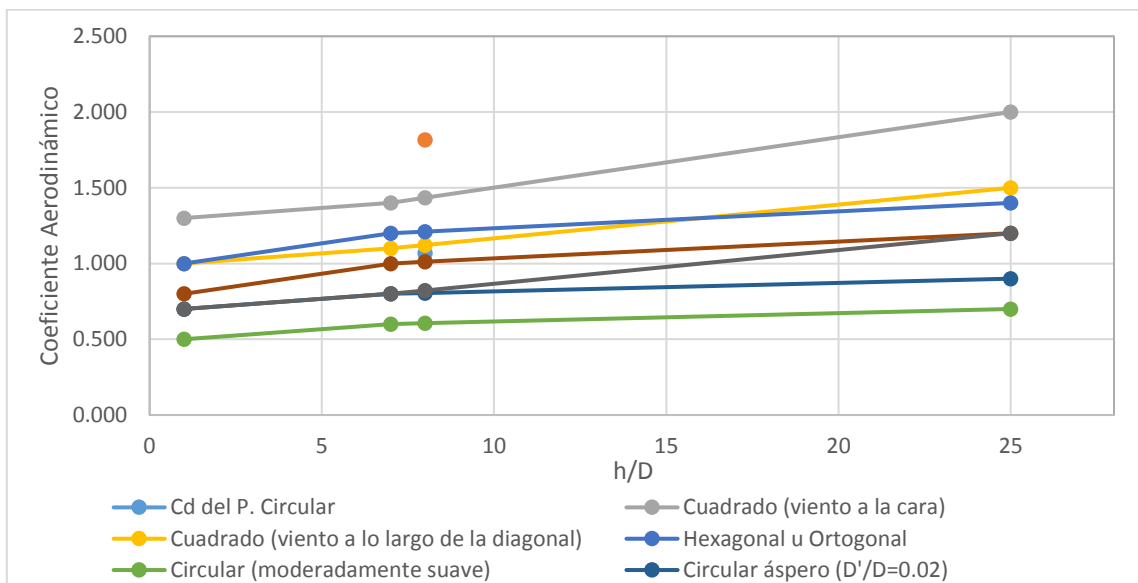


Figura 15: Datos de ASCE 7-10 en relación con los datos experimentales.

En la Figura 15 se detalla el comportamiento del coeficiente aerodinámico para distintas figuras, además que se incluyeron los datos experimentales obtenidos.

El comportamiento de la Figura 15 se indica detalladamente en la Tabla 9 con el fin de describir directamente las diferencias que existen en el perfil cajón.

Tabla 9: Errores de la ASCE 7-10 para el perfil cajón.

ASCE	
Cajón	
Viento en la cara	Viento en la diagonal
27%	62%
13%	45%
8%	37%
13%	11%

El comportamiento de la Figura 15 viene detallado en la Tabla 10 con el fin de describir directamente las diferencias que existen en el perfil circular.

Tabla 10: Errores de la ASCE 7-10 para el perfil circular.

ASCE			
Circular			
Suave	Aspero	Muy Áspero	$D/\text{raíz}(Q) > 5.3$
77%	33%	6%	30%
64%	23%	2%	21%
36%	2%	19%	0%
24%	7%	26%	9%

El comportamiento de la Figura 15 muestra la relación entre los datos experimentales y los teóricos tanto del perfil circular como del perfil cajón, para el caso del perfil cajón la mejor relación que tiene con el código es cuando a este se le aplica el viento en la cara dando una desviación promedio de un 9%. Para el caso del perfil circular la mejor relación es con un perfil circular muy áspero ya que posee una desviación promedio de un 10% lo que significa que poseen una buena relación.

4. Conclusiones

Al comparar la literatura con los resultados experimentales con respecto al coeficiente aerodinámico, estos poseen una gran relación, ya que tiene los datos son muy cercanos a la teoría con errores de un 10%. Los datos obtenidos tienen diferencias que van entre un 10% a un 25% lo que permite observar que la teoría sobreestima los resultados obtenidos de manera experimental. Por lo tanto, los resultados experimentales en relación a los datos teóricos permiten validar las condiciones para este experimento.

La Norma NCh-432.Of1971 entrega resultados sólo para el perfil circular de las chimeneas. Este valor se considera parecido al valor experimental. De los resultados de este estudio, se infiere diferencias superiores a un 9%, lo cual hace inferir que se pueden utilizar los valores de este estudio, ya que la normativa chilena posee valores menores a los que en realidad se generan.

El código ASCE 7-10 entrega resultados tanto para el perfil circular como para el perfil cajón. Estos valores son muy superiores a los que se generan de manera experimental, por lo que, al igual que la NCh-432.Of1971, el código sobrestima los valores del coeficiente aerodinámico. Este estudio entregó diferencias superiores a un 70%. en sus resultados, permitiendo utilizar valores menores de los que presenta el código y aun así encontrarse en un rango superior de seguridad a los que en realidad se generan.

Tanto la norma NCh-432.Of1971 como el código ASCE 7-10 subestima los valores para el coeficiente aerodinámico, debido a esto se recomienda utilizar los valores obtenidos en este estudio.

El empuje del viento relaciona el coeficiente de forma con la presión, el cual es directamente proporcional al coeficiente aerodinámico, dado los resultados obtenidos el empuje del viento subió ya que el coeficiente aerodinámico experimental, lo que hace que tanto la norma como el código lo subestime. Esto es muy importante debido a que las cargas de viento controlan el diseño de estructuras circulares como las chimeneas industriales.

Referencias

Belver, A. (2009). *Análisis de Vibraciones Aeroelásticas en Estructuras Esbeltas sometidas a Cargas de Viento*. Mexico: Universidad de Valladolid.

Bishop, R. (1964). *The Lift and Drag Forces on a Circular Cylinder oscillating in a Flowing Fluid*. London: Mathematical and Physical .

Bull, W. (2014). *Tall Buildings: Design Advances for Construction*. Scotland

Cifuentes, P. (2017). *Analisis Experimental del Desprendimiento de Torbellinos en Estructuras Flexibles en Cargas de Viento*. Concepción, Chile: UCSC.

Galán, H. Z. (2015). *Manual Didactico de Estructuras II* (Vol. 1). Londres.

Gopalkrishnan, R. (1993). *Vortex-Induced forces on oscillating bluff cylinders*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution.

Instituto Nacional de Normalización (1971). *NCh 432: Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

Moreno Regan, U. (2008). *Rehabilitación del Túnel de Viento Subsónico C2-00 y Determinación de Coeficiente de Resistencia de Diferentes Modelos de Prueba en el Túnel*. México, México.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1999). *Fundamentos de la Mecanica de Fluidos* (3 ed.). Mexico: Limusa Wiley.