

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**REMOCIÓN HIDRÁULICA DE SEDIMENTOS A TRAVÉS DE TUBERÍAS:
EQUIPO SEDICON EN CÁMARA DE CARGA CHACABUQUITO**

ALBERTO JIMÉNEZ CORDERO ¹
JUAN LUIS HERNÁNDEZ VIERA ²

RESUMEN

El transporte de sedimentos a través de tuberías ha sido utilizado por el hombre con diversos propósitos desde hace miles de años. En particular, la técnica de hidrosucción representa una solución muy práctica para remover sólidos depositados en desarenadores, cámaras de carga y embalses de centrales hidroeléctricas, en donde se hace uso de la fuerza de la aceleración de la gravedad como fuerza motriz.

Los principales parámetros que determinan la capacidad de arrastre de sedimentos a través de una tubería son la carga hidráulica, la longitud de la conducción y su diámetro. Otras variables como el tipo de material de la tubería y la distribución granulométrica del sedimento también influyen en el resultado.

El método de hidrosucción presenta además la enorme ventaja que permite remover sedimentos sin necesidad de hacer un vaciado o bajar el nivel del agua en la estructura, produciendo de esta forma, una alteración mínima sobre la operación comercial de la central hidroeléctrica.

Este trabajo presenta el análisis hidráulico del equipo SediCon para remover sedimentos instalado en la cámara de carga de la central Chacabuquito de Colbún en Febrero de 2017. Se analizan los principales resultados, imprevistos y desafíos que se encontraron durante los primeros días de operación, así como consideraciones especiales para el diseño del cabezal de succión, el cual cuenta con un perfil hidrodinámico para operar con un flujo con una velocidad de hasta 1.5 m/s en la cámara de carga.

¹Ingeniero Civil, Master en Ciencias, Director Regional de SediCon para Latinoamérica, alberto@sedicon.no

²Ingeniero Civil, Jefe Asistencia Técnica Civil Mecánica, Gerencia de Ingeniería, Colbún, jhernandez@colbun.cl

1. INTRODUCCIÓN

El transporte hidráulico de sólidos a través de tuberías es el principio básico de toda draga hidráulica. En el caso específico de un equipo por hidrosucción se utiliza la diferencia de elevación entre el nivel del agua y el punto de descarga como carga hidráulica que produce la fuerza motriz para inducir el flujo a través de la tubería, haciendo uso de la energía potencial.

El uso de dragas hidráulicas es muy atractivo para embalses, desarenadores, cámaras de carga y tomas de agua en los cuales se acumulan importantes cantidades de sedimento que afectan la operación de la central hidroeléctrica.

2. ARRASTRE DE SEDIMENTOS EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES

Los afluentes de la parte alta del río Aconcagua tienen sus inicios cerca del pico del Aconcagua, la montaña más alta de América perteneciente a la Cordillera Principal de Los Andes, con una altura de 6,960.8 msnm y el segundo más alto de la Tierra después del sistema de Los Himalayas en Asia. El proceso de derretimiento de nieve y glaciación erosiona el terreno arrastrando una enorme cantidad de sedimentos hacia los cursos de agua, con producciones específicas superiores a las 1,000 ton/km²/año, ubicándose en la clasificación de los mayores valores del mundo. Evidentemente, el derretimiento de la nieve y glaciares produce también una importante cantidad de agua, la cual baja precipitadamente por la cordillera, representando también un enorme potencial para el aprovechamiento hidroeléctrico, uno de los principales recursos energéticos de Chile. La combinación de estos factores impone un gran reto para aprovechar la energía hidráulica, ya que al mismo tiempo se deben tomar consideraciones para el adecuado manejo de sedimentos.

Los sedimentos producidos en la parte alta de los ríos y sus afluentes encuentran una fácil movilización por los cauces, favorecidos por las fuertes pendientes del terreno y un suelo con escasa cobertura vegetal, produciendo el mayor arrastre de material sólido durante el verano cuando también se presentan los mayores caudales en el río.



Figura 1. Fotografías mostrando el arrastre de sedimentos en el río Juncal

Las fotografías de la figura 1 dan una muestra del arrastre de sedimentos en el río Juncal, uno de los principales afluentes del Aconcagua, fotografías tomadas en Diciembre de 2016. El material sólido movilizado consiste desde grava de gran tamaño (rocas de hasta 30-40 cm de diámetro) hasta limos y arcillas, igualmente problemáticos para los aprovechamientos hidroeléctricos.

3. CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHACABUQUITO

Colbún cuenta con todo un complejo de centrales hidroeléctricas en la cuenca del río Aconcagua, aprovechando varios de sus tributarios como el Juncal, Juncalito, Blanco, Colorado y otros. Las centrales hidroeléctricas son Hornitos, Juncal, Juncalito, Blanco, Los Quilos y Chacabuquito, con potencias desde los 2 MW hasta los 60 MW, para un total en la cuenca de 210 MW de potencia. Todas ellas enfrentan serios problemas por motivo del arrastre de sedimentos y varias de ellas entregan sus aguas recién turbinadas a la captación de otra central aguas abajo. Por este motivo, los problemas de sedimentación en todas las centrales del complejo deben verse en forma conjunta.

La Central Hidroeléctrica Chacabuquito inició operación en el año 2002 y es propiedad de Colbún SA, el segundo mayor productor de energía del país. Es la planta de producción de energía hidroeléctrica ubicada más aguas abajo en la cuenca del Aconcagua, es de tipo “pasada” (a filo de agua), toma las aguas de la descarga de la Central Los Quilos, la cual a su vez aprovecha los caudales de los ríos Colorado y Aconcagua, con un alto arrastre de sedimentos y también aprovechados en la parte alta por otras centrales hidroeléctricas. El agua es transportada por una conducción que incluye un sifón con paso bajo el río Aconcagua, un paso en túnel y otros tramos de canal abierto, para una longitud total de casi 10 km hasta llegar a una cámara de carga. La característica de canal abierto permite además que material suelto del terreno se deslice hasta el curso de agua, aumentando aún más el volumen de material sólido que es transportado por el canal.

La cámara de carga tiene aproximadamente 70 m de largo, 5 m de ancho y cuenta con un vertedor lateral que permite la evacuación de agua a través de un canal de excedencias en caso de un rechazo de carga. Dicho canal también sirve como canal de limpieza para los sólidos. La pendiente del fondo de la cámara de carga es muy suave (casi horizontal) en su parte inicial hasta los últimos 25m donde el nivel del fondo se profundiza, facilitando la acumulación de sedimentos justo en frente a la reja de la toma, alcanzando una profundidad máxima de 8 m (ver figura 2). Parte de este material sólido pasa hacia la tubería de presión, con el consecuente efecto en las turbinas hidráulicas. Por este motivo, los sedimentos acumulados deben ser removidos periódicamente con el agravante de que usualmente esta maniobra implica una parada de la central y uso de equipo mecánico a un alto costo económico (ver figura 3).

Desde la cámara de carga inicia una tubería de presión de aproximadamente 200 m de longitud hasta llegar a la casa de máquinas, donde se encuentran 4 unidades tipo Francis para una potencia total de 25 MW.

La Central Hidroeléctrica Chacabuquito es de importancia estratégica para la compañía ya que produce con un alto factor de planta. Además, constituye la primera central hidroeléctrica del mundo en transar bonos de reducción de emisiones de CO₂ bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de las Naciones Unidas. Este era un motivo más por el cual, Colbún buscaba una

solución ambientalmente amigable para el problema de sedimentación, acorde con la política de la empresa de producir energía utilizando recursos renovables y con el menor impacto posible al medio ambiente.

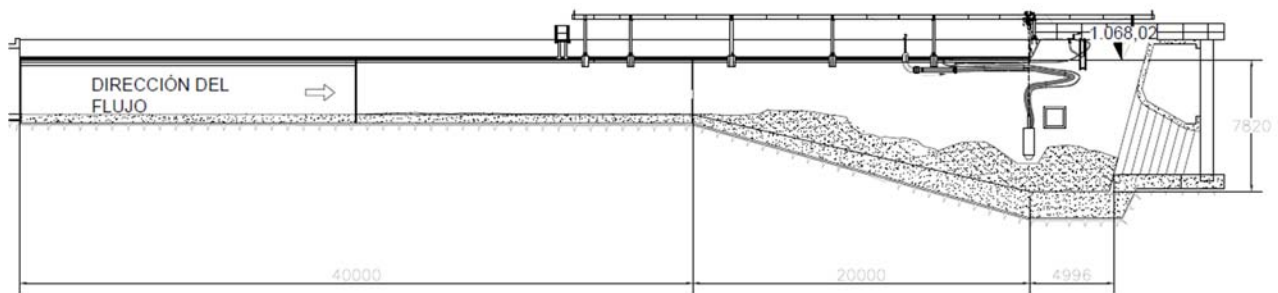


Figura 2. Perfil longitudinal de cámara de carga Chacabuquito



Figura 3. Fotografías cámara de carga Chacabuquito durante limpieza mecánica

Cabe destacar además, que Colbún valora la posibilidad de mejora que entrega este equipo a la operación de Central Hidroeléctrica Chacabuquito, en el sentido que la tecnología de hidrosucción que se incorpora permitirá limpiar de sedimentos de la cámara de carga en forma continua y con personal propio de Colbún (prescindiendo de empresas externas), lo que permitirá evacuar el material sedimentado al cuerpo receptor de agua - el río Aconcagua - en una proporción similar a la que ingresa, lo que lleva a la operación de limpieza a acercarse cada vez más a las mejores prácticas de sostenibilidad con el medio ambiente.

Además, como resultado favorable adicional, se espera que la implementación del equipo de limpieza de sedimentos tenga como resultado una disminución en el ingreso total de la masa de sedimentos por la tubería en presión hacia las turbinas hidráulicas, por lo tanto se avizora que el mantenimiento de los componentes electromecánicos e hidromecánicos ubicados aguas abajo de la cámara de carga se torne más barato y sencillo de implementar.

Esto último, es un foco de estudio en el que Colbun ahondará una vez que disponga de datos suficientes relacionados a la abrasión de los elementos hidromecánicos y electromecánicos una vez utilizado el equipo de limpieza de sedimentos, en contraste con la estadística histórica que se tiene del desgaste registrado durante los trabajos rutinarios de mantenimiento.

4. PRINCIPIO HIDRÁULICO DE HIDROSUCCIÓN

El principio hidráulico de hidrosucción consiste en utilizar la carga hidráulica que resulta de la diferencia de elevación entre los niveles aguas arriba y aguas abajo de un cuerpo de agua artificial o natural (para más detalles consultar las Referencias 1 y 2). La energía potencial resultante de esta diferencia de niveles induce el movimiento del agua a través de una tubería y si el extremo inicial de dicha tubería es colocada donde existen depósitos de sedimentos el flujo será entonces de una mezcla agua + sedimentos con una determinada concentración. No es necesaria una fuente de energía externa, ya que, es la aceleración de la gravedad la que induce el movimiento.

El trazado de la tubería en la zona cercana a la presa o muro que contiene el agua puede hacerse de dos formas, la primera atravesando la estructura a un nivel bajo y la segunda subiendo la tubería para pasar en forma de sifón. En ambos casos, se descarga finalmente en un nivel inferior. Una diferencia fundamental entre ambos trazados es el desarrollo de la presión interna que se genera dentro de la tubería, en el primer caso, en vista de que su trazado sigue un nivel bajo (cercano al trazado de la línea de gradiente hidráulico), la presión interna dentro del tubo es cercana a cero, incluso puede llegar a ser positiva; mientras que en el segundo caso, en vista de que la tubería sube por encima del perfil de la línea de gradiente hidráulico la presión interna dentro del tubo es negativa, es decir, hay succión en su interior, siendo el punto de mayor succión precisamente la parte más alta del sifón.

Estos aspectos se aprecian en la figura 4, opción (a) atravesando la estructura y opción (b) en forma de sifón.

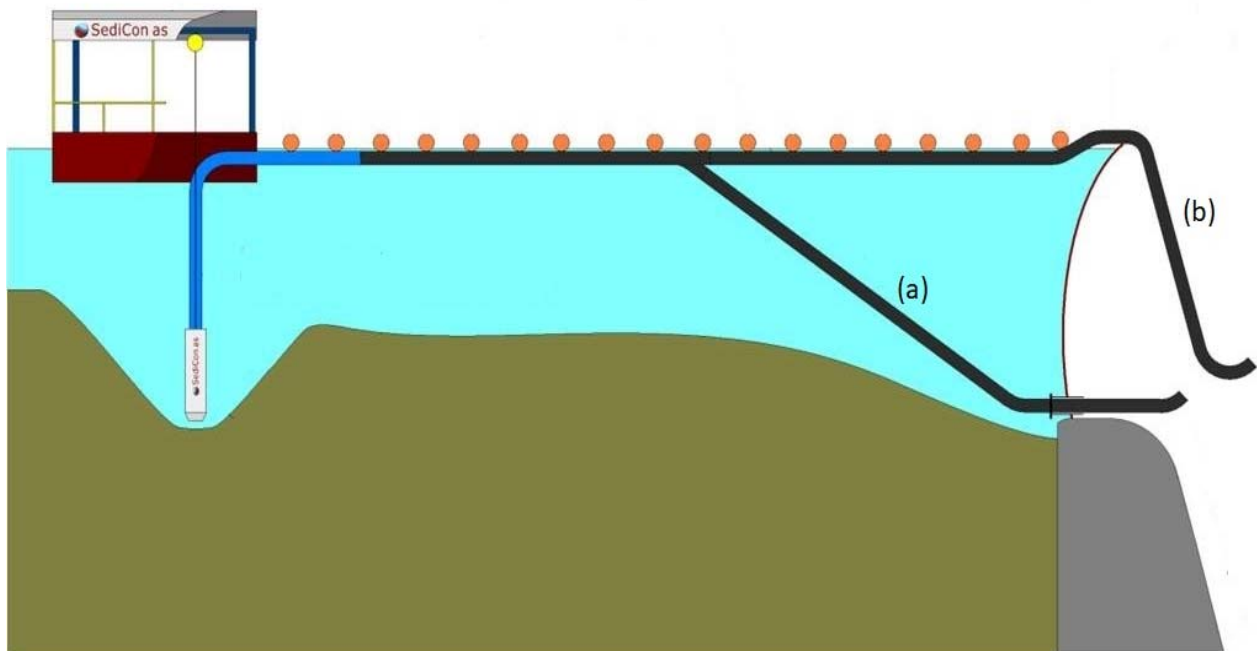


Figura 4. Opciones de trazado de tubería en sistema de hidrosucción (fuente: SediCon)

Con relación al transporte hidráulico de sólidos a través de tuberías, la teoría ha sido ampliamente estudiada y objeto de análisis por sus múltiples aplicaciones: minería, dragado, etc. Aquí simplemente se presentan los principios básicos a manera de proporcionar la base teórica necesaria para el análisis del desempeño del equipo de limpieza de sedimentos SediCon en la hidroeléctrica Chacabucito, objeto del presente artículo.

Hay tres tipos de flujo de lodos (mezcla agua + sólidos) pasando a través de una tubería:

- 1) Homogéneo: ocurre cuando no se presenta una diferencia de concentración o estratificación vertical en la tubería, lo cual generalmente sucede cuando la velocidad del flujo es al menos dos veces mayor que la velocidad de sedimentación de una determinada partícula. Implica entonces que sucede principalmente con partículas en suspensión y con diámetro pequeño (comúnmente menor a 0.03 mm). El comportamiento puede ser modelado como flujo de una sola fase.
- 2) Heterogéneo: en este tipo de flujo entra en juego la aceleración de la gravedad la cual hace que las partículas de sedimento tiendan a acumularse con mayor concentración en la parte inferior de la tubería. Hay por lo tanto, una diferencia de concentración en el eje vertical. A pesar de la estratificación, todas las partículas están en movimiento, sin embargo, aquellas que se ubican en la parte inferior lo hacen con una menor velocidad y se desplazan dando saltos.
- 3) Con carga de fondo estacionaria: cuando la velocidad del flujo no es capaz de mantener en movimiento las partículas de mayor tamaño se forma una capa de fondo estacionaria en la parte inferior del tubo. Sin embargo, sobre esta capa se mantiene un flujo heterogéneo pero a través de una sección transversal que representa tan solo una fracción del área total del tubo. La velocidad a la cual se da la transición entre flujo heterogéneo y con carga de fondo estacionaria se conoce como la velocidad límite de deposición (V_L) y la literatura presenta varias formas para su estimación.

El cambio de régimen de un tipo a otro no obedece a un punto exacto, sino que por el contrario, la transición se da en forma gradual.

La figura 5 muestra los tipos de flujo de lodos en tuberías recién descritos.

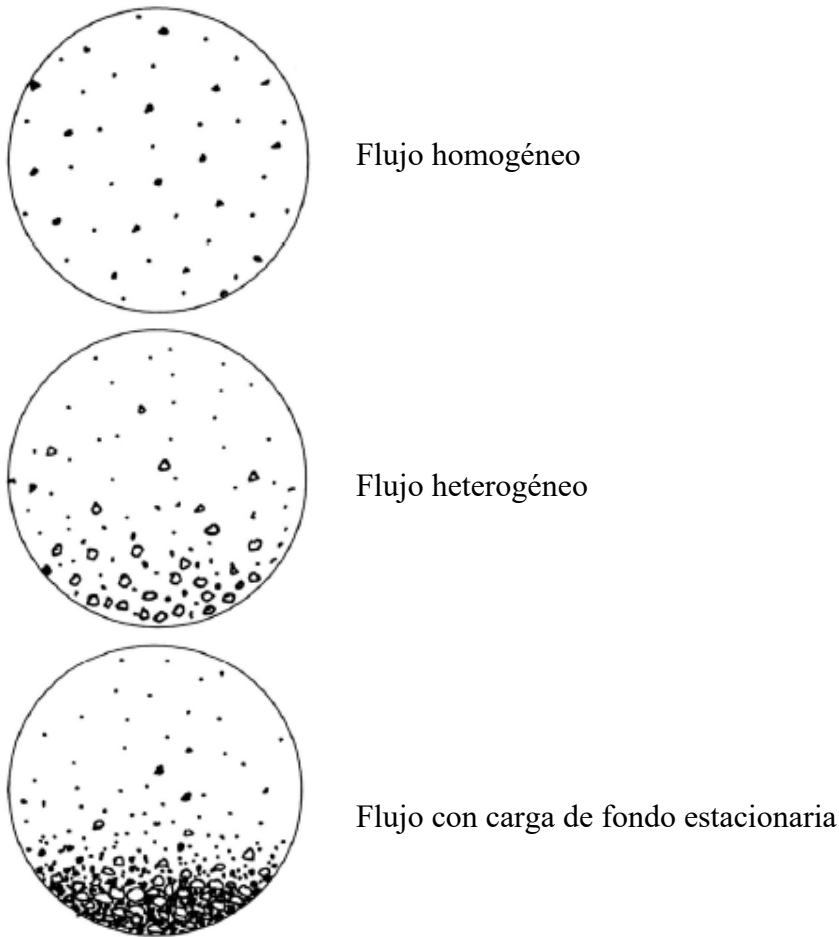


Figura 5. Tipos de flujo de lodos en tuberías, tomado de referencia (3)

5. EQUIPO SEDICON PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHACABUQUITO DE COLBUN S.A.

En Diciembre de 2016 SediCon inició la instalación del equipo de remoción de sedimentos que opera en forma de sifón sobre el muro vertedor de la cámara de carga y utilizando la aceleración de la gravedad como fuerza motriz para transportar el sedimento a lo largo de una tubería. No es necesario el uso de tuberías embebidas y para su instalación se produjo una interferencia mínima con la operación normal de la central (ver figura 6). El material de la tubería del sifón es Polietileno de Alta Densidad (PEAD).

El cabezal de succión es operado desde un puente grúa, también suministrado por SediCon, para convertirse en el primer equipo de SediCon en operar de esta forma. Corresponde también al primer equipo SediCon puesto en operación en Chile. La Figura 7 muestra un corte transversal en la cámara de carga Chacabuquito con el equipo SediCon, así como una fotografía en la que se aprecia el puente grúa, el polipasto para controlar el cabezal, la tubería flexible con flotadores y la parte más alta del sifón.



Figura 6. Instalación del sifón en cámara de carga Chacabuquito

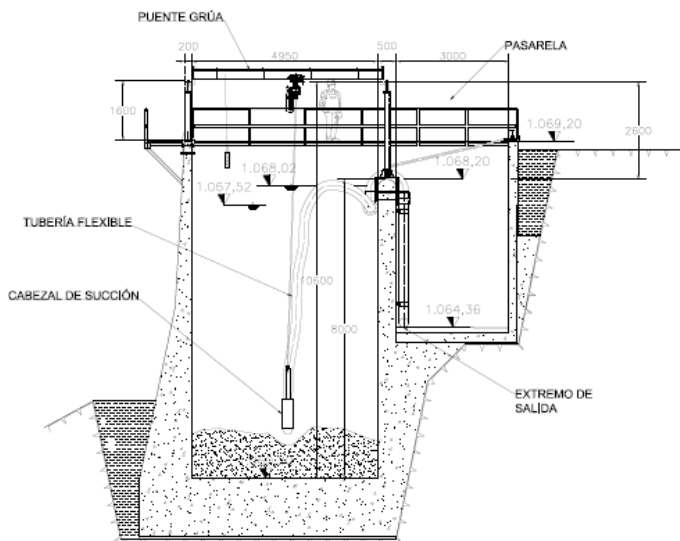


Figura 7. Equipo SediCon instalado en cámara de carga Chacabuquito, vista hacia aguas arriba

Como se puede apreciar, el sistema opera en forma de sifón sobre el muro vertedor de margen izquierda de la cámara de carga. La tubería se inicia con el cabezal de succión, cual es la pieza que hace contacto con los sedimentos y cuya posición es controlada desde el puente grúa. Los movimientos del cabezal son longitudinal, transversal y vertical. El mismo se conecta a un tramo de tubería flexible, con una transición al sifón y tubería de salida, los cuales son en Polietileno de Alta Densidad (PEAD). El punto final de descarga se ubica en el canal de descarga de la estructura.

Para iniciar la operación del equipo se cuenta con una bomba hidráulica que induce la cantidad de movimiento necesaria dentro de la tubería para hacer que el fluido llene el sifón y funcione posteriormente solamente haciendo uso de la gravedad como fuerza motriz. La diferencia de elevación entre el nivel del agua en la cámara y el punto de descarga representa la carga hidráulica que permite el flujo a través de la tubería (ΔH).

Durante los primeros días de operación del equipo se enfrentaron varios problemas, incluyendo el procedimiento para evacuar aire de la tubería y por lo tanto, poder cebar el sifón e inducir el flujo en la tubería utilizando la gravedad como fuerza motriz. A pesar de que la bomba hidráulica tiene la capacidad suficiente para llenar el sifón, la “bolsa” de aire atrapada en el tramo de tubería flexible impedía establecer el flujo al 100%. El problema fue finalmente solucionado con la instalación de una válvula en la tubería de descarga, la cual conjuntamente con un orificio de ventilación ubicado cerca del cabezal de succión, permiten evacuar todo el aire contenido en la tubería flexible y por lo tanto, establecer el 100% del flujo de agua a través del sifón. En la figura 8 se muestra el perfil hidráulico de todo el sistema incluyendo los elementos recién mencionados.

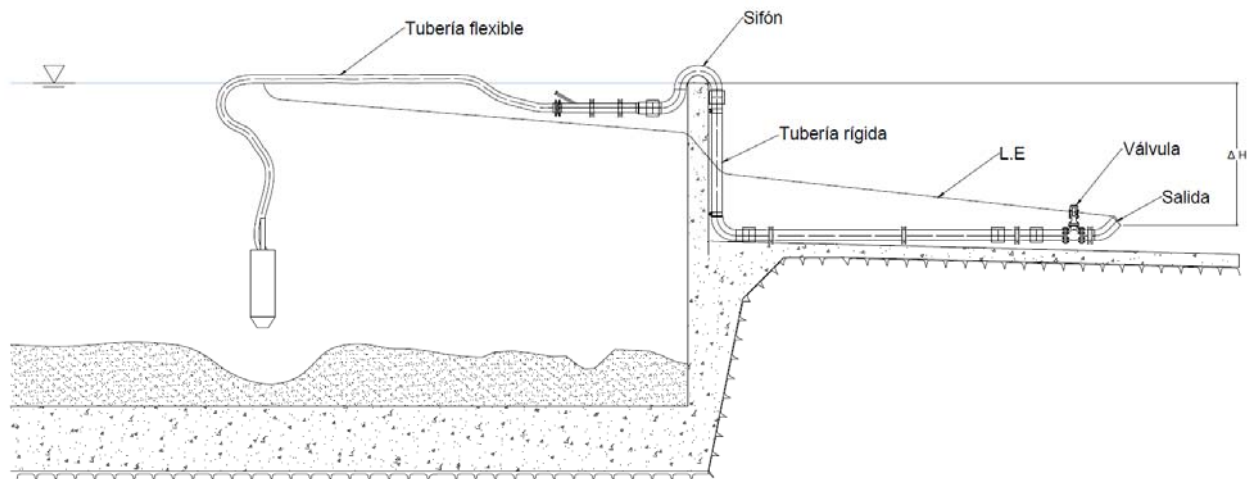


Figura 8. Perfil hidráulico del Equipo SediCon instalado en cámara de carga Chacabuquito

Como se puede observar, a pesar de que el ΔH es de aproximadamente 3.5 m, el equipo es capaz de remover sedimentos que están hasta 8 m bajo el nivel del agua. La figura muestra también la línea de energía (LE) del sistema hidráulico. Se puede observar como un gran tramo de la tubería flexible, así como el sifón se ubican sobre la línea de energía, lo cual quiere decir que la presión manométrica dentro del tubo (P/γ) es negativa, es decir, hay succión, una de las razones por lo cual

es indispensable que no exista aire dentro de la tubería y así el sistema por hidrosucción pueda operar adecuadamente.

La capacidad del transporte hidráulico de sólidos a través de la tubería depende de dos factores:

- a) El flujo a través del sistema (caudal)
- b) Concentración de sedimentos (relación volumétrica entre sólidos y líquido)

Flujo a través del sistema:

El flujo de agua a través del sistema se calcula haciendo uso de la ecuación Darcy – Weisbach:

$$H_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (1)$$

Esta ecuación se resuelve por iteraciones hasta encontrar la velocidad tal que iguala los términos cuando se tienen los siguientes valores para las demás variables:

- H_f representa la carga hidráulica del sistema, es decir, la diferencia de elevación entre el nivel del agua y el punto de descarga (ΔH en la figura 8).
- f factor de fricción, estimado con el diagrama de Moody o las fórmulas para flujo turbulento
- L longitud de la tubería (considerando tanto el tramo flexible como el de PEAD). Las pérdidas locales se consideran utilizando la longitud equivalente del elemento correspondiente (entrada, cambio de dirección, válvula y salida).
- D diámetro interno de la tubería

La velocidad del flujo para el sistema instalado en la cámara de carga Chacabuquito es de 5 m/s, suficiente para garantizar flujo heterogéneo a lo largo de la tubería.

Una vez conocida la velocidad del flujo (V), se calcula el caudal (Q) utilizando la ecuación de continuidad para flujos en tuberías circulares:

$$Q_T = VA \quad (2)$$

El resultado para este caso es de $Q_T = 0.159 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor se denomina Caudal teórico.

El caudal real (Q_R) obtenido en sitio se verificó midiendo el tiempo de recorrido del agua a través de todo el sistema hidráulico (desde su entrada al cabezal de succión hasta la salida en el punto de descarga). Conociendo el tiempo y la distancia de recorrido es posible estimar la velocidad, y

conociendo el área de la sección transversal de la tubería se pudo verificar el caudal del flujo con la misma ecuación (2). El valor real que se midió en sitio fue de $Q_R = 0.151 \text{ m}^3/\text{s}$.

La diferencia entre Q_R y Q_T es de menos del 10%.

Concentración de sedimentos:

La concentración de sedimentos es controlada por el cabezal de succión, el cual tiene un diseño patentado que permite un auto balance de la relación sólido / líquido garantizando una fuerza de succión y a la vez prevenir el bloqueo de su entrada. Adicionalmente, la concentración de sedimentos está definida por la velocidad a la que se baja el cabezal de succión al confrontar los sedimentos.

La concentración puede ser medida in situ mediante la toma de muestras de la mezcla en la salida, la cual es analizada en el cono de sedimentación Imhof, que mostró valores promedio del orden de 5%, con valores pico mucho mayores. Ver figura 9.

La capacidad de remoción de sedimentos resultante del equipo SediCon (medida in situ) es de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ (los m^3 se refieren al volumen de sólidos).

Otra particularidad de este proyecto fue la necesidad de diseñar un cabezal de succión estable para operar con una velocidad del flujo de hasta 1.5 m/s en la cámara de carga. Con este objetivo, el cabezal tiene un perfil hidrodinámico con forma de ala de avión, incluyendo una quilla estabilizadora.



Figura 9. Punto de salida y muestra de concentración con el cono Imhof

El principal problema que se presenta es que el flujo de agua en la cámara de carga Chacabuquito desarrolla una distribución asimétrica, producto de una curva hacia la derecha que existe en el canal justo antes de ingresar a la cámara. Esto hace que la velocidad sea ligeramente más alta hacia el muro de margen izquierda y por lo tanto, se genera una fuerza transversal que tiende a mover el cabezal hacia dicho lado. Este efecto se presenta principalmente al inicio de la cámara de carga, donde la profundidad es mínima y por lo tanto, la velocidad del flujo alcanza su mayor valor, del orden de 1.5 m/s. Para contrarrestar la fuerza generada sobre el cabezal, se incluyó en su diseño una quilla estabilizadora que genera una fuerza en la dirección opuesta, manteniendo el cabezal estable.

6. CONCLUSIONES

El transporte hidráulico de sólidos en tuberías es una solución práctica para solucionar el problema de sedimentación en distintas estructuras de centrales hidroeléctricas. Sus dos principales ventajas son que permite remover los sólidos sin bajar el nivel del agua en el reservorio y que no se requiere de una fuente de energía externa.

En el presente caso, la diferencia de nivel disponible es de 3.5 m y la longitud total de tubería de 40 m, con lo que se obtiene un gradiente hidráulico de 8.75%, suficiente para impulsar el flujo por gravedad de manera eficiente. La aplicación del equipo de hidrosucción instalado en la cámara de carga Chacabuquito también demostró que es posible succionar sedimentos ubicados a 8 m de profundidad, a pesar de que el nivel del punto de salida de la tubería está tan solo 3.5 m por debajo del nivel del agua.

La velocidad del flujo desarrollada dentro de la tubería es de 5 m/s, suficiente para mantener el régimen heterogéneo y por lo tanto, garantizar el transporte del material sólido hacia la salida.

La condición particular de un sistema de hidrosucción funcionando en forma de sifón hace que sea de especial interés conocer el desarrollo de la presión manométrica que se genera a lo interno de la tubería. Tal y como se presenta en la figura 8, la mayor parte de la tubería se ubica sobre la línea de energía, lo que hace que su presión interna sea negativa, es decir, presenta succión. Por este motivo, cualquier “burbuja” de aire atrapada en la tubería representa un potencial problema, ya que a diferencia del agua, el aire sí puede presentar fácilmente cambios volumétricos y por lo tanto, reducir la capacidad de succión generada a la entrada del cabezal.

Como trabajos futuros Colbún propone evaluar el efecto de la operación del equipo SediCon en la disminución de la abrasión en los componentes electro e hidromecánicos ubicados aguas debajo de la cámara de carga, y relacionado con esto, evaluar además el efecto de la disminución de las toneladas de sedimentos turbinados en la conservación de la eficiencia de las turbinas a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

Hotchkiss R., Huang X., 1995. Hydrosuction Sediment Removal Systems (HSRS): Principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering of American Society of Civil Engineers (ASCE)*.

Jacobsen T., 1997. Sediment problems in reservoirs, control of sediment deposits. Dissertation for the degree of Doctor Engineer, Norwegian University of Science and Technology, NTNU,

Morris G., Fan J., 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook*, Mc Graw Hill Book Co., New York.