

Bases de diseño del puente del Canal de Chacao

Hugo Corres Peiretti
Alejandro Pérez Caldentey
José Romo Martín



1. Introducción

FHECOR Ingenieros Consultores ha participado junto con COWI e Ingeniería Cuatro en el anteproyecto del Puente del Canal de Chacao. Este puente es una estructura de 2.5 km de longitud que permite unir el continente con la isla de Chiloé, situada 1.000 km al sur de Santiago de Chile. Se trata de una obra emblemática y de gran contenido político puesto que permitirá poner fin al aislamiento de la isla de Chiloé.

El puente en sí es un puente colgante de 2 vanos de luces 1.055 y 1.100 metros y con capacidad para 4 carriles. Se trata de un proyecto de gran envergadura, situado en la zona donde se ha producido el mayor terremoto registrado en la tierra (Terremoto de Valdivia 1960), cuyo diseño no queda cubierto por la normativa vigente. Por ello, fue necesario llevar a cabo trabajos de campo específicos cuyos resultados fueron sintetizados en unas bases de diseño específicas para esta estructura y que forman parte de los documentos de licitación de la obra. El documento de Bases de Diseño toma como base la normativa AASHTO LRFD [1] y man-



Bases de diseño del puente
del Canal de Chacao

tiene la numeración de los apartados de este documento introduciendo modificaciones allí donde son necesarias.

En lo relativo a los trabajos de campo se establecieron 4 áreas principales:

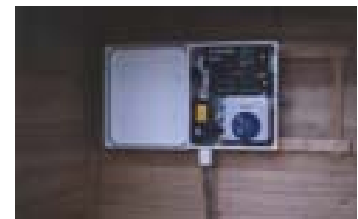
- Geotecnia.
- Estudios marinos.
- Estudios sísmicos.
- Estudios de viento.

Adicionalmente, fue necesario llevar a cabo una serie de estudios paralelos con objeto de definir las condiciones funcionales que debía cumplir la estructura, tales como el tipo y dimensiones de los servicios que debe transportar el puente o el gálibo mínimo necesario.

Además, se llevó a cabo un estudio de tráfico con objeto de definir la sobrecarga que se ha de considerar sobre el puente, siguiendo la metodología de la carga uniforme equivalente (EUDL). Por falta de espacio, el detalle de estos últimos estudios no se incluye en este documento.

Como metodología general para la redacción de las bases de cálculo se estableció el siguiente procedimiento:

- Identificación de las áreas que requieren un estudio específico.
- Desarrollo de un documento de respaldo en el que se estudia el problema.
- Propuesta de redacción para las bases de diseño.
- Discusión y aprobación.



Esta metodología ha permitido disponer de toda una serie de documentos en los que se explica en detalle el fundamento de los parámetros y valores que figuran en las bases de cálculo, y que pueden facilitar la interpretación de las mismas.

En la elaboración de estas bases de diseño intervinieron una serie de profesionales de reconocido prestigio, destacando la participación como colaboradores de PETRUS en el área geotécnica, SYS en el área sísmica, y Bentos en lo referente a los trabajos de campo en el área maríti-

Bases de diseño del puente
del Canal de Chacao

ma y de vientos. A continuación, se describen algunos de los aspectos de mayor interés de estos estudios.

2. Estudios geotécnicos

La viabilidad del puente del Canal de Chacao pasó por demostrar la viabilidad de disponer un apoyo en un promontorio situado en las proximidades del centro del canal: la roca Remolinos. En este sentido, los estudios geotécnicos tuvieron una gran importancia.

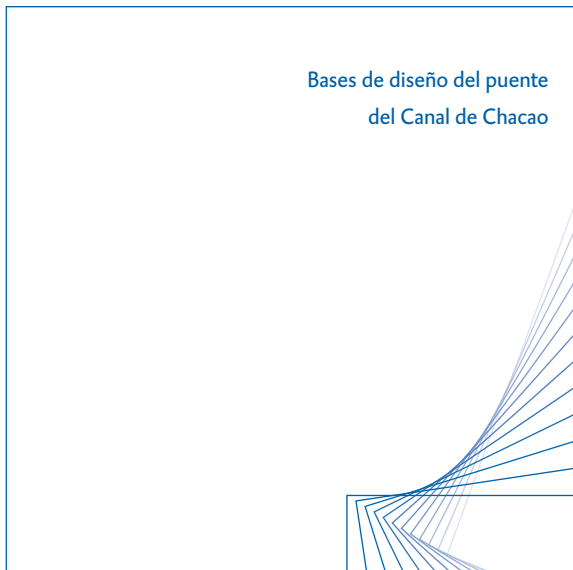
El substrato en el entorno del emplazamiento del puente está constituido por un estrato granular con intercalación de gravas de unos 30 a 50 metros de potencia y situado en ambas márgenes del canal, y un substrato de roca blanda de origen volcánico, la cangagua, resultante con toda probabilidad de las cenizas provenientes de una o varias erupciones volcánicas, como muestra la existencia de residuos vegetales intercalados en estratos de cangagua, lo cual indica la muerte repentina de una capa vegetal existente.



Se llevaron a cabo los siguientes trabajos de campo:

- Sondeos en ambos márgenes del canal, con una profundidad máxima de 100 metros.
- Sondeos en la roca remolinos. El desarrollo de los sondeos en la roca remolinos presentó una gran dificultad en su ejecución, debido a las fuertes corrientes que se desarrollan en el canal, los temporales frecuentes y la necesidad de la inmovilidad de la máquina de sondeos durante la ejecución de los mismos. Este problema se resolvió finalmente, colocando una barcaza anclada mediante 6 cables tesados a una tensión importante.
- Perfiles de refracción sísmica en ambas costas.
- Ensayos de laboratorio.

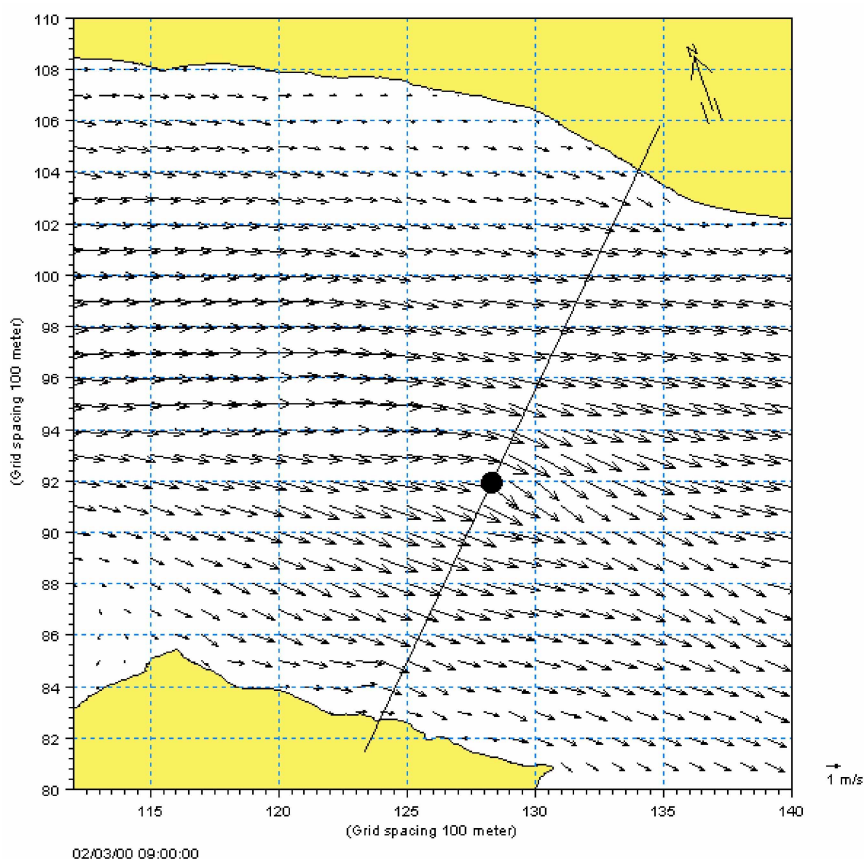
Bases de diseño del puente del Canal de Chacao

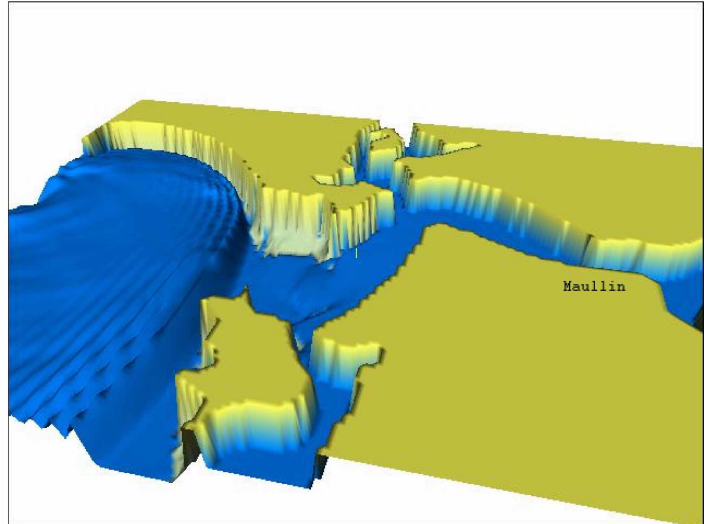
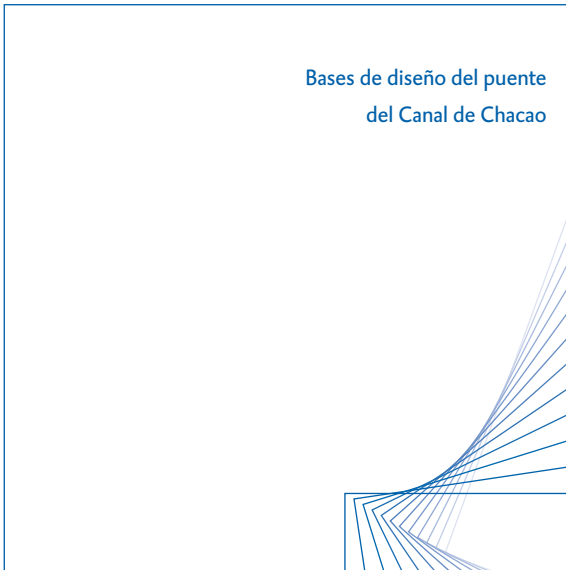


Un aspecto de interés del apartado geotécnico de las bases de cálculo es la estabilidad frente al deslizamiento de los muertos de anclaje de los cables principales de la estructura. Debido a la intensidad de la acción sísmica no resulta viable impedir el deslizamiento de estos elementos. Sin embargo, puede sacarse partido del hecho del carácter reversible de los movimientos sísmicos. En las bases de diseño del Puente del Canal de Chacao se ha adoptado esta filosofía (ya contemplada en la normativa AASHTO LRFD) utilizando la formulación de Whitman y Liao[3] que es una mejora sobre la propuesta de Richards y Elms [2]. De acuerdo con este análisis resulta suficiente con garantizar que la aceleración que produce el deslizamiento del bloque de anclaje sea superior a la mitad de la aceleración de suelo. Con esta condición, el desplazamiento del bloque de anclaje durante el sismo de colapso (SEE) resulta inferior a 20 cm, lo cual no supone un problema para la estructura.

3. Estudios marítimos

Los estudios marítimos tienen una importancia especial en el caso del Puente del Canal de Chacao debido particularmente a las fuertes corrientes que se producen en el canal cuya génesis se encuentra ligada al llenado y vaciado del canal por la subida y bajada de la marea, y supone un condicionante muy fuerte desde el punto de vista constructivo.





Los estudios marítimos se centraron en los siguientes aspectos principales:

- Estudio de mareas.
- Estudios de corrientes (velocidades en un punto y trayectoria de un señuelo).
- Estudio de oleaje.
- Estudio de tsunami.

De estos estudios, los resultados de mayor interés para el diseño y construcción del puente son los resultados del estudio de corrientes y el estudio de tsunami.

En lo referente a las corrientes, debe destacarse que se midieron corrientes de hasta 5 m/s, más propias de un río que del mar. En la figura siguiente se muestra la distribución de corrientes durante el llenado del canal (subida de la marea).

El estudio de tsunami, parte de los datos históricos del terremoto de Valdivia tras el cual se produjo una ola gigante que provocó grandes destrozos particularmente en Maullín a la entrada del canal de Chacao. Este estudio incluye una modelización de los efectos de una ola de este tipo, que parte del desplazamiento vertical que se produce como consecuencia del terremoto subductivo y a partir de este dato predice la altura de ola que se genera en los distintos puntos del canal. De acuerdo con este estudio, debido a que el puente se encuentra en una parte del canal relativamente resguardada, el tsunami no presenta problemas importantes para la seguridad de la estructura debido a que al llegar al emplazamiento, la altura de ola es de sólo 7 metros. El período de la ola es de 30 minutos y se generan corrientes de 8 m/s. En la figura siguiente se muestra un momento de la simulación hecha con el programa MIKE 21 HD.

4. Estudios sísmicos

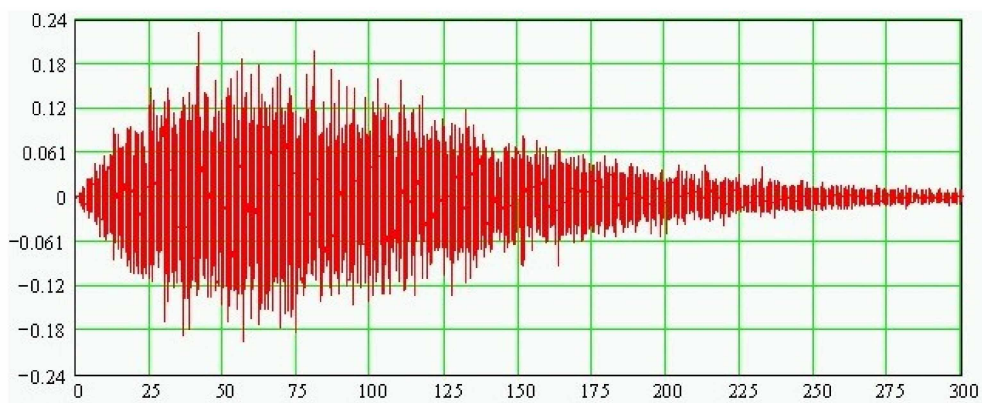
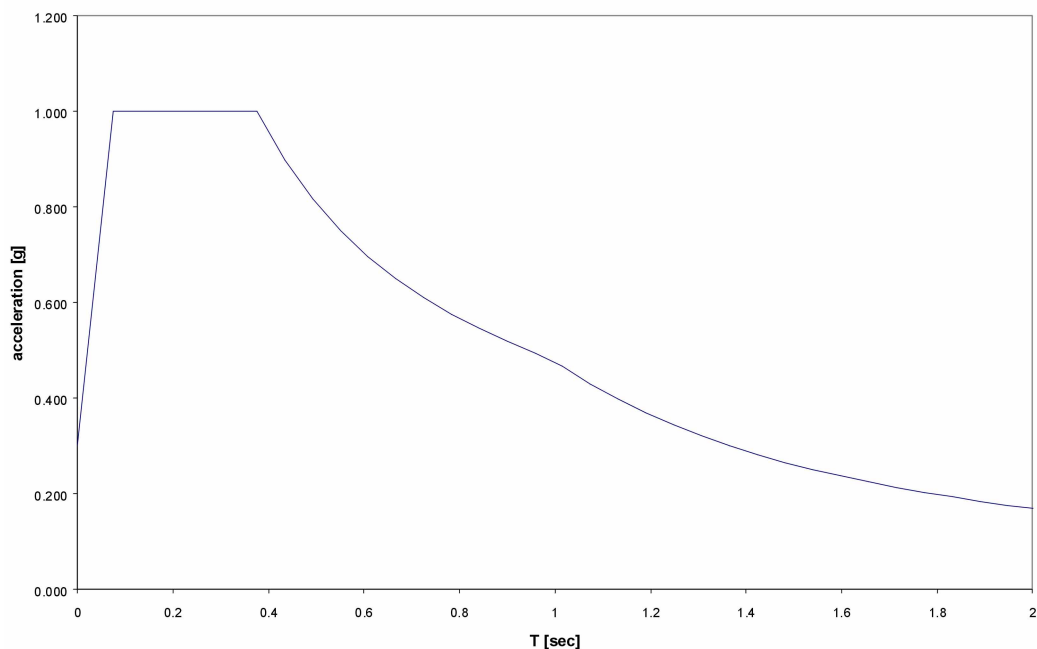
Bases de diseño del puente del Canal de Chacao

Como se ha señalado anteriormente, el mayor sismo conocido tuvo su epicentro en las proximidades de la estructura. El problema sísmico es por lo tanto de la mayor importancia para el diseño de esta estructura.

El estudio sísmico desveló dos posibles orígenes para movimientos sísmicos: la falla continental (sismo subductivo) y una hipotética falla paralela al eje del Canal de Chacao, de la cual existen algunos indicios, aunque no ha podido determinarse si se trata o no de una falla activa: la falla del Golfo de Ancud (FGA). El período del retorno del sismo subductivo es de aproximadamente 375 años.

A partir de estos orígenes, y adoptando unos parámetros en cuanto a intensidad y distancia al epicentro razonables, se generaron dos tipos de resultados para el análisis de la estructura: espectros de respuesta y

Safety Evaluation EQ Response Spectrum



Bases de diseño del puente del Canal de Chacao

acelerogramas. A su vez, se generaron 3 tipos de espectros y acelerogramas, y esto constituye una de las particularidades de las Bases de Diseño del Puente del Canal de Chacao: servicio (FEE, Functional Evaluation Earthquake), colapso (SEE, Safety Evaluation Earthquake) y construcción (CE, Construction Earthquake).

Se exigen, por lo tanto, no solamente condiciones resistentes para el sismo máximo esperable, sino que también se exigen condiciones de servicio en la estructura para un sismo algo menor cuya probabilidad de ocurrencia a lo largo de la vida prevista de la estructura (100 años) es mucho mayor.

Las condiciones de servicio que se establecieron consisten en evitar el desprendimiento del hormigón correspondiente al recubrimiento de las armaduras debido a compresiones excesivas ($\sigma_c < 0.7 f'c$) y evitar la plastificación del acero, ya sea de armar, ya sea acero estructural ($\sigma_d < f_y$). Adicionalmente, para los elementos de hormigón (Pilas), el coeficiente de respuesta sísmica debe tomarse igual a 1.0 para el sismo de FEE, mientras que se admite un valor de 2.0 para el sismo SEE en las pilas laterales, mientras que en la pila central este factor también vale 1.0. Esta circunstancia hace que el sismo de servicio (FEE) pueda ser condicionante para determinados elementos.

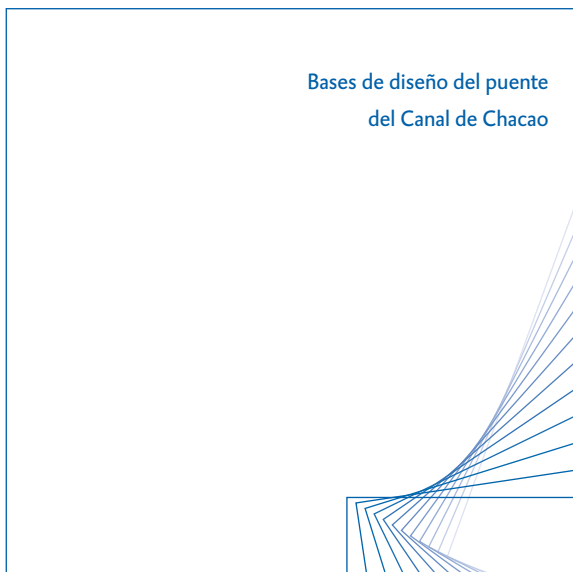
A continuación, se muestra el espectro de respuesta para el sismo de colapso y uno de los acelerogramas, también correspondiente al sismo de colapso.

5. Estudios de viento

En un puente con la tipología del puente del Canal de Chacao, los estudios de viento resultan de gran importancia debido a la necesidad de garantizar la estabilidad aerodinámica del tablero, con objeto de evitar problemas como el del puente de Tacoma, particularmente en este caso en que el diseño se basa en un forma aerodinámica del tablero.

Con esto en mente, para llevar a cabo los estudios de viento, se instalaron en el Canal de Chacao 4 sensores de velocidad y dirección de viento más un sensor tridimensional con objeto de poder estudiar fenómenos de turbulencia. Para ello, se contruyeron dos torres de 50 y 30 m de altura en los márgenes de canal y se aprovechó un pequeño faro que marca la posición de la roca Remolinos para disponer un cuarto sensor, situado a 10 metros de altura. En la torre de 50 metros se dispusieron sensores a 30 y a 50 metros de altura con objeto de poder evaluar experimentalmente la curva de velocidades de viento en función de la altura. La construcción de las torres, instalación de los aparatos de medida y la recogida de datos fue llevada a cabo por Bentos.

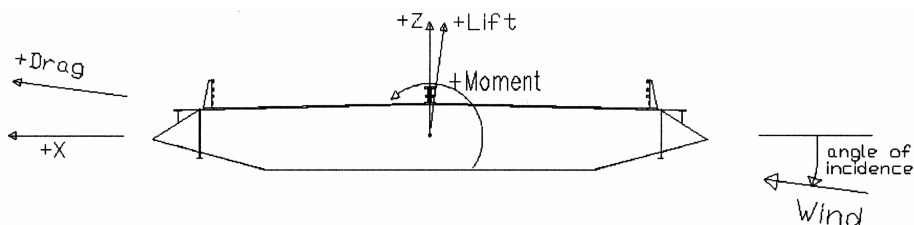
Las mediciones se llevaron a cabo a lo largo de dos años. Como este período resulta insuficiente para hacer predicciones a largo plazo, se obtuvieron los datos históricos de las estaciones meteorológicas situa-



das en las proximidades del emplazamiento del puente (Punta Corona y Puerto Montt). Igualmente, al detectarse velocidades de viento significativas en el canal se pidieron los datos registrados en los mismos momentos a las estaciones meteorológicas próximas con objeto de poder obtener una correlación entre el viento en el canal y el viento en las estaciones, y poder así mejorar las predicciones a largo plazo a partir de las medidas in situ.

Como resultados de estos estudios se fijaron los siguientes valores para las velocidades (v) y presiones (P) para viento sostenido (media de 10 minutos) y para las ráfagas. Estos valores corresponden al viento perpendicular al tablero.

Altura	Viento sostenido (media de 10 minutos)		Ráfaga	
	z	V ₁₀ (z)	V _g (z)	P _g (z)
250	45.1	1.27	60.7	2.30
200	44.1	1.22	59.7	2.23
150	42.8	1.15	58.4	2.13
100	41.0	1.05	56.6	2.00
75	39.7	0.99	55.3	1.91
50	37.9	0.90	53.5	1.79
25	34.8	0.76	50.4	1.59
10	30.8	0.59	46.4	1.34
[m]	[m/s]	[kN/m ²]	[m/s]	[kN/m ²]



Con objeto de poder determinar, a partir de estos valores, la magnitud de las fuerzas ejercidas por el viento sobre el tablero del puente, resulta necesario determinar los coeficientes de arrastre (C). Estos coeficientes se determinaron para distintos ángulos de incidencia (±15°) mediante un ensayo de túnel de viento. Estos resultados se simularon igualmente de forma analítica mediante el programa DVMFLOW de COWI.

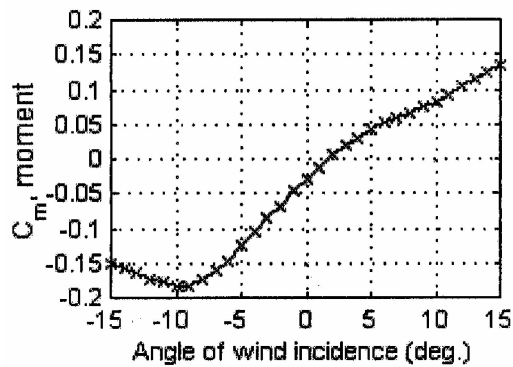
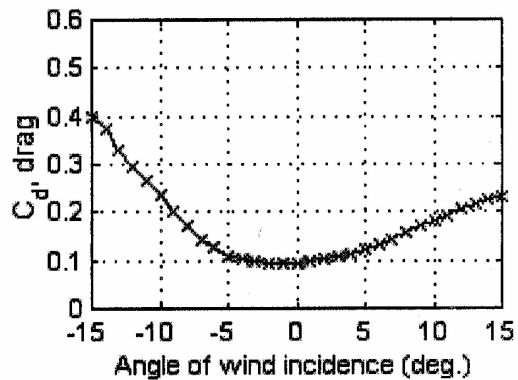
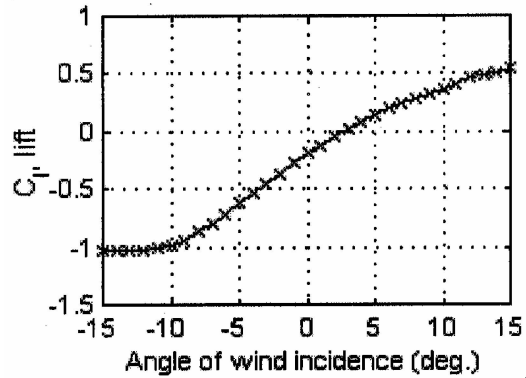
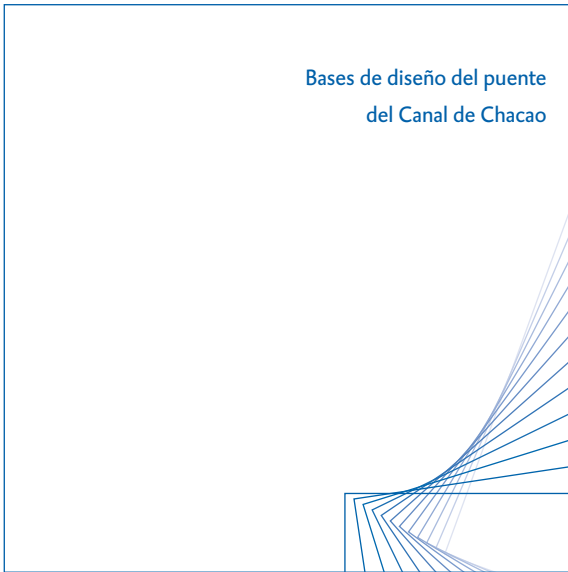
Las fuerzas de ascensión y arrastre (Lift, Drag) y el momento pueden determinarse a partir de las expresiones siguientes:

$$W_{g,drag} = P_g \cdot C_d \cdot B$$

$$W_{g,lift} = P_g \cdot C_l \cdot B$$

$$W_{g,moment} = P_g \cdot C_m \cdot B^2$$

siendo B el ancho del puente. Los coeficientes de arrastre vienen definidos en la figura siguiente:



Otro aspecto de importancia es la estabilidad aeroelástica. Para el puente del Canal de Chacao, las bases de diseño establecen que el puente debe poder soportar sin que se produzcan fenómenos de inestabilidad una velocidad de viento de 58 m/s y que la estabilidad de la estructura debe demostrarse mediante un ensayo de túnel de viento del puente completo. Este ensayo se llevó a cabo para el diseño propuesto en el anteproyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 2000.
- [2] Richards, R.J., Elms, D. Seismic Behavior of Gravity Retainig Walls. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol 105 No. GT4, April 1979.
- [3] Whitman, R.V., Liao Samson. Seismic Design of Retaining Walls. World Conference in Earthquake Engineering. San Francisco 1984.

Bases de diseño del puente
del Canal de Chacao

