

Por longitud, innovación y tecnología se encuentra entre los viaductos colgantes más importantes del mundo. La espectacularidad de la obra se aprecia desde los estudios de factibilidad que se realizan en estos días. Las investigaciones llegan hasta el corazón de la Roca Remolinos, elemento clave en la viabilidad del proyecto.

Marcelo Casares
Editor Revista BiT

Puente Bicentenario de Chiloé

La tecnología cruza el mar



Fuente: Concesiones, MOP.

Gráfico 1

Ficha técnica

Tipo de Puente	: Colgante
Longitud Puente	: 2.635 metros
Luz principal	: 1.100 metros
Luz secundaria	: 1.055 metros
Altura Torre Central	: 180 metros
Fundación Pila Central	: 32 pilotes de gran diámetro
Galibos de navegación	: 600 metros Horizontal y 50 metros Vertical
Longitud total de la nueva ruta	: 16,4 kilómetros
Longitud acceso norte	: 7.839 kilómetros
Longitud acceso sur	: 5.907 kilómetros
Número de pistas	: 4
Mediana	: 2,6 metros
Berma	: 1,0 metros
Velocidad de diseño	: 100 km/h
Enlaces	: Pargua - Chacao
Paso superior con conexión	: Carelmapu - Pargua/Caulín - Cruce
Puente menor (Estero La Maquina)	: 30 metros

Al Puente Bicentenario de Chiloé se lo podría definir como un gran HITO. Sí, con mayúsculas. Una obra emblemática que seguramente estará entre las más importantes que se hayan ejecutado en la historia de nuestro país. No es para menos, porque el viaducto implica un tremendo desafío para la industria de la construcción, por la longitud a salvar y por las extremas condiciones climáticas que presenta la zona. Es más, cuenta con tal número de aristas destacables que podría escribirse más de un libro para detallar la descomunal obra. En nuestro caso optamos por dividir el análisis del puente entre tres partes, comenzando en esta edición por los estudios de factibilidad, dejando para el futuro el diseño y los procesos constructivos.

Sin distancias

La Isla Grande de Chiloé estará más cerca que nunca. En tan sólo tres minutos se cubrirán los 2.600 metros que la separan del continente, quedando en el pasado los 60 minutos que requiere el cruce en transbordador del Canal de Chacao, sin contar el tiempo de espera para embarcar que puede superar las dos horas en verano. Desarrollo, mejor calidad de vida, comunicación permanente, cruce cierto,



Imagen virtual del diseño del Puente Bicentenario de Chiloé. En el centro se ubica la pila central en forma de A, instalada sobre la Roca Remolinos. Arriba se observa la pila norte en primer plano.

seguro y rápido, y beneficios para la industria, el turismo y el mercado inmobiliario, representan sólo algunas de las poderosas razones que explican este proyecto. Más que una obra, el viaducto es un antiguo sueño acuñado por años. Ya en 1972 el diputado Félix Garay presentó un diseño muy similar y en el mismo sector que considera el actual proyecto.

Claro que este camino de más de tres décadas no resultó sencillo. Entre 1995 y 1996, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) elaboró un estudio preliminar de inversión de la construcción del puente sobre el Canal Chacao. Las primeras conclusiones fueron contundentes, por ejemplo se recomienda el sector más angosto del canal y utilizar la Roca Remolino. Así, se descartan otros emplazamientos y la alternativa del túnel, especialmente por los 120 metros de profundidad del mar en ese sector. Además, se estableció que manteniendo el nivel de tarifas de transbordadores se puede dar en concesión la construcción y operación del viaducto.

A partir de ese momento el proyecto queda en poder de la Coordinación General de Concesiones (CGC) del MOP, que contrató al consorcio compuesto por la empresa nacional I Cuatro y la danesa Cowi para el estudio de ingenie-

ría. Esta última compañía había diseñado enormes puentes europeos como el Great Belt de Dinamarca, que constituye el segundo viaducto colgante más largo del mundo. También estuvo en el diseño del Puente de Oresund que une Suecia y Dinamarca inaugurado el 1 de julio del 2000 y que no sólo representa una obra de gran magnitud, sino la unión de dos países con el resto de Europa.

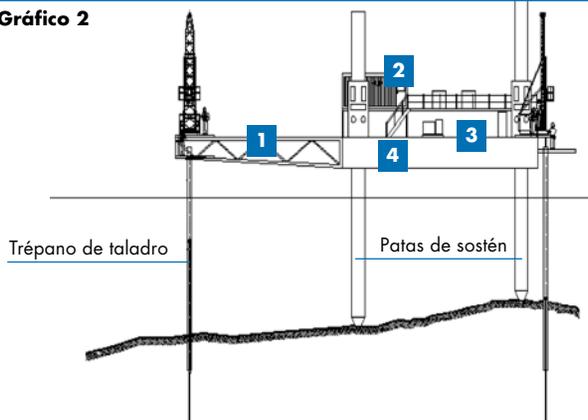
Huellas de gigante

Tras los estudios de rigor (ver recuadro Más estudios), Cowi desarrolló el diseño de un puente colgante continuo de 2.635 metros de longitud, consistente en tres pilas verticales, dos vanos principales, un vano lateral y macizos de anclaje en cada extremo del puente. Los dos cables que suspenden el tablero, de 580 milímetros de diámetros, son continuos desde el bloque de anclaje norte ubicado en el continente, hasta el sur sobre la Isla Grande de Chiloé.

Una de las pilas se encuentra en el extremo norte, a 340 metros del borde continental, en aguas medianamente profundas de unos 25 metros bajo el nivel del mar. Una segunda pila se ubica sobre la denominada Roca Remolinos, aproximadamente al centro del Canal de Chacao, permitiendo

DIAGRAMA JACK UP HUMBER

Gráfico 2



- 1 Brazo extensor de trépano
- 2 Instalaciones del personal
- 3 Bodega de sondajes
- 4 Oficinas generales

Fuente: Concesiones, MOP.

MÁS ESTUDIOS

Si bien en los estudios de viabilidad gran parte de la película se la roba la Roca Remolinos, hay una serie de interesantes investigaciones que componen la Subfase 1 y los estudios preliminares del MOP.

En la Subfase 1 además del jack up Humber, CPC utilizó una segunda plataforma denominada Ansha que realizó los estudios complementarios en la pila norte. Los ensayos geofísicos y presiométrico son similares a los efectuados en el macizo central.

Para el diseño original del puente, la empresa Cowi llevó adelante avanzados estudios sobre dos elementos clave: Vientos y mareas. Una maqueta del viaducto en una escala 1:215 se sometió a la simulación de los vientos del Canal de Chacao, prueba que tuvo lugar en una sala especialmente acondicionada en un laboratorio danés. A través de sensores se comprobó la resistencia de los cables, y se generó información base para dimensionar la inclinación del flan del tablero, con un ángulo óptimo para soportar las ráfagas. En la simulación se utilizaron vientos superiores a los 240 km por hora, siendo que las ráfagas más fuertes del canal alcanzan sólo los 130 kilómetros por hora. Así, se diseñó un puente más liviano con un tablero aerodinámico, similar al ala de un avión, de sólo 2,80 metros de alto y 21,6 de ancho.

El estudio de corrientes se hizo con el sistema Acoustic Doppler Current Profiler que monitorea el paso de las olas. Se efectuaron las tradicionales mediciones continuas de corrientes en un punto geográfico fijo (correntocionales). Además, se desarrollaron mediciones con derivadores (lagrangianas) que muestran las trayectorias de las mareas. Se coloca un flotador con un GPS en el interior, al que se somete por un tiempo determinado a una corriente. Se controla su trayectoria con el GPS, observando el tiempo que demora entre un punto y otro. Así, se registra la velocidad y la dirección de corriente.



Jack Up HUMBER en Roca Remolinos.

JACK UP HUMBER

Peso	: 375 toneladas
Superficie de cubierta	: 24 x 18 metros
Altura de patas	: 33 metros
Altura sobre el mar	: 21 metros
Capacidad grúa	: 150 toneladas

fundar esta estructura a escasa profundidad alrededor de tres metros bajo la superficie, según la marea. Con el fin de obtener una rigidez horizontal del puente colgante, se estableció una forma de «A».

La luz principal de 1.100 metros queda comprendida entre las pilas norte y central y define el vano norte del puente. El vano sur, entre la Roca Remolinos y la ribera insular, posee 1.055 metros (gráfico 1). En su extremo la estructura se apoya en la pila sur, la que se emplaza sobre el nivel del mar, en la Isla de Chiloé.

El proyecto considera que las cabezas de las pilas central (Roca Remolinos) y norte (continente) tienen la misma cota sobre el nivel del mar, alrededor de 180 metros. En cambio, la pila sur, ubicada en la isla en tierra firme, posee una cota de alrededor de 160 metros.

El tablero del puente consiste en una estructura metálica ortotrópica de 2,8 metros de altura con alerones en sus extremos. Se compone de una calzada de cuatro pistas, con un ancho total de 21,6 metros, con mediana central de 2,6 metros y bermas exteriores de 1 metro. Al interior de esta sección se han dispuesto dispositivos que permitirán el paso de diferentes redes de servicios públicos. Este tablero se encuentra suspendido desde los cables principales por péndolas metálicas ubicadas a ambos lados espaciadas cada 20 metros.

El tablero se ubica a 59,6 metros del mar, considerando

la máxima altura de las aguas, resultando un gálibo de navegación mínimo de 50 metros. La configuración del puente, permitirá tener un canal de navegación de 600 metros de ancho en el vano norte. Se emplean pilotes preexcavados de 3 metros de diámetro para las fundaciones bajo el mar de las pilas norte y central, mientras que en la pila sur se utiliza fundación directa.

La concesión

Con el diseño referencial en la mano la CGC, salió a licitar la concesión. Verdaderos gigantes mundiales de la construcción de puentes participaron del concurso como Skanska y el Grupo Challenger. Finalmente, en enero se otorga la concesión, que comienza formalmente el 15 de julio con la publicación del Decreto Supremo. La adjudicación fue para la Sociedad Concesionario Puente de Chiloé (CPC) también compuesta por empresas top en la ejecución de viaductos colgantes como Hochtief de Alemania que concentra el 27% de participación, Vinci (Francia, 27%), American Bridge (Estados Unidos, 27%), Empresas Tecsca (Chile 9,5%), y Besalco (Chile 9,5%). «El consorcio cumplió con exigentes requisitos técnicos como por ejemplo haber construido puentes colgantes con más de 600 metros de luz libre. Además, recientemente Vinci ejecutó un viaducto en

Grecia con altos estándares de resistencia sísmica. Éste es el Puente Poseidón, inaugurado el 7 de agosto del 2004, para las Olimpiadas. Por otra parte, el aporte de las empresas locales será fundamental en las faenas de obra gruesa y acceso viales», señala Alejandro Molina, jefe de proyecto de la Coordinación General de Concesiones del Ministerio de Obras Públicas, ingeniero civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

El contrato se compone de las etapas de construcción y explotación. A su vez la primera está integrada por la Fase de Ingeniería cuya extensión alcanza los dos años y la Fase de Construcción que se prolongará por cinco años. La Fase de Ingeniería se divide en tres subfases:

- 1.** Campaña Geológica Complementaria (5 meses + aprobación).
- 2.** Validación de Parámetros, Ingeniería de Detalle, Propuesta Financiera y Constructibilidad (5 meses + aprobación).
- 3.** Estructura Financiera y la Ingeniería Definitiva (7 meses + aprobación).

Finalmente la etapa de explotación, que incluye la mantención del puente, se extiende por 30 años.

La particularidad del proyecto impulsó la inclusión de cláusulas especiales que permiten la finalización del vínculo entre la CGC y el consorcio en caso que el proyecto no



Alejandro Molina, jefe del proyecto de la Coordinación General de Concesiones del MOP, junto a maqueta del proyecto.



Lorenzo Agostini, gerente técnico de la Sociedad Concesionaria Puente de Chiloé.



Novedosos sistemas de sondaje permiten la obtención de muestras de 10 cm de diámetro, más completas que las tradicionales que alcanzan sólo 6 centímetros.

sea viable. «Por la complejidad de la obra, en cada una de las tres subfases de la Fase de Ingeniería se establece la posibilidad de que la concesionaria o el MOP puedan retirarse. En caso que nosotros salgamos del proyecto, el MOP reconoce los costos correspondientes a los trabajos realizados hasta ese momento», precisa Lorenzo Agostini, gerente técnico de la CPC.

La roca

Al cierre de este artículo (fines de noviembre), CPC se encontraba en pleno desarrollo de la Subfase 1 Campaña Geológica Complementaria. En ésta se aprecia una vez más la relevancia de la Roca Remolinos para que la construcción del puente tenga un final feliz. De hecho, si la capacidad de resistencia de este macizo no tolera la pila central este proyecto deberá quedar archivado en algún cajón a la espera de nuevos diseños y/o innovadoras tecnologías.

Pero antes de avanzar hay que aclarar que la Roca Remolinos es mucho más que una roca. «Se trata de un cerro submarino que se encuentra dentro de la morfología del lecho marino. Es un macizo rocoso de 500 metros de ancho por 1 kilómetro de largo y en la parte superior hay una superficie de 100 por 200 metros. Esta plataforma presenta una escasa irregularidad, que permite un buen desarrollo de los estudios preliminares», agrega Molina.

Ahora que queda claro que la roca no es sólo una roca y la relevancia de ésta para el proyecto, se entiende que los estudios relacionados con la capacidad de soporte del suelo del macizo -geotecnia- concentren el 95% de la atención de CPC en la Subfase 1. El porcentaje restante se distribuye en recopilar los datos del viento, estudios sísmicos, batimetría, y el tráfico de naves. Este último consiste en la actualización de los datos de los barcos que cruzan el canal, pues para el dimensionamiento de las pilas marinas se debe considerar la probabilidad de un choque con una nave. La resistencia de la estructura, entonces, también estará

influenciada por el peso y el calado de los barcos que transitan por la zona.

A fondo

En los estudios geotécnicos la CPC no piensa dejar margen para dudas. Por eso, apuesta fuerte por la tecnología y la innovación para obtener resultados absolutamente confiables. La faena empezó por la instalación de una plataforma metálica, jack up, habitualmente utilizada para perforaciones en la industria petrolera, encargada de realizar los sondajes en la roca para extraer muestras que más tarde se analizarán en laboratorio.

En primer lugar se instaló el jack up Humber que contiene dos perforadoras, una grúa, contenedores para instalaciones del personal, bodega de muestras y oficinas (gráfico 2). Un barco remolcó la estructura hasta posicionarse sobre la superficie de la Roca Remolinos. Una vez allí descienden sus cuatro patas hasta posarse sobre el macizo. A continuación, a través de un sistema de cremallera se eleva la plataforma, aislándola del efecto de las mareas. «Es casi como si estuviera en tierra firme, una situación mucho más favorable para ejecutar los sondajes verticales que hacerlos en una estructura flotante», señala Lorenzo Agostini.

Otro dato, la instalación del jack up sobre la roca no es nada fácil. Se debe esperar un período de mareas de poca intensidad, denominado cuadratura, el punto de inflexión de las mareas, llamada estoa y condiciones climáticas apropiadas. «La tarea es compleja pues se puede conocer anticipadamente el comportamiento de las mareas, pero no ocurre lo mismo con el clima. Así, esperamos una estoa, que dura de 45 a 90 minutos, y un clima apropiado, especialmente sin lluvia fuerte y con vientos y olas débiles», agrega Agostini.

La innovación se aprecia en los sondajes. Las actuales labores recuperan testigos -muestras- de unos 10 centímetros de diámetro, mientras los estudios habituales y los efec-



Las muestras se someten primeramente a estudios de observación en terreno por parte de expertos geotécnicos.



Los Ensayos Presiométricos consisten en la dilatación por gas a presión de una celda cilíndrica contra las paredes del sondeo.



Los Ensayos Geofísicos entregan información sobre la cementación del terreno y resistencia.

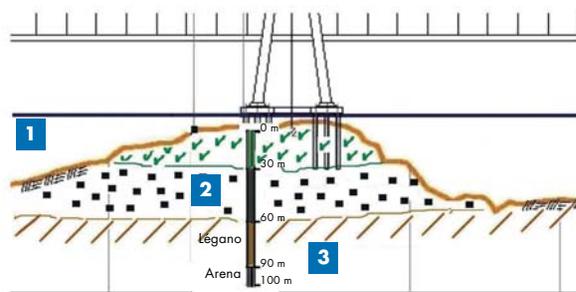
tuados en primera instancia por Cowi alcanzaban sólo los 6 centímetros. Las muestras de mayor tamaño se logran con equipos perforadores de mayor potencia, y sistemas de varillajes, coronas y barriles especiales. «Es un sistema nuevo que permitió una recuperación 100% del material excavado. Si bien la diferencia entre las muestras anterior

res y las actuales puede parecer mínima, 4 centímetros, con este novedoso procedimiento se obtienen testigos más completos y de mejor calidad», explica Agostini.

El proceso de perforación consiste en una barra cilíndrica continua hueca que desciende, rota y perfora tres metros. Luego, por el interior de dicha barra de perforación se

ROCA REMOLINOS SECCIÓN GEOLÓGICA

Gráfico 3



- 1 Corrientes masiva preglaciales piroclásticas
- 2 Arena volcánica cementicia / Sedimentos volcánicos cuaternarios
- 3 Lacustre + transgresión / Sedimentos pleistocénicos

Fuente: Concesiones, MOP.

eleva el barril (elemento metálico que contiene el producto de la perforación), llega a la plataforma, se acuesta, se retira la muestra de roca desde el interior, se envuelve con film plástico para que no pierda humedad y se envía al laboratorio testigos seleccionados por el geotécnico. Cada tres metros se reitera esta operación.

En la Roca Remolinos se hicieron dos perforaciones de 100 metros, dos de 60 metros, una de 40 metros y otra de 16 metros. La profundidad de los sondajes depende del interés del suelo, como de la logitud de los pilotes: En el caso de la pila central éstos se prediseñaron con una profundidad de 40 metros y aunque en CPC proyectan que no será necesario descender más allá de los 60 - 70 metros, igualmente se estudió un espesor adicional.

Con lupa

La historia continúa con el detalle de los estudios, que comprenden cuatro áreas: Observación en terreno, ensayos presiométricos, ensayos geofísicos y ensayos de laboratorios.

El primer análisis se realiza en terreno, y si bien puede parecer sencillo tiene sus secretos. La observación de las muestras la realizan dos expertos geotécnicos alemanes. «Al mirar los testigos, los especialistas evalúan el color, la granulometría, la segmentación, solidez y si se puede disgregar. La evaluación de estos aspectos resulta muy importante. Hasta el momento se han hecho un número importante de observaciones y los resultados están dentro de lo previsto, es decir, que la roca tendría la capacidad necesaria para soportar la pila», señala Agostini.

Los ensayos presiométricos consisten en la dilatación por gas a presión de una celda cilíndrica contra las paredes del sondeo, midiendo la deformación volumétrica correspon-

diente a cada presión hasta llegar eventualmente a la rotura del terreno. Con ello, se obtiene la presión límite y deformabilidad de suelos granulares. En las perforaciones de la Roca Remolinos se realizaron 15 ensayos con intervalos de 3 metros hasta los 30 metros de profundidad y a partir de allí se hicieron cada 5 hasta llegar a los 60 metros. «Se coloca una varilla y se aplica una presión de hasta 100 bares (100 kilos por cm²). Se infla para detectar en qué rango de presión cede el terreno, un aspecto trascendental si consideramos que cuando se coloquen los pilotes, éstos se deformarán por el esfuerzo. Se comprobó que el macizo cuenta con muy buena lateralidad, en especial en los primeros 30 metros. Otro elemento positivo para la materialización de la obra», dice Molina.

En los ensayos geofísicos actúan tecnologías especializadas que aplican una impulsión para apreciar cuánto tiempo la onda se propaga al interior del terreno. Se analiza la resistividad eléctrica, registro gamma-gamma y registro neutrón, para determinar la densidad y el índice de vacío. Además, se obtiene las mediciones de velocidad de las ondas P y S. «Para simplificar el proceso podemos decir que, por ejemplo, en presencia de una roca sana la velocidad de onda puede superar los 1.200 m/seg. En un macizo de baja calidad la velocidad puede caer hasta menos de 600 m/seg (maicillo consolidado)», comenta Agostini.

Este ensayo entrega información sobre la cementación del terreno, la homogeneidad de las capas y resistencia. Se analiza el interior de la perforación, un aspecto clave pues los resultados son sumamente confiables si se tiene en cuenta que una muestra puede ser de baja calidad o sufrir algún tipo de manipulación. Según la información entregada por CGC del MOP, la Roca Remolinos se encuentra cementada y contiene grava, con una composición similar al hormigón. «La cementación es de buena a alta, posee arena de grano medio a fino, con gravillas de finas a gruesa. El grado de cementación disminuye con la profundidad», sostiene Molina. El informe de la composición del macizo según la profundidad es el siguiente (gráfico 3):

De 30 - 57 metros: Arenas con cementación mediana, parcialmente bajas, con diferentes cantidades de gravillas, con pequeñas capas de limos. Las arenas poco cementadas son muy densas.

De 57 - 89 metros: Limos duros o cementados, amarillo café claro, con algunas capas de arena fina y cementada.

De 89 - 100 metros: Arena mediana, compactada muy densa, con cementación parcial baja, de color gris oscuro, y con algunas delgadas capas de limo embebido.

Para los ensayos de laboratorio las muestras se trasladan al Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales (IDIEM), donde se las somete a cuatro principales pruebas: Compresión no Confinada, Ensayo Triaxial, Ensayo Triaxial Cíclico y Ensayo de Corte Directo. Los primeros resultados

de estos ensayos mantienen en alto las expectativas. «Estamos analizando los primeros datos, y no se ven sorpresas en relación a lo que se esperaba y en cuanto a la viabilidad del diseño original», comenta Agostini.

De hecho, el propio Presidente de La Nación, Ricardo Lagos, señaló en su reciente visita al jack up Humber que: «Estamos optimistas hasta el momento por los trabajos que se han hecho». Un optimismo que comparten los principales actores del proyecto. Pero, ¿qué podría hacer naufragar una obra de esta magnitud? Molina responde: «Sólo si encontramos un fuerte indicador de que la Roca Remolinos no tiene capacidad para soportar la pila central. Algo muy improbable por lo analizado hasta el momento. Igualmente, esperamos hasta contar con todos los resultados de los ensayos de laboratorio para dar el sí definitivo, algo que podría ocurrir a inicios del 2006». 

Más información Revista Bit N° 25, página 59,
www.revistabit.cl

Esta obra emblemática implica un tremendo desafío para la industria de la construcción, por la longitud a salvar y por las extremas condiciones climáticas que presenta la zona.

En esta edición se presentan los estudios de factibilidad para la construcción del puente que cubrirá los 2.600 metros que separan la Isla Grande de Chiloé del continente. El proyecto fue adjudicado a la Sociedad Concesionario Puente de Chiloé, integrada por Hochtief (Alemania), Vinci (Francia), American Bridge (Estados Unidos), Empresas Tecsca (Chile), y Besalco (Chile). La obra se compone de las etapas de construcción y explotación. En la actualidad, se ejecutan las faenas de la Campaña Geológica Complementaria en los estudios relacionados con la capacidad de soporte del suelo de la Roca Remolinos, a través de estudios en terreno y en el laboratorio del IDIEM.

www.concesiones.cl