

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACION DE LA SOCAVACION LOCAL EN LA PILA DEL PUENTE DEL
CANAL DE CHACAO**

Luis Zamorano ¹
Patricio Winckler ²
Jaime Cotroneo ³
Enrique Galecio ⁴
Fernando Landeta ⁵

RESUMEN

Se presenta una metodología que permite estimar la abrasión local de una pila ubicada en roca, y se aplica para estimar la socavación local en las pilas del puente del canal de Chacao. Las variables hidrodinámicas son estimadas a partir de un modelo 3D usando el código abierto OpenFOAM para fluidos incompresibles y bifásicos. En base a lo anterior se determinan los esfuerzos de cizalle en el fondo para todas las pilas, el cual es relacionado con la erosión en el horizonte durante la vida útil del proyecto (100 años) a través de la metodología SRICOS, considerando tasas de abrasión obtenidas para muestras de roca a través del dispositivo RETA. Los resultados muestran valores de abrasión esperables de 0.63 m. para la Torre Central, ubicada en Roca Remolinos. Debido a que existen otros factores de socavación como el desprendimiento en bloque, bolsones de arena y la incertidumbre de las características del suelo relativa a estos agentes, se recomienda todas las medidas para el resguardo de las pilas, partiendo por un plan de monitoreo continuo de la zona en las etapas de operación y construcción de la obra.

¹Jefe de I+D+i, Instituto Nacional de Hidráulica, luiszamorano@inh.cl

²Profesor Adjunto, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, patricio.winckler@uv.cl

³Jefe de Proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica, jaimecotroneo@inh.cl

⁴Investigador y Jefe de Proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica, enriquegalecio@inh.cl

⁵Jefe de Terrenos, Skiring Marine Ltda, fernando.landeta@gmail.com

1. INTRODUCCION

Actualmente en el país se encuentra en etapa de construcción del puente del Canal de Chacao (Ilustración 1), una de las obras civiles más costosas de los últimos años. Una vez construido, permitirá la conectividad entre el continente y la Isla Grande de Chiloé y será el puente colgante más largo de Sudamérica. Su diseño y construcción plantea varios desafíos de ingeniería (Forsberg & Petersen, 2001). En particular en el área de la hidrodinámica, el canal tiene condiciones singulares poco favorables para el desarrollo de los trabajos. El trazado del puente se realiza sobre el Canal de Chacao, con una extensión de más de 2600 m aproximadamente. La sección del puente presenta profundidades significativas del orden de 120 m y corrientes de hasta 5 m/s inducidas por las mareas en sicigia. Una formación geológica peculiar que hace factible el proyecto es la denominada Roca Remolino, ubicada aproximadamente en medio del trazado, y que genera aguas poco profundas donde se hace idónea la instalación de la pila central del puente.



Ilustración 1: Izq: Zona de Estudio (Skyring). Der: Esquema del puente (mop.cl).

Este artículo presenta el estudio de abrasión y socavación local de las pilas; uno de los cuantos estudios marinos (mareas, interacción tsunami y mareas, oleaje, mediciones, dispersión de contaminantes, entre otros) desarrollados por la empresa Skyring Marine para el Consorcio Puente Chacao (CPC). El estudio de abrasión y socavación contó con la participación del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y la empresa Geohazard de Estados Unidos; esta última participó en el desarrollo de las pruebas de resistencia efectuadas a las muestras de suelo marino. Por la magnitud del trabajo, y la disponibilidad de espacio del artículo se presenta los resultados del estudio de abrasión para la Torre Central, y la hidrodinámica del campo cercano.

2. METODOLOGIA

Para todo puente, en especial aquellos de gran envergadura, la estimación de la socavación local del lecho entorno a las pilas se efectúa mediante métodos como el HEC-18 o el método del departamento de transporte de florida (FDOT). La aplicación de estas formulaciones requiere de caracterizar las variables hidrodinámicas (profundidad y velocidad de aproximación del flujo a la pilas), la geometría de la pila (forma y la distribución del arreglo de las pilas, considerando que en este caso es compuesta) y el tipo de suelo en donde se funda. La gran mayoría de los métodos

empleados para estimar la socavación local provienen de ensayos de laboratorio y consideran suelos granulares como arenas y gravas. Para suelos cohesivos, existen también métodos para estimar la socavación local, pero son menos abundantes (e.g. Briaud et al 2011). Para este tipo de suelos es de interés determinar la evolución temporal de la socavación. Finalmente, existen pocos métodos para estimar la socavación local en rocas, y resaltan los trabajos efectuados por Annandale (1991), que establecen mecanismos de falla para calcular y determinar el índice de erosibilidad (*erodibility index method*) estimado a partir de los factores de desprendimiento en bloque, abrasión, cavitación, y otros más.

El caso del Canal de Chacao es justamente complejo, pues se trata de un suelo de tipo rocoso, con un tipo de rocas coloquialmente conocidas como *cancagua*. Las características del lugar son también especiales pues se trata de un ambiente marítimo con una alta influencia de las corrientes mareales, de tipo cíclico, y a otras forzantes como el oleaje, los tsunamis, las corrientes inducidas por viento y por los gradientes de densidad. Ante estas dificultades y careciendo de un método específico para el problema en cuestión, se adaptó una metodología de cálculo de erosión en suelos cohesivos para la abrasión de rocas, considerando supuestos conservadores (es decir, maximizando la erosión). Para determinar la tasa de socavación local máxima durante la vida útil del proyecto (100 años), considerando el suelo rocoso y las características del flujo, se planteó la siguiente metodología:

- Caracterizar la hidrodinámica local en torno al arreglo de las pilas y con la forma del fondo marino.
- Caracterizar la erosibilidad del material mediante el método del Índice de Erosibilidad (Annandale, 1991).
- Determinar las tasas de desgaste y abrasión del material mediante ensayos de laboratorio EFA y RETA.
- Relacionar el campo de cizalle y las propiedades de desgaste del material y determinar la profundidad de desgaste de largo plazo mediante el método SRICOS modificado.

Modelo Hidrodinámico Local

Para la caracterización hidrodinámica del flujo se utilizó un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS en inglés). Considerando las discusiones de Roulund et al (2005) respecto a los gradientes en la superficie libre y el valor del número de Froude en la Roca Remolinos, se dispuso resolver el problema considerando un modelo bifásico con el fin de capturar la superficie libre. Los escenarios de modelación consideraron la situación con y sin proyecto, sometida a corrientes mareales en fase llenante, vaciante y el tsunami similar al de 1960 (Winckler et al., 2017). Mediante estas simulaciones se determinó el campo de velocidad alrededor de las pilas y el campo de esfuerzos hidrodinámicos generados por el flujo entorno a las pilas.

Se utilizó el modelo de código abierto OpenFOAM, en su versión 2.3 y con un modelo de cierre de la turbulencia k-w SST (Jacobsen et al., 2012). Una complejidad adicional, es que debido a que es un modelo de campo cercano, se consideraron fronteras de sólo agua, las que fueron

incorporadas con la ayuda del módulo adicional wave2Foam, usando zonas de relajación. El dominio de modelación se definió de forma de determinar la interacción entre el fluido, la estructura y la compleja batimetría de la zona. Después de un proceso iterativo, el área se determinó centrado la ubicación Pila Central del Puente Chacao en torno a un cuadrado de 400x400 m (Ilustración 2).

El dominio de modelación fue discretizado espacialmente con celdas de arista de 8.0 m en las tres direcciones. Para mejorar la resolución en la zona de interés se definió un sector de forma cilíndrica ubicado en el centro del conjunto de pilas, con un radio de 60 m. Las celdas en dicha zona se redujeron a 2 m en las tres direcciones (Ilustración 2a). La Ilustración 2b muestra el refinamiento de la batimetría y de las pilas, donde se resuelve la interacción del flujo con la estructura en celda igual a 0.125 m en las tres direcciones.

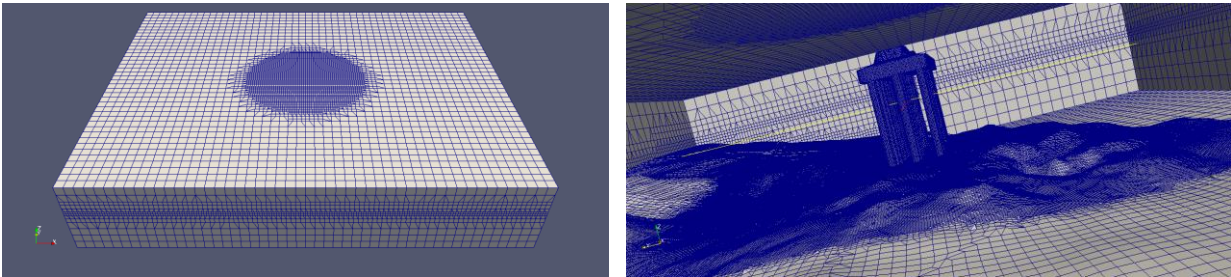


Ilustración 2: Izq: Detalle general del dominio numérico. Der: detalle de la pila.

Las fronteras mojadas del modelo se orientaron de modo que los límites paralelos al canal fueran paralelos con las líneas de corrientes y los bordes de entrada y salida fueran perpendiculares a ellas. La orientación de las líneas de corrientes se obtuvo del modelo regional del Canal de Chacao implementado por Skyring Marine con el software MIKE21, del cual además se extrajeron las variables de altura y velocidad media para los distintos escenarios. Cabe mencionar que este modelo fue debidamente calibrado y validado mediante datos de ADCP (Winckler et al., 2017). Las condiciones de borde en la sección de entrada fueron de velocidad constante y uniforme según sea cada escenario y gradiente cero para la sección de salida de flujo. Para las secciones laterales se ocupó una condición de simetría en tanto que para el fondo se usó una condición de pared llamada *kqRWallFunction*. Para la cara superior se utilizó una condición de atmosfera, fijando la presión total en cero. Con el fin de evitar ondas de espurias, se utilizaron las funciones de relajación del *wave2foam* en los bordes de entrada y salida. Finalmente, las condiciones iniciales del modelo (velocidades y alturas de flujo) para cada escenario, se obtienen del modelo 2D.

Caracterización de la tasa de desgaste del material

Para estimar la tasa de desgaste se efectuaron pruebas de laboratorio basadas en muestras del suelo. Se recurrió al *Rotational Erosion Test Apparatus* (RETA), que permite correlacionar los esfuerzos hidrodinámicos con la tasa de desgaste de suelos de carácter cohesivo, rocas de tipo sedimentaria y suelos cementados (Bloomquist et al. 2012). Las pruebas del RETA consisten en ensayos de una probeta cilíndrica y concéntrica que definen una geometría Couette (Ilustración 3). El cilindro

exterior rota a torque controlado por el experimentador, y puede testear rangos de velocidad de hasta 14 m/s. A través de estos ensayos se cuantifica la remoción de masa Δm desde una muestra (probeta) del material en un periodo de tiempo Δt definido por el usuario, estimando el esfuerzo de corte de la probeta a partir de una medición indirecta en el punto de fijación.

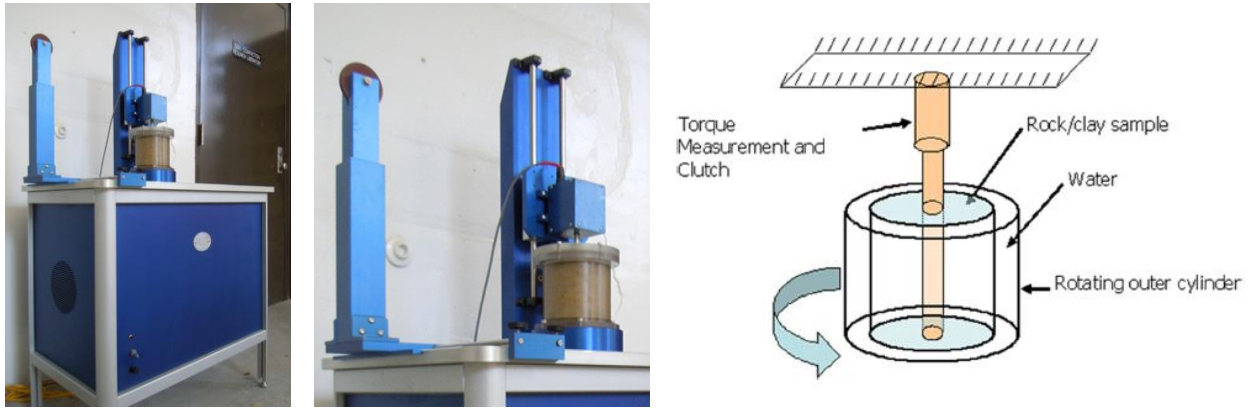


Ilustración 3: Izq. y centro: Equipo RETA. Der: Funcionamiento del RETA. (Geohazard 2015)

Las muestras fueron extraídas en puntos cercanos a la zona de ubicación de las pilas. Dicha maniobra, efectuada durante los pocos minutos de estoa, es compleja, considerando las magnitudes de la corriente existentes y la dificultad de efectuar trabajos bajo el agua. Una vez extraídas las muestras, fueron cortadas para generar la probeta cilíndrica y empaquetadas en un envase hermético para su envío y posterior ensayo por parte de la empresa Geohazard en Estados Unidos.

Método de SRICOS para el caso del Canal de Chacao

La estimación de la abrasión local de la roca en las pilas del Puente Chacao se realizó a partir de la metodología SRICOS (Briaud et al., 1999), desarrollada para estimar la evolución temporal de la profundidad de socavación para una pila cilíndrica fundada en un suelo cohesivo y extendida para evaluar múltiples crecidas (Briaud et al., 2001). Estos estudios permiten observar que la socavación máxima es muy similar en arcilla y arena, sin embargo, las escalas temporales en que ocurren son muy diferentes (Briaud et al. 2002). Ello indica que la socavación máxima no estaría fuertemente influenciada por las propiedades del fondo sino que por las condiciones del flujo. Esto hace pensar en su adaptación a rocas, pensando que dicha erosión ocurriría en una ventana de tiempo aún más extensa. Cabe destacar que el método SRICOS ha sido validado para materiales de lecho menos resistentes a la erosión que la roca, por lo que los valores calculados deberían corresponder a un límite superior de la erosión que debería esperarse en roca. La ventaja de aplicar este método radica en que permite estimar la evolución de la profundidad de socavación en el tiempo en suelos con tasas de erosión bajas. Esto tiene relevancia ya que es probable que la erosión durante un evento específico sea baja, pero la acumulación de los efectos de una serie de eventos sucesivos sea importante, lo que resulta relevante en obras cuya vida útil es considerable.

La adaptación de esta metodología en el Puente Chacao requiere de supuestos y consideraciones entre las que destacan:

- El método para el cálculo de la abrasión se aplica a cada pila del puente por separado. Esto se sustenta en que la razón entre la separación de las pilas y el diámetro de ellas es igual a 3.0, lo cual se encuentra en el límite propuesto por Ghaemi et al. (2012) para considerar que las condiciones de flujo en una pila no están influenciadas por las pilas adyacentes.
- Las condiciones del flujo debido a las mareas (periódicas) son asimilables a una condición de múltiples crecidas. Lo anterior se realiza a través de una simplificación del régimen mareal a través de una separación en las fases llenante y vaciante. Cada fase es representada por su velocidad máxima, que se mantiene constante durante la fase llenante/vaciante del ciclo semidiurno de marea (6.24 horas). Si bien esta simplificación sacrifica bastante la física real, establece una condición conservadora del potencial abrasivo.

Considerando lo anterior, la adaptación del método de SRICOS al presente estudio se logra a través de las siguientes etapas de cálculo:

1. Obtener una relación entre la tasa de abrasión y el esfuerzo de corte. Esta relación se obtiene a partir de los resultados obtenidos con los ensayos RETA (GeoHazards, 2015). Los resultados requieren de un tratamiento previo que permite identificar una curva de tendencia que relacione la tasa de abrasión y esfuerzo de corte. De esta forma, se establece una ecuación del tipo $\dot{Z} = f(\tau)$, donde \dot{Z} es la tasa de abrasión y τ el esfuerzo de cizalle del flujo. Se optó por considerar una regresión de tipo lineal, pues es la que mejor representa la erosión en suelos de carácter cohesivo (Ariathurai and Arulanandan, 1978).
2. Calcular el esfuerzo de corte de fondo máximo en la zona de las pilas del puente. El esfuerzo de corte máximo se calcula para cada pila a partir de los resultados del modelo hidrodinámico en 3 dimensiones implementado en OpenFOAM. Con el objetivo de tener una sensibilidad de los resultados, el método adaptado se aplicó a los valores mínimos, medios y máximos del 5% superior de los esfuerzos de corte modelados.
3. Calcular la tasa de abrasión inicial para el esfuerzo de corte de fondo antes del inicio de la abrasión. El cálculo de la tasa de abrasión inicial se realizó a partir de los valores de esfuerzo de corte obtenidos previamente, y se utilizan como variables en las curvas de tendencia de tasa de abrasión versus esfuerzo de corte.
4. Estimar la máxima profundidad de abrasión. La profundidad máxima de abrasión en cada pila del puente se estimó utilizando la fórmula propuesta por Briaud et al. (1999) en el método SRICOS. Este resultado en conjunto con la tasa de abrasión inicial fueron usados para construir un modelo de evolución de la profundidad de abrasión en el tiempo.
5. Construir una curva que relacione profundidad de abrasión con el tiempo. La construcción de una curva que relaciona la profundidad de abrasión con el tiempo se realizó considerando el modelo hiperbólico propuesto por Briaud et al. (1999) en el método SRICOS, luego de analizar diversas curvas de ajuste a datos de socavación medidos en el

laboratorio. Si bien la elección de un modelo hiperbólico puede ser discutible, la prueba real de este modelo sólo se obtendría al contrastar las predicciones con mediciones en terreno. Hasta el momento en que se realizó este trabajo esta validación se encuentra en desarrollo, sin embargo, el buen ajuste con los datos de laboratorio medidos por Briaud y sus colaboradores justifican su aplicación.

6. Obtener una curva que describa la evolución de la abrasión en el tiempo producto del efecto acumulativo de las dos fases de marea. Luego de la obtención de una curva de abrasión versus tiempo para cada pila del puente por separado y para cada fase de marea, esta información fue combinada para definir una única curva de evolución utilizando el método propuesto por Briaud et al. (2001). Lo anterior se realizó simplificando las velocidades máximas de flujo en la fase llenante/vacante del ciclo semidiurno de marea (6.24 horas).
7. El efecto de estas dos condiciones de flujo se acumula de forma secuencial de forma de alcanzar los periodos de tiempo significativos de interés, en este caso 10, 25, 50, 100, 200 años.

3. RESULTADOS

Velocidades locales

Se simuló el flujo para los casos con y sin proyecto, considerando distintas condiciones de mareas y tsunamis (por concepto de espacio se presentan exclusivamente las condiciones mareales). La Ilustración 4 muestra resultados de un corte de planta, donde en color negro se indica la zona de roca y en colores la magnitud de la velocidad. Se aprecia el efecto de la roca y las pilas en la dirección y magnitud del flujo. En la Ilustración 5 se presenta un resultado típico para un corte transversal, en donde se puede también apreciar el efecto de las pilas en la distribución de velocidades verticales.

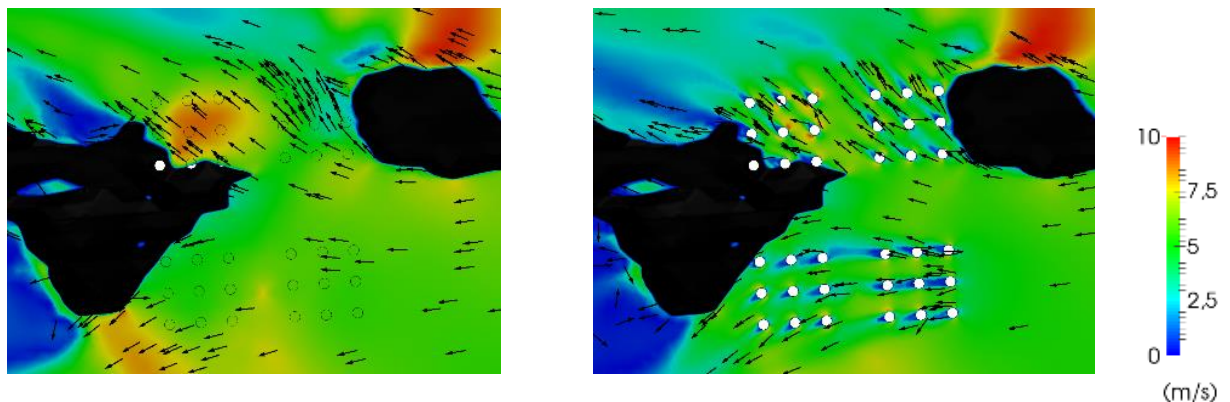


Ilustración 4: Vista en planta de la modelación del escenario de marea en fase vaciante. Izq: caso sin proyecto. Der: caso con proyecto.

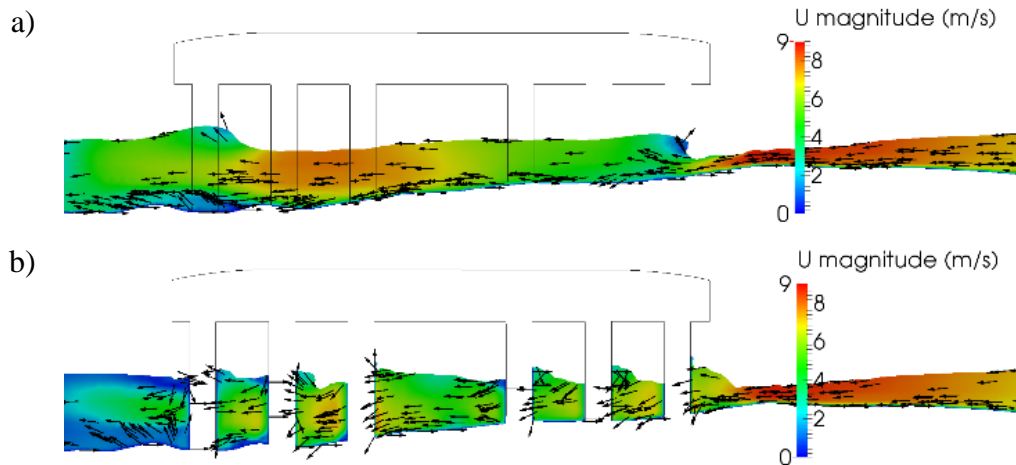


Ilustración 5: Escenario de marea en fase vaciante. Corte longitudinal en el perfil 1. (a) caso sin proyecto (b) caso con proyecto.

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los cortes efectuados al modelo en donde se extraen los estadígrafos (valores mínimos, medios y máximos) por sección para los casos de marea llenante para los casos con y sin proyecto. Como es esperable, las pilas generan un cambio en las condiciones de flujo que, sin embargo, no es significativo en orden de magnitud. En algunas secciones se observa un aumento de la velocidad, aunque en la mayoría se ve una disminución. Se observa asimismo un incremento localizado de la velocidad entorno a las pilas (Ilustración 4) cuya localización es también variable, lo que es esperable dada la complejidad con la que inciden las corrientes y el efecto del fondo marino. En general, las zonas laterales de las pilas que enfrentan el flujo son los lugares donde se identifican aumentos significativos de la velocidad, con valores del orden de dos a tres veces superior al caso sin proyecto (del orden de hasta 8 a 9 m/s con mareas en sicigia).

Caso	Sin Proyecto			Con Proyecto		
	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
1	0.27	3.62	6.85	0.36	3.84	5.69
1.5	0.04	3.40	6.37	0.11	3.19	5.71
2	1.18	3.74	6.05	0.07	2.43	4.82
2.5	0.81	3.50	6.33	0.13	2.57	5.50
3	0.13	3.42	6.27	0.13	2.30	4.26
3.5	0.10	2.72	6.22	0.02	2.02	4.48
4	0.06	1.61	5.70	0.06	1.60	5.89
4.5	0.03	1.01	5.31	0.04	1.02	5.35
5	0.09	1.03	5.30	0.05	1.13	5.70
5.5	0.04	0.72	4.58	0.04	0.78	4.95
6	0.08	0.65	2.97	0.06	0.76	2.90

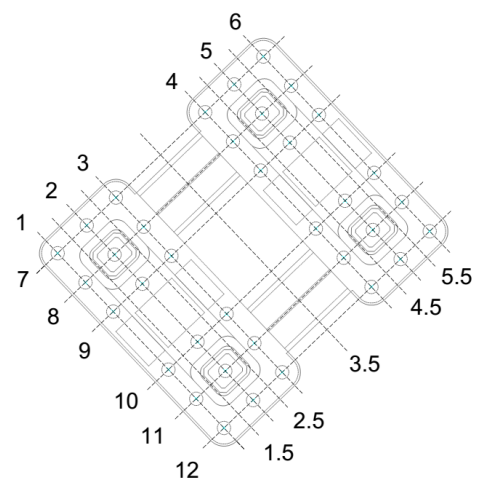


Tabla 1 Campos de la velocidad para los escenarios modelados para la pila central. Esquema de la disposición y numeración de las pilas, en pila central para el escenario de marea llenante.

Esfuerzo de Cizalle

A partir del campo de velocidad generado por el modelo CFD, se estimó el esfuerzo de corte del fondo. Existen varios métodos para estimar este esfuerzo: Algunos se basan en el supuesto de flujo uniforme y perfil logarítmico, del cual se estima la velocidad de corte ajustando una curva, otros consideran la variación de la energía cinética turbulenta para estimarlo. Todos estos enfoques fueron evaluados en este estudio, apreciando grandes diferencias entre estos. En este contexto se optó por usar la aproximación clásica de Boussinesq para la estimación de este parámetro que se complementa con el modelo de turbulencia k-w SST para resolver la viscosidad turbulenta del flujo. Los resultados fueron validados al contrastarse con algunos valores de literatura. También para verificar el esfuerzo de corte muy cerca de la pila, se realizó una comparación considerando los valores normalizados del esfuerzo de corte, llegando a resultados muy comparables con otros trabajos (Ilustración 7).

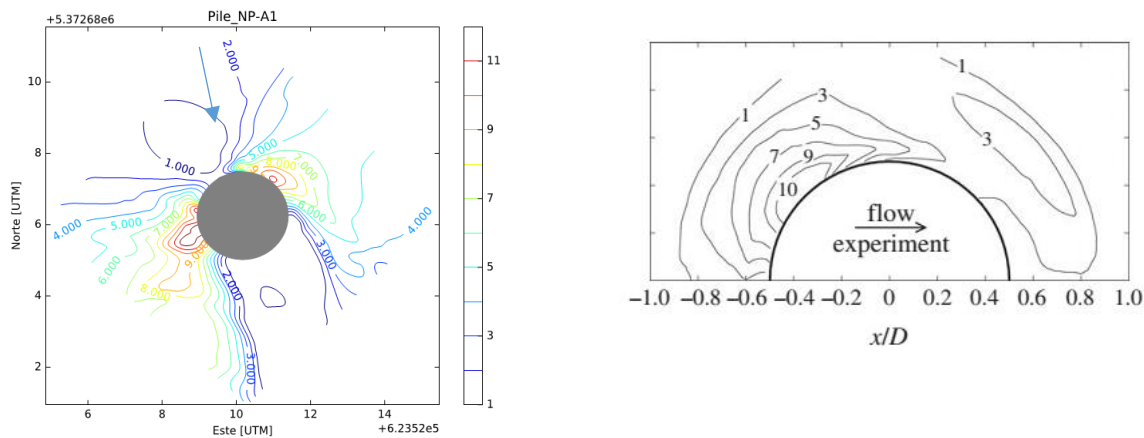


Ilustración 6: comparación de amplificación del esfuerzo de cizalle en las pilas, izquierda, modelo para una pila, derecha experimental por Hjoth P. (1975). El sentido del flujo no es coincidente.

Mediante este método, se obtuvo un campo de esfuerzos de corte en todo el dominio para cada instante. Para ser aplicable, la metodología se reduce a un único valor por pila. Para ello los valores calculados computacionalmente fueron ordenados estadísticamente a través de histogramas de frecuencia y obtenidos para los escenarios de corrientes mareales en fase llenante, vaciante y eventos extremos del tipo tsunami y tsunami acoplado con marea. Estos resultados muestran que la situación de tsunami acoplado con marea ofrece el escenario más desfavorable desde el punto de vista de la intensidad de esfuerzos, sin embargo, debido a que es un evento de corta duración, de muy baja probabilidad, se optó por usar la marea vaciante como el caso más desfavorable. Para este caso, se observan valores tan altos como 1000 Pa, sin embargo, tales valores corresponden a valores máximos. En promedio, más del 80% de los datos calculados para ambas fases de marea se encuentran preferentemente bajo los 100 Pa. A pesar de lo anterior, para un diseño conservador, se optó por escoger aquel rango que concentra el 5% superior de la distribución acumulada de esfuerzos turbulentos ($\tau_{t_{95-100}}$). En este rango se identifica un valor mínimo, un valor máximo y el promedio para la torre central ubicada en la Roca Remolino (Tabla 2).

Llenante			Vaciente			Tsunami-marea		
Mínimo	Promedio	Mínimo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
153	174	230	412	483	658	597	692	949

Tabla 2: valores promediados (percentil del 5%) del esfuerzo de corte [Pa] en torre central.

En resumen, de los resultados de este capítulo se desprende que la distribución de estos esfuerzos fue bastante irregular para cada escenario, lo cual es un signo del carácter complejo del escurrimiento y del efecto de la irregularidad de la batimetría de la roca remolino. Los valores obtenidos para los esfuerzos de cizalle son muy conservadores, pero útiles para definir un umbral máximo de socavación según la metodología SRICOS.

Resultados ensayos de prueba de abrasión RETA y Método SRICOS.

Los ensayos del RETA presentan la relación entre el material erosionado y el esfuerzo de corte actuante, para varias pruebas (Ilustración 9). En general las tasas de abrasión son inferiores a 0.035 mm/año para esfuerzos de corte inferiores a 100 Pa. Para esfuerzos de corte superiores a 100 Pa se observan tasas máximas del orden de 0.22 mm/año. Solo en un caso se observa un comportamiento fuera de lo común, con tasas de desgaste superiores a 0.1 m/año atribuibles a desprendimientos de rocas incrustadas en el material debido probablemente a un estado pre-fracturado del mismo.

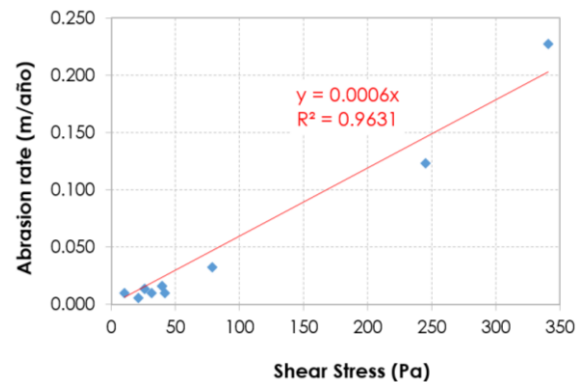
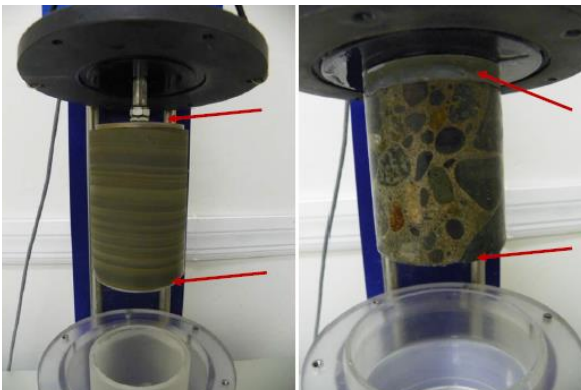


Ilustración 7: Izq: Ejemplo de ensayo RETA y probeta típica. Derecha: Resultado más extremo obtenido para Torre Central.

A partir de los resultados de esfuerzos de cizalles estimados, se pudo adaptar la metodología SRICOS que permite tomar en cuenta la naturaleza del material a través de la relación característica entre la tasa de desgaste (r) y el esfuerzo de corte aplicado sobre el suelo (τ_w). Bajo el supuesto que rocas pueden ser asimiladas a un suelo extremadamente cohesivo y considerando que se conocen las relaciones $r = f(\tau_w)$ a partir de las experiencias RETA para condiciones hidrodinámicas extremas respecto de las que realmente ocurrirán en la zona de interés, el método SRICOS arroja profundidades de desgaste en la vida útil de la obra (100 años) de 1.82 m para el caso de la Torre Norte y de 0.63 m para el caso de la Torre Central del Puente.

4. CONCLUSIONES

Se ha adaptado una metodología SRICOS para estimar la socavación local al problema de la socavación de las pilas del Puente Chacao. La metodología es aplicable a todo tipo de suelos y particularmente para suelos cohesivos. En el presente estudio se ha extendido a rocas mediante la aplicación de pruebas de abrasión mediante el ensayo RETA, con el supuesto que el proceso de erosión ocurre en una ventana de tiempo aún más extensa que para suelos cohesivos. Para incluir el efecto de agrupamiento de las pilas en la amplificación del esfuerzo de corte, se implementó un modelo CFD, el que permitió estimar esfuerzos de cizalle hidrodinámico en la base de las pilas. Aun cuando estos esfuerzos resultan por sobre los valores vistos en la literatura, se utilizaron en forma conservadoras para el cálculo en un horizonte de 100 años correspondiente a la vida útil del puente.

Con los datos recopilados, el modelo numérico y supuestos conservadores, se estima que las pilas de la Torre Central presentarían una profundidad de desgaste en el rango 0.00 m a 0.63 m; valor que debiera ser una cota superior de la abrasión. De esta manera, se ve que la abrasión no es un problema preocupante desde el punto de la estabilidad de la estructura. Sin embargo, en el estudio se analizaron otros mecanismos de falla, que sí pueden ser importantes, como es el caso del desprendimiento en bloques.

Considerando que para su estimación existe más incertidumbre que el caso de la abrasión, y que también existe un sesgo en el muestreo, es que en el marco del estudio se recomendaron las siguientes medidas para el resguardo de las pilas:

- Recopilar antecedentes geológicos sobre la estructura interna del lecho de la Torre Norte y Central a fin de estimar más precisa acerca del índice de calidad de la roca (RQD).
- Usar protecciones de seguridad contra la erosión para las pilas de ambas torres, ante la incerteza de las metodologías existentes para estimar el desprendimiento de rocas. Como valores de diseño para la abrasión se deben considerar de 1 y 2 m para la Torre Central y Norte, respectivamente.
- Las protecciones deben ser determinadas por los equipos a cargo del diseño de las pilas, tomando en cuenta los métodos constructivos apropiados a la geografía y geología local.
- Incorporar un plan de monitoreo continuo del desgaste en las rocas durante y después de construido el puente mediante simple inspección a través de registros de videos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CPC por los permisos para presentar el presente trabajo y a los colaboradores Ignacio Beyá M. y a Francisco Martínez C. quienes participaron en la elaboración del informe.

REFERENCIAS

Annandale G.W. (1991). Estimation of bridge pier scour using the erodibility index method. *Stream Stability and Scour at Highway Bridges: Compendium of Stream Stability and Scour Papers*. ASCE.

Ariathurai, R., and Arulanandan, K. (1978). Erosion rates of cohesive soils. *J. Hydr. Div., ASCE*, 104(2), 279–283.

Bloomquist D., Sheppard D. Max, S. Schofield & R. W. Crowley (2012). The Rotating Erosion Testing Apparatus (RETA): A Laboratory Device for Measuring Erosion Rates versus Shear Stresses of Rock and Cohesive Materials. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35, No. 4. Paper ID GTJ104221.

Briaud J.-L., Chen H.-C., Chang K.-A., OH S.J., Chen S., Wang J., Li Y., Kwak K., Nartjaho P., Gudaralli R., Wei W., Pergu S., Cao Y.W. and Ting F. (2011). The SRICOS-EFA Method. Texas A&M University, Texas, USA.

Briaud, J.-L., Ting F., Chen H., Gudavalli S. and Kwak K. (2002). Maximum Scour Depth around a Bridge Pier in Sand and in Clay: Are They Equal?. *Deep Foundations 2002*. February 2002, pp 385-395.

Briaud J.-L., Chen H.-C., Kwak K., Han S.W. and Ting F.C.K. (2001). Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(2), pp 114-125.

Briaud, J.-L., Ting F.C.K., Chen H.C., Gudavaiiii R., Perugu S. and Wei G. (1999). SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4), pp 237-246.

Geohazards Inc. (2015). Erosion of Cored Samples for the Chacao Channel Bridge project Chile, South America. Gainesville (FL), USA.

Ghaemi, N., Etemad-Shahidi, A., and Ataie-Ashtiani, B. (2012). Estimation of current-induced pile groups scour using a rule based method.

Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70, pp. 1073–1088.

Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe, J. and Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *J. Fluid Mech.*, 534, pp. 351–401.

Winckler, P.; Sepúlveda, I.; Aron, F. and Contreras-López, M. (2017). How Do Tides and Tsunamis Interact in a Highly Energetic Channel? The Case of Canal Chacao, Chile. DOI: 10.1002/2017JC012680 *Journal of Geophysical Research*.