

Estudios previos para el puente sobre el Canal de Chacao en la X Region de Chile

Hugo Corres Peiretti

José Romo Martín

Alejandro Pérez Caldentey

FHECOR Ingenieros Consultores

Oscar Unanue Prudent

INGENIERIA CUATRO Ltda. CONSULTORES



1. Introducción

La unión fija entre la Isla Grande de Chiloe y el continente, en la X Región a unos 1000 Km. al sur de Santiago, es un antiguo objetivo político y, durante la última década debido al desarrollo económico de la isla, se ha considerado cada vez más realizable como inversión. Con el objetivo de realizar un estudio objetivo de la inversión y sus posibilidades, el Ministerio de Obras Públicas de Chile convocó un concurso para realizar un Estudio Preliminar de Inversión para el Puente en el Canal del Chacao, que fue adjudicado a Ingeniería Cuatro Ltda Consultores.

Las alternativas de puentes fueron desarrolladas como anteproyecto por FHECOR Ingenieros Consultores.



Figura 1. Imagen virtual de una de las soluciones del puente planteadas sobre el emplazamiento 1 del Canal del Chacao.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

En el estudio se analizaron cuatro alternativas diferentes para resolver el paso del canal:

- Transbordadores (que se corresponde con la situación existente).
- Construcción de un puente en el denominado eje 1 del Canal de Chacao.
- Construcción de un puente en el eje 4 del Canal.
- Construcción de un túnel en el emplazamiento del eje 1.

En este trabajo se describen, resumidamente, las soluciones 1 y 3 de puentes, correspondientes al emplazamiento sobre el llamado eje 1 en el Canal del Chacao, que resultaron las más idóneas, desde el punto de vista de inversión, y que próximamente serán objeto de un nuevo concurso para su desarrollo como anteproyecto para la convocatoria de un concurso de concesión.

2. Condicionantes generales del proyecto

La traza seleccionada para la ubicación del puente supone salvar un vano total de 2.400.0 m aproximadamente, correspondiente al ancho total del canal en este emplazamiento.

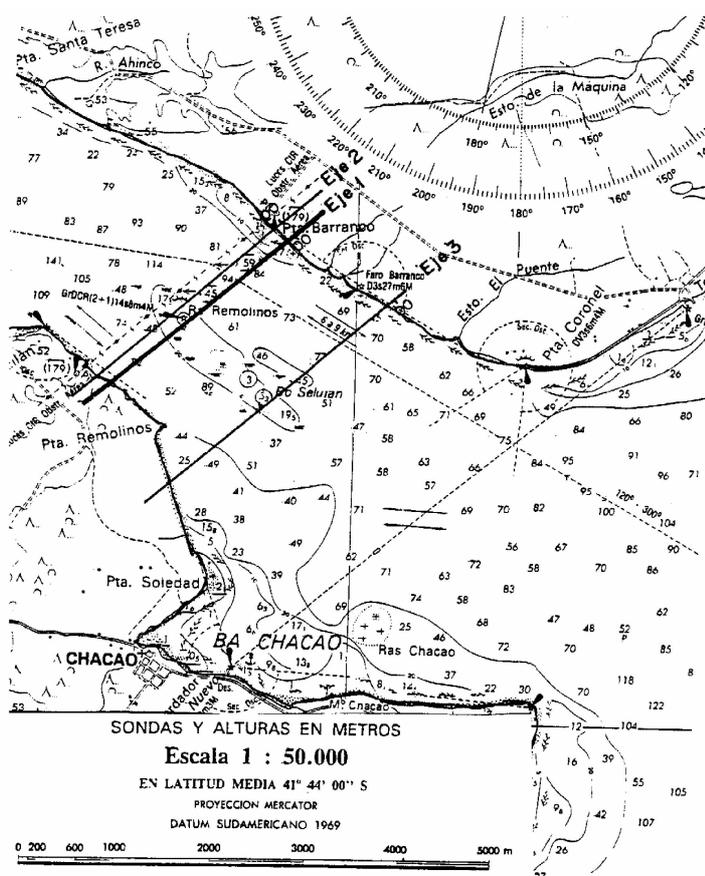


Figura 2. Localización del eje 1 en el Canal del Chacao.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

La batimetría disponible en el momento de redactar el estudio indicaba un calado medio de 70.0 m de profundidad, con un valor máximo de 90.0 m aproximadamente.

En la zona central del paso, pero situada de forma no simétrica respecto a las riberas, existe una área con un calado muy reducido (inferior a 10.0 m) que ocupa una longitud de aproximadamente 100.0 m a lo largo de la traza: la roca Remolinos. El centro de esta elevación dista aproximadamente 1.050.0 m de la orilla sur y 1.300.0 m de la orilla norte.

Las profundidades que tiene el canal implican que la única zona donde es viable situar algún apoyo intermedio es en el entorno de la roca Remolinos. Por ello la estructura debe salvar dos grandes vanos, que además no pueden ser iguales, con luces próximas a los 1000.0 y 1300.0 m respectivamente.

Las dos riberas del canal presentan sendos acantilados de 30.0 m en la norte y 45.0 m en la sur.

La altura de la rasante respecto al nivel del mar está condicionada por el gálibo vertical de navegación exigido, que es de 50.0 m, lo que supone la construcción de terraplenes de acceso en las riberas para conseguir el gálibo requerido.

A los condicionantes anteriores hay que añadir las duras condiciones climatológicas existentes en la zona, que se caracterizan por la presencia de fuertes vientos, grandes corrientes marinas en el estrecho y una importantísima actividad sísmica.

3. Criterios generales del proyecto

3.1. Encaje de las soluciones

Tal y como se ha indicado anteriormente, la longitud total que se ha de salvar es de 2.600.0 m aproximadamente, con la posibilidad de realizar un apoyo intermedio, lo que conduce a dos grandes luces consecutivas de 1.000.0 y 1.300.0 m respectivamente.

La necesidad de salvar el gálibo de navegación y la altura de los acantilados de ambas orillas ha conducido a situar las pilas retranqueadas 30.0 m desde el borde del acantilado sur y 45.0 m desde el borde del acantilado norte, para mejorar sus condiciones de cimentación e independizar su construcción del medio marino.

Estas condiciones han conducido a plantear soluciones con dos grandes vanos contiguos. Las dos soluciones que resultaron más ventajosas corresponden a dos puentes colgantes. La primera alternativa supone la construcción de dos puentes independientes de 940.0 y 1280.0 m de luz conectados por un tramo intermedio de 180 m de longitud.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

La segunda solución estudiada corresponde a un puente colgante continuo con dos vanos de luces 1080.0 y 1320.0 m. En ambos casos, los cables principales se anclan en contrapesos situados en las riberas tras las pilas a construir en las mismas.

Las dos alternativas estudiadas se han planteado con relaciones flecha del cable (f), luz del vano (L), con un valor $f/L=1/10$.

Las relaciones flecha/luz habituales en los puentes colgantes suelen variar entre 1/9 y 1/11, ya que en este rango se encuentra el óptimo estructural y económico. En general, puede decirse que disminuir la relación flecha-luz supone:

- Aumentar las fuerzas en los cables principales y al mismo tiempo la longitud del cable principal y de las péndolas, lo que implica, en general, para relaciones f/L inferiores a 1/10, aumentar la cantidad total de acero en cables, con el consiguiente incremento económico.
- Disminuir la altura de pilas, lo que conlleva un menor coste de las mismas.
- Aumentar las reacciones en las fuerzas de anclaje de los cables, lo que conduce a una mayor dimensión de contrapesos y al consiguiente encarecimiento de los mismos.
- Aumentar la rigidez global del puente, lo que lleva a una reducción en los movimientos y conduce a un abaratamiento de los aparatos de apoyo y juntas de dilatación.
- Disminución de la velocidad de viento crítica para el flameo, lo que supondrá un aumento de los costes de construcción para hacer frente a esta inestabilidad estructural.

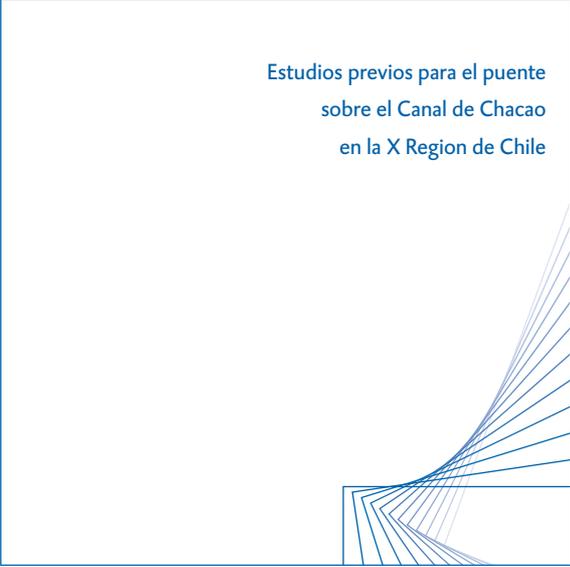
La relación flecha/luz adoptada en el estudio deberá ser confirmada con un estudio paramétrico, que tenga en cuenta al menos los aspectos anteriores, en otras fases más avanzadas del proyecto, para obtener así una optimización de la solución.

3.2. Aspectos esenciales del diseño

El proyecto de un puente de estas características, de enorme singularidad, requiere la definición de unas bases de proyecto específicas que cubran todos los aspectos relacionados con el diseño.

En el estudio preliminar de inversión realizado se establecieron unas bases preliminares de proyecto que serán objeto de ulteriores desarrollos de las siguientes etapas, cuyas características principales se describen a continuación.

En primer lugar se estableció como procedimiento de proyecto el Método de los Estados Límites y se utilizó como documento básico el Eurocódigo 1. Parte 1 Bases de Cálculo [1] Aunque este sistema esta completamente asimilado al proyecto de puentes en España, introducido por primera vez en la Instrucción Eduardo Torroja HA-61 [2] por Eduardo Torroja, es poco empleado en Chile, que en general usa la normativa americana.



Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

Para la definición de las cargas de tráfico se utilizan las que define la ASHTO [3], como primera aproximación, debido principalmente a su mayor conocimiento por parte del cliente. Un puente de estas características requiere un planteamiento específico de la carga de tráfico que se va a utilizar y que tenga en cuenta las condiciones particulares derivadas de la magnitud de la luz.

El viento constituye una de las acciones más preponderantes en este tipo de puentes y muy particularmente debido a la situación del puente objeto de este estudio, ubicado en un estrecho con un amplio flech y en una zona con fuertes vientos del Pacífico.

En el estudio preliminar de inversión se analizaron los datos disponibles de estaciones meteorológicas de la zona, que constituyen datos muy preliminares que deben ser complementados en futuras etapas del proyecto. Los resultados obtenidos permiten estimar como valores preliminares de cálculo velocidades de viento de 64 m/s asociadas a un periodo de retorno de 120 años a 50.0 m sobre el nivel del mar.

Otro aspecto característico de Chile y de la zona de emplazamiento del puente es la actividad sísmica. Para el análisis de este tema se ha utilizado el espectro de respuesta propuesto por la Normas Sísmica Chilena, [4] que aunque esta definido para edificación, se ha utilizado en los primeros análisis sísmicos realizados. Según el espectro elástico considerado la aceleración de respuesta es de 0.64 g para periodos bajos, del orden de 0.20 s, y 0.05 g para periodos altos, del orden de los 3.00 s, que corresponden a los de los modos fundamentales de los puentes propuestos. De acuerdo con los resultados obtenidos, el sismo, como es frecuente en este tipo de estructuras tan flexibles, no resulta condicionante.

Para la solución propuesta se han utilizado dos modelos distintos, que permiten la realización de diferentes análisis.

En primer lugar, se ha utilizado un modelo espacial completo para evaluar el efecto de las cargas de tráfico y viento con un programa de elementos finitos tipo barra con comportamiento lineal del material y en teoría de segundo orden (SOFITIK). El programa permite tener en cuenta el efecto del cambio de geometría de los cables sobre los esfuerzos y deformaciones [5].

En segundo lugar, se ha utilizado un modelo también espacial de elementos finitos tipo barra con comportamiento lineal del material y matriz geométrica, para la consideración simplificada de los efectos de segundo orden de los cables, (STATIK, Cubus) para realizar un análisis espectral. Los resultados obtenidos con la matriz geométrica, para tener en cuenta el efecto de segundo orden, en las frecuencias es suficientemente aproximado tal como lo demuestran experiencias anteriores [5].

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

4. Descripción de la solución de dos puentes colgantes independientes

Esta solución está constituida por dos puentes colgantes de 940.0 y 1.280.0 m de longitud de vano principal, respectivamente. Para el tramo de transición, entre las pilas de los puentes colgantes, situado sobre la roca Remolinos, se propone un tablero metálico, de las mismas características del utilizado para los tramos colgantes, de 180.0 m de longitud total y vanos de 50.0 + 80.0 + 50.0 m de longitud.

Ambos puentes tienen unas alturas de pila, por encima de rasante, que suponen una relación $f/L=10$. Así, para la luz de 940.0 m la pila tiene una altura de 95.0 m sobre rasante y para el vano de 1.280.0 m la altura de la pila sobre la rasante es de 125.0 m.

Los vanos colgantes se resuelven con dos planos de cables verticales. Los cables principales se unen fijamente al tablero en el centro de cada vano, para minimizar el efecto de las deformaciones debidas a la sobrecarga. Las péndolas son verticales y se encuentran separadas a una distancia constante de 15.0 m. Los cables principales de cada puente, se anclan, por una parte, en las dos riberas mediante grandes contrapesos de hormigón, con una inclinación de 30° con la horizontal. En la zona central de la zona de la roca Remolinos, los cables principales se anclan en la cimentación de la pila del puente contiguo con

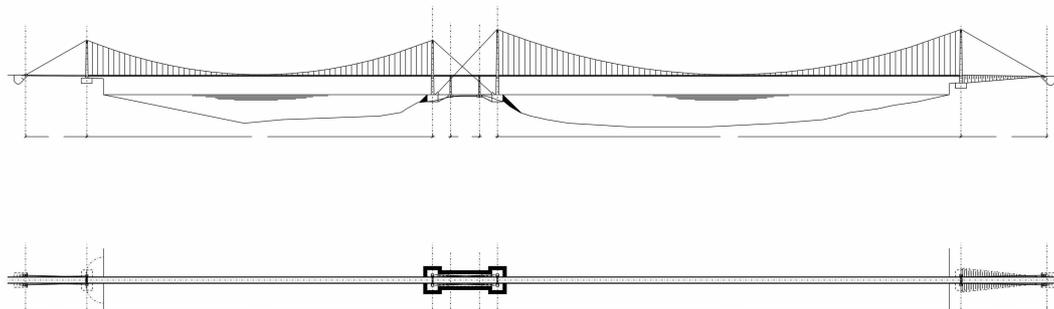


Figura 3. Planta y alzado. Solución puentes independientes.

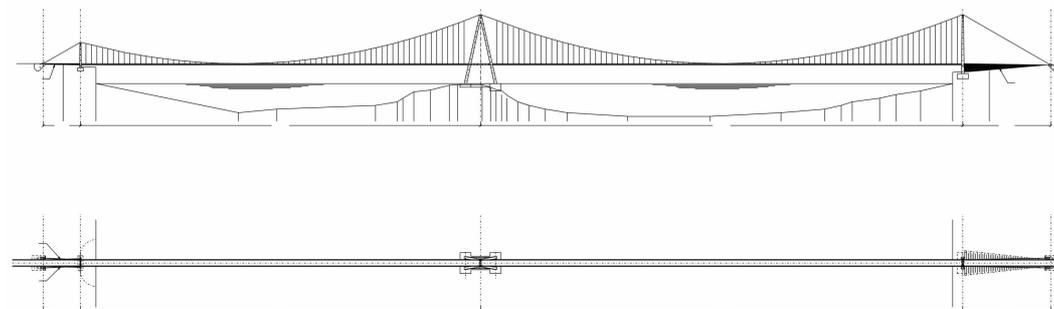


Figura 4. Planta y alzado. Solución puente colgante de dos vanos.

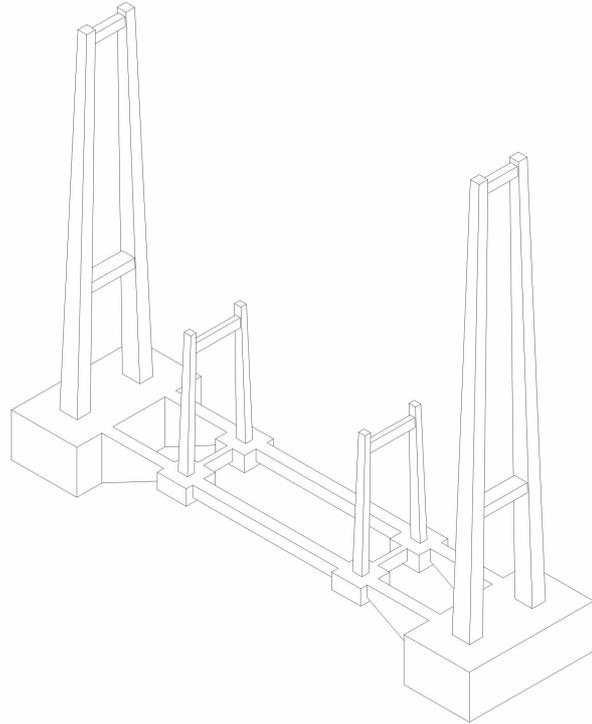
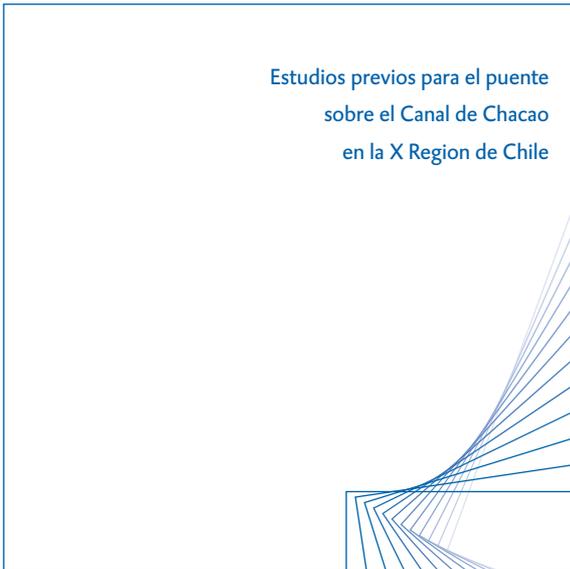


Figura 5. Pilas intermedias sobre la roca Remolinos. Solución puentes independientes.

una inclinación de 45° aproximadamente, para el vano mayor, y 39° aproximadamente, para el vano menor.

Esta disposición del sistema de anclaje supone una gran ventaja al aprovecharse los grandes axiles que proceden de las pilas, aunque

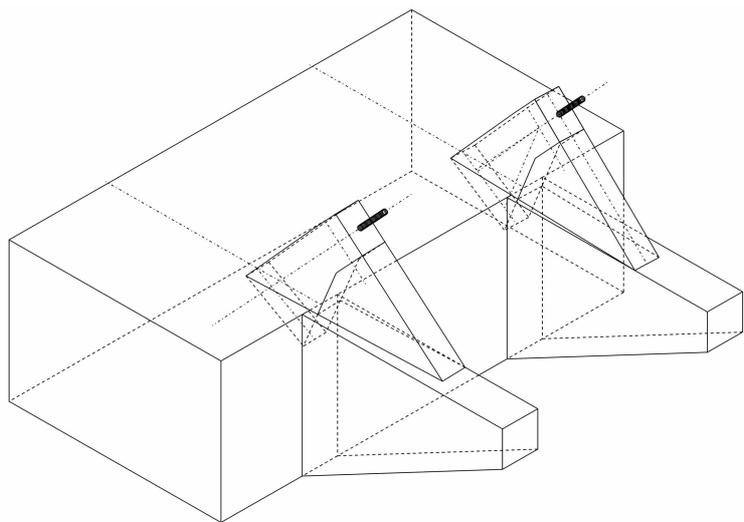


Figura 6. Contrapesos. Solución puentes independientes.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

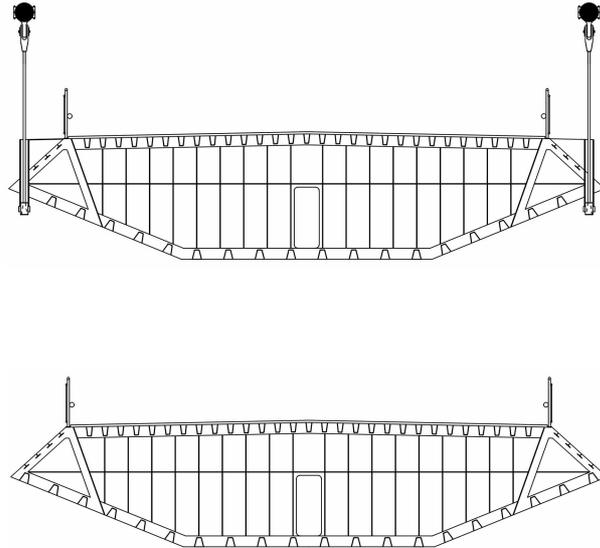


Figura 7. Sección transversal del tablero. Solución puentes independientes.

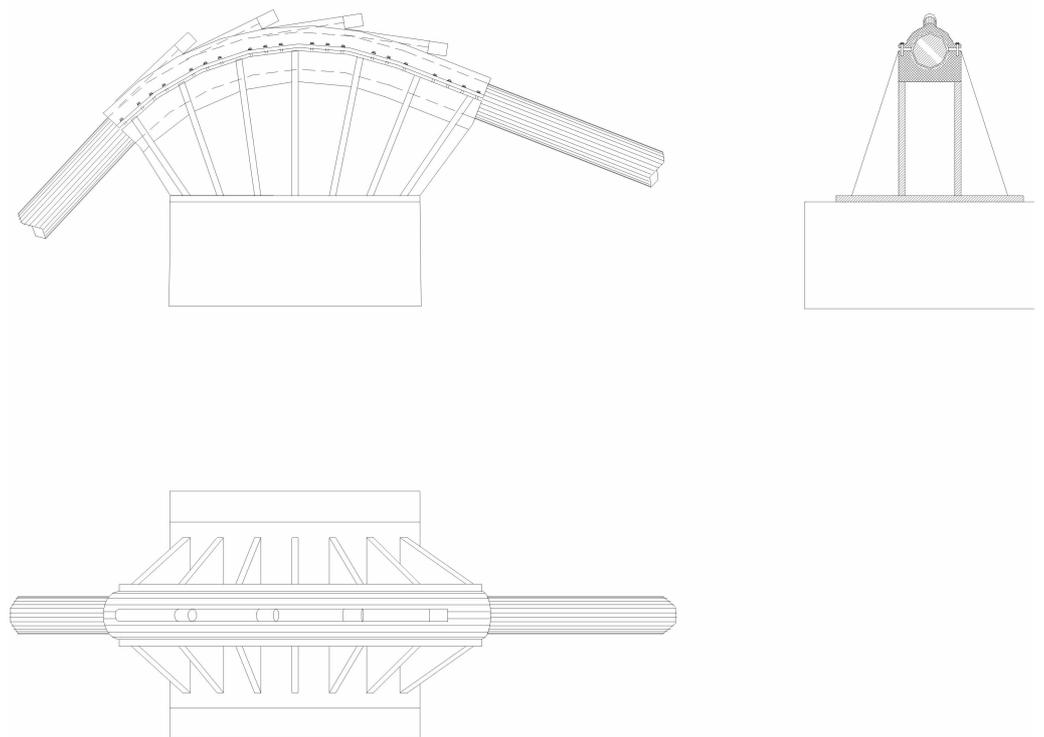


Figura 8. Cama de apoyo y anclaje parcial del cable principal en la cabeza de la pila.

existe una disminución provocada por la subpresión, para aumentar las fuerzas de rozamiento, y autoanclar, al menos parcialmente, las reacciones horizontales procedentes de cada puente. Este sistema conduce a un gran ahorro frente a la solución de dos puentes completamente independientes.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

El tablero está planteado con una sección cajón metálica, con forma aerodinámica, y una importante rigidez torsional, para minimizar los efectos producidos por el viento. El tablero tiene 4.0 m de canto y una anchura total de 18.0 m, lo que supone una relación canto/luz=1/320 en el sentido vertical y 1/71 en el sentido transversal.

En el sentido longitudinal el tablero dispone de juntas de dilatación en ambos extremos, sobre las pilas situadas en los márgenes, y en las pilas situadas en la roca Remolinos.

Transversalmente, frente a las acciones sísmicas o de viento transversal, el tablero se apoya en las pilas para lo que están previstos unos apoyos horizontales coincidentes con las riostras horizontales existentes en las pilas a la altura de paso del tablero.

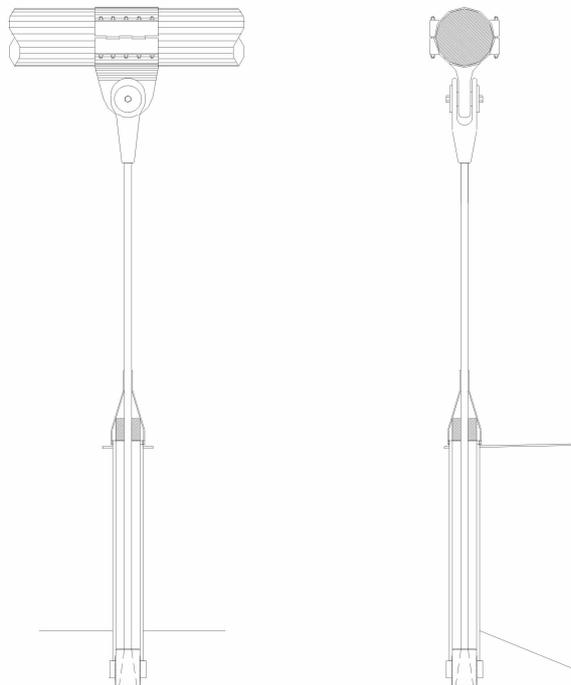


Figura 9. Detalles de conexión de las péndolas al cable principal y al tablero.

El cable principal se propone como un cable construido por el método spinning, con alambres paralelos de acero galvanizado y con una protección exterior final que funciona como una segunda barrera de protección frente a la corrosión.

El cable principal se apoya sobre la pila con un aparato de apoyo que permite anclar parte de los cables de retenida. Esta opción permite la optimización del cable principal, adaptándose la sección del cable a las necesidades estructurales, siendo así mayor la sección total del cable en las retenidas y menor en el vano principal.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

En ambos extremos, el cable principal se abre en haces más pequeños, en una cámara de expansión, que se anclan a los bloques de anclaje o cimentación de la pila mediante tendones de pretensado.

Las péndolas están constituidas por cables cerrados de acero galvanizado en las últimas capas y protegidas con una pintura epoxi que constituye la segunda barrera contra la corrosión. El anclaje al cable principal esta constituido por una pieza de acero moldeado. El anclaje al tablero esta previsto con un sistema de tuerca sobre la mazarota de anclaje de la péndola

Los contrapesos situados en ambas márgenes son elementos masivos de hormigón armado rellenos en su interior por un suelo compactado de densidad controlada, de forma que el peso vertical necesario se consigue mediante hormigón (1/3 del total necesario) y un relleno con suelo de densidad controlada (2/3 del total del peso del elemento).

Las pilas están planteadas como un pórtico, en el alzado transversal, con sendas traviesas en la parte superior e inmediatamente por debajo de la cota a la que transcurre el tablero. Son de sección cajón de canto ligeramente variable en ambas direcciones.

En todos los casos, de acuerdo con los datos preliminares disponibles, se ha planteado cimentación directa. En las pilas de las márgenes se ha tenido en cuenta para definir la cota de cimentación la proximidad del acantilado que se forma al llegar a la playa. Para las pilas de la roca Remolinos se ha tenido especialmente en cuenta las condiciones de lecho marino. Para el tramo de transición que transcurre entre los dos puentes colgantes se han definido sendas pilas con forma de pórtico, en alzado transversal, y características geométricas semejantes y homogéneas con las de las pilas principales.

5. Descripción de la solución de puente colgante de dos vanos

Esta solución está constituida por un puente de dos vanos de luces desiguales de 1080.0 y 1320.0 m respectivamente. La pila 2, intermedia, y la 3, del lado norte, se han planteado de una altura sobre rasante próxima al 10% de la luz del vano mayor, con 134.0 m sobre el nivel de la rasante. La pila 1, del lado sur, tiene una altura de 49.7 m, inferior a las de las otras dos pilas para producir en el vano de 1080.0 m una flecha menor que en el vano de 1320.0 m

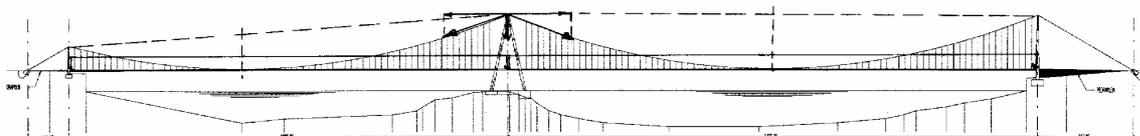


Figura 10. Equilibrio de cargas horizontales para la situación de cargas permanentes.

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile

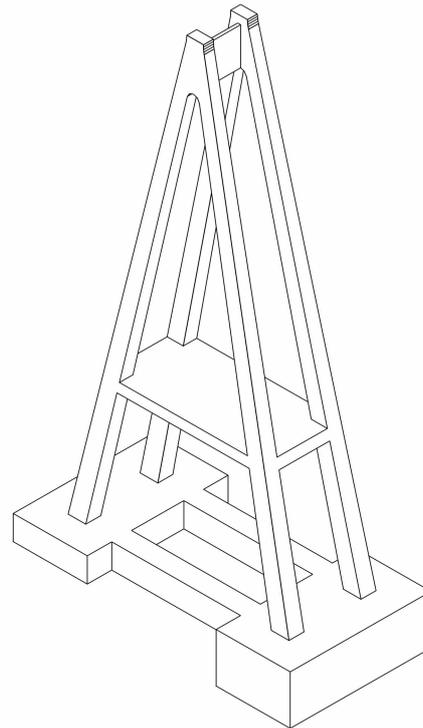


Figura 11. Pila central. Solución puente colgante de dos vanos.

El criterio para la definición de las flechas y, consecuentemente, las alturas de pilas correspondientes, ha sido equilibrar los tiros horizontales procedentes de los cables de los dos vanos adyacentes en la cabeza de la pila central para el estado de cargas permanentes.

Con esta configuración se minimizan las flexiones de la pila intermedia, ya que estas sólo se producen para cargas variables no simétricas. El tablero, sistema de cuelgue –cable principal y péndolas–, así como los bloques de anclaje situados en la dos riberas, siguen los mismos criterios expuestos para la solución de puentes independientes.

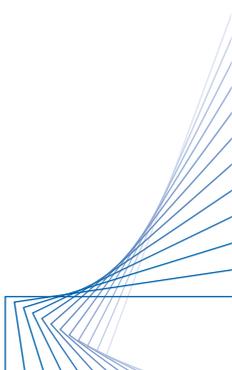
En la zona de roca Remolinos se plantea la pila intermedia con forma de A en el alzado lateral, y con rigidez longitudinal suficiente para resistir las flexiones que se derivan del efecto de la sobrecarga de tráfico y demás acciones variables.

Una alternativa a esta solución, para disminuir la flexión longitudinal en esta pila, hubiera sido el arriostamiento longitudinal de las cabezas de las tres pilas, mediante cables de conexión entre ellas. Esta solución se desestimó por su poca eficacia, debido a la distancia considerable existente entre las pilas.

6. Consideraciones finales

Del estudio de preinversión han resultado que las soluciones tipo puente sobre el eje 1 resultan las más atractivas de todas las alternativas

Estudios previos para el puente
sobre el Canal de Chacao
en la X Region de Chile



estudiadas. Los costes estimados para las soluciones de puentes han sido 271.000.000 \$ en el caso de la solución de dos puentes independientes, y de 300.000.000 \$ en la hipótesis de un puente colgante de dos vanos.

En ambos casos, se ha concluido la necesidad de profundizar en la ingeniería básica para disponer de datos más precisos en los aspectos relacionados con el viento, el medio marino, la geotecnia y la sismicidad local, para continuar con el programa de trabajos preparado por el Gobierno de Chile cuyo fin es la construcción de un enlace fijo entre la isla de Chiloé y el continente a través del Canal del Chacao.

7. Referencias

- [1] Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 1: Bases de proyecto. AENOR. Octubre 1997.
- [2] Instrucción Eduardo Torroja HA61. 1961.
- [3] Estándar Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1992.
- [4] Norma Chilena Oficial. NCh433.0f93. Diseño Sísmico de Edificios.
- [5] Aspectos Específicos del Diseño y Análisis de Puentes Colgantes de Luces Bajas y Medias. Asamblea del ATEP. Logroño 1996. J. Romo; H. Corres.