Inspecciones de túneles hidroeléctricos: recomendaciones para la industria

Ing. D. Brox, Experto en Túneles Hidroeléctricos
Dean Brox Consulting, Vancouver, Canadá

RESUMEN: Numerosas centrales hidroeléctricas poseen túneles de aducción construidos hace mucho tiempo, y en algunos casos, operando más allá de su vida de diseño originalmente prevista. Un túnel hidroeléctrico representa un componente clave de una planta hidroeléctrica. Sin embargo, a diferencia de las casas de máquinas y obras de toma que son fácilmente accesibles para inspección y mantenimiento, los túneles hidroeléctricos tienen acceso limitado y requieren una interrupción casi total de las operaciones para su inspección y mantenimiento. Los túneles hidroeléctricos son estructuras lineales que generalmente están diseñadas con revestimientos de hormigón proyectado, in situ o sin revestimiento y donde cualquier inestabilidad apreciable puede afectar severamente las operaciones en curso. Los túneles hidroeléctricos, particularmente aquellos que han estado operando durante varios años o han experimentado problemas en el pasado, deben ser inspeccionados para evaluar sus condiciones de operación hidráulica segura y sin interrupción para evaluar si son necesarias reparaciones y mantenimientos a fin de limitar en el futuro problemas mayores como un colapso que provoque una interrupción prolongada debido a reparaciones importantes. También se requiere que se inspeccionen los túneles hidroeléctricos recién construidos después de un período de operación inicial para confirmar que el diseño original fue el adecuado. Los túneles hidroeléctricos están siendo inspeccionados cada vez más con interrupciones limitadas utilizando vehículos de operación remota (ROV) debido a avances significativos en la tecnología para proporcionar fotografías de alta resolución, videos e imágenes de sonar que puedan ser interpretados como parte de una evaluación de la condición estructural.

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles de aducción son componentes clave de grandes centrales hidroeléctricas y muchas de ellas están aumentando rápidamente en edad más allá de los 40 años desde que se construyeron en la década de los ‘60 y hasta de década de 1980. Si bien el mantenimiento de rutina, así como algunas mejoras o reparaciones importantes se pueden realizar fácilmente durante interrupciones breves en los componentes de la casa de máquinas y de las obras de toma hidráulica, generalmente se requiere mucho más tiempo para la planificación e interrupciones más prolongadas para realizar inspecciones y el mantenimiento de los túneles hidroeléctricos debido principalmente a restricciones de acceso.

La naturaleza lineal de los túneles hidroeléctricos, y en particular para túneles sin accesos intermedios, se asocia con riesgos elevados donde no hay redundancia en caso de un problema grave. Muchos túneles hidroeléctricos antiguos han experimentado serios problemas, incluidos algunos colapsos, simplemente debido a su antigüedad prolongada y la ausencia de mantenimiento y reparaciones durante décadas de operaciones.

Los avances en tecnologías robóticas y de adquisición de datos con vehículos de operación remota (ROV) aumentan cada año para capturar información adicional con una calidad mejorada para permitir evaluaciones más completas de la condición de los túneles hidroeléctricos en operación. La Figura 1 presenta una fotografía de alta resolución de un bloque de roca en el piso o en un antiguo túnel hidroeléctrico.

Figura 1 - Gran bloque de roca en el piso del túnel

Se puede esperar que el envejecimiento continuo de los túneles hidroeléctricos sin inspecciones y mantenimiento apropiados produzca bloqueos parciales adicionales y colapsos a gran escala.

Finalmente, los antiguos túneles hidroeléctricos también están asociados con riesgos de cumplimiento ambiental inaceptable, ya que los colapsos de túneles pueden provocar la terminación completa de los flujos de agua para el hábitat de los peces desde la casa de las máquinas o incluso requerir la liberación excesiva de flujo de agua desde la presa, lo que puede ser perjudicial y causar erosión significativa y / o inundación de áreas vulnerables.

2. CONSECUENCIAS DE LOS PROBLEMAS DE TÚNEL

La integridad estructural de los túneles hidroeléctricos es de suma importancia para salvaguardar las operaciones a largo plazo para la generación de energía. La ocurrencia de colapsos parciales o totales en túneles hidroeléctricos plantea serios riesgos para la operación y, por lo general, resulta en detenciones prolongadas para reparaciones mayores. Se han producido varios colapsos importantes de nuevos túneles hidroeléctricos desde 2009 y algunos ocurrieron durante la puesta en servicio debido a errores de diseño que resultaron en interrupciones por reparaciones de más de 24 meses y costos totales de más de $ 250 millones de dólares (Brox, 2019).

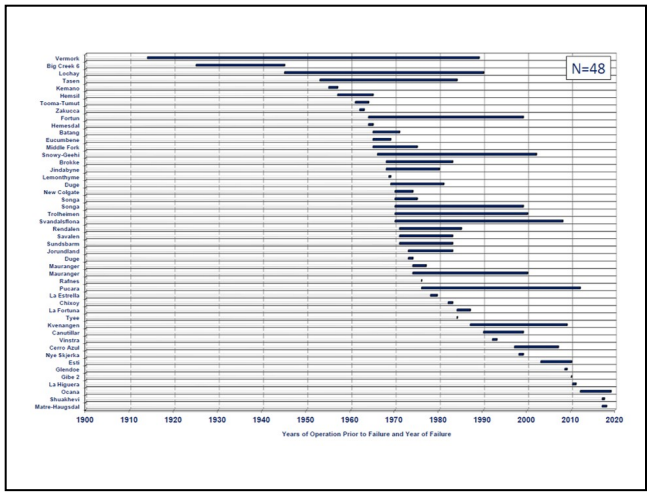

Figura 2 - Colapsos en túneles hidroeléctricos

Además, es importante reconocer que los túneles hidroeléctricos, similares a otras infraestructuras de ingeniería, tienen una vida limitada de integridad, y el mantenimiento y reparaciones deben incluirse como parte de las operaciones normales. La Figura 2 presenta un resumen de los colapsos en túneles hidroeléctricos sin revestimiento después de años de operaciones que proporciona una indicación de la vida máxima de los túneles hidroeléctricos sin revestimiento. Si bien algunos túneles hidroeléctricos tienen y continúan operando sin problemas después de varias décadas, la vida útil de la mayoría de los túneles es limitada y se pueden esperar problemas serios después de 30 a 40 años.

Si bien los costos asociados con la inspección de túneles hidroeléctricos no son pequeños, ya que los altos costos están asociados tanto con los servicios del contratista de inspección especializado como con la pérdida de generación de energía, es importante darse cuenta de que llevar a cabo inspecciones de túneles y ejecutar el mantenimientos y reparaciones en ellos pueden prevenir futuros colapsos importantes.

La importancia de la central hidroeléctrica para futuras operaciones seguras para la generación de energía doméstica o de exportación también debe reconocerse en términos de mantener su operación, particularmente si existen contratos de exportación o entrega de energía con sanciones.

Finalmente, las consecuencias de problemas serios con túneles hidroeléctricos pueden aumentar rápidamente en términos de costos y pueden asociarse con riesgos de cumplimiento ambiental, reputación corporativa y seguridad pública.

3. CRITERIOS TÉCNICOS PARA LAS INSPECCIONES

3.1 Consideraciones importantes

Uno de los principales desafíos para la mayoría de los operadores hidroeléctricos es decidir cuándo es apropiado o necesario realizar una inspección de túnel. El requisito de una primera o posterior inspección y la frecuencia de las inspecciones de seguimiento deben basarse en la consideración de todos los criterios técnicos relevantes, incluidos los siguientes:

- Diseño original del revestimiento del túnel;
- Calidad de construcción original;
- Edad actual del túnel;
- Operaciones hidráulicas (presión / velocidad);
- Operaciones hidráulicas (peaking / non-peaking);
- Problemas históricos de construcción;
- Problemas operativos históricos;
- Reparaciones históricas y desempeño;

• Capacidad y estado de las trampas de rocas;
• Hallazgos / defectos en inspecciones previas, y;
• Rendimiento e integridad prevista del túnel

La mayoría de los túneles de aducción operan bajo presiones relativamente bajas de menos de 50 m de presión máxima y su sección transversal ha sido diseñada para que la velocidad máxima de flujo sea inferior a 3.0 m/s y, por lo tanto, la erosión y la acumulación de escombros son generalmente aspectos de bajo riesgo con respecto de la operaciones futuras. Sin embargo, algunas centrales operan para condiciones de peaking y, por lo tanto, el túnel está sujeto a presiones internas muy variables que causan la carga cíclica del soporte del túnel y los sistemas de revestimiento que pueden resultar en deterioro con erosión concentrada y acumulación de escombros.

El mayor riesgo para las operaciones futuras de los túneles hidroeléctricos es la estabilidad en las ubicaciones de fallas geológicas y / u otras condiciones geológicas débiles, como condiciones de roca no duraderas, que se encontraron durante la construcción. La mayoría de los colapsos recientes de túneles hidroeléctricos que ocurrieron durante el comisionamiento fue debido a la instalación de un soporte inadecuado del túnel en fallas geológicas y Noel no reconocimiento de condiciones de roca no duraderas o susceptibles a la erosión. La Figura 3 presenta las condiciones expuestas de fracturas de roca débiles y no duraderas que incluyen rellenos de mylonita blandas que fueron responsables de un colapso histórico importante en un túnel paralelo como parte de la misma planta hidroeléctrica.

El número total, la ubicación y el diseño final del soporte del túnel en fallas geológicas es, por lo tanto, importante de reconocer a partir de la información histórica de construcción y registros al realizar una inspección. Muchas zonas de fallas geológicas han sido soportadas solamente con hormigón proyectado para operaciones de largo plazo y que pueden sufrir desgaste y deterioro.

El estado de la capacidad de las trampas de roca también es de suma importancia para confirmar durante una inspección, ya que las trampas de roca que están llenas de escombros causarán que otros desechos pasen sobre ella e ingresen en las tuberías de acero y la casa de máquinas y posiblemente causen daños graves.

Figura 3 - Condiciones geológicas débiles para el colapso

3.2 Inspecciones para túneles hidroeléctricos nuevos

La construcción de túneles hidroeléctricos nuevos debe incluir un requisito de garantía para la inspección del túnel dentro de un período de tiempo limitado después de las operaciones iniciales. Las operaciones iniciales corresponden a la primera vez cuando la roca circundante se satura con el restablecimiento del régimen de aguas subterráneas alrededor del túnel. Durante este período, el revestimiento del túnel, o secciones no revestidas, reacciona a las presiones hidráulicas internas, por lo que puede producirse un comportamiento inusual, como el aflojamiento del soporte instalado y / o la erosión de rocas o revestimientos que se suponía que eran competentes, con posibles impactos a la integridad del túnel

Si no se identifican condiciones hidráulicas inusuales en las operaciones iniciales del túnel, se recomienda no vaciar el túnel para una inspección tradicional, sino realizar una inspección utilizando un ROV como parte de los requisitos de la garantía de construcción.

3.3 Inspecciones en túneles hidroeléctricos antiguos

La primera inspección de muchos túneles hidroeléctricos antiguos generalmente se realiza como resultado de un problema detectado o inferido después de muchos años de operación, y una reducción en la presión de operación. El requisito para una primera inspección de un túnel antiguo que no

haya sido inspeccionado previamente, o la frecuencia de las inspecciones posteriores para los túneles hidroeléctricos antiguos son subjetivos sobre las consideraciones importantes esbozadas anteriormente y debe completarse una evaluación técnica exhaustiva de todos los aspectos relevantes como parte de el programa de gestión de activos de la planta. Los aspectos más importantes a considerar son las operaciones hidráulicas y la aparición de problemas históricos.

La Figura 4 presenta recomendaciones para considerar la frecuencia de las inspecciones de túneles hidroeléctricos antiguos

		Frecuencia de inspección, años		
Condiciones de operaciónes	Operaciones	Inicial	Secondaria	Adicional
sin problemas históricos	Non-Peaking	15	8	5
	Peaking	10	5	3
con problemas históricos	Non-Peaking	5	3	2
	Peaking	3	2	1

Nota:

Las frecuencias de inspección secundaria y adicional se refieren al tiempo adicional después de la inspección inicial.

Figura 4 - Frecuencia recomendada para inspecciones

Los túneles hidroeléctricos que operan en condiciones de peaking (períodos de alta demanda de energía) están sujetos a presiones operativas internas muy variables con una carga cíclica asociada del soporte del túnel y los revestimientos. Las operaciones de peaking generalmente incluyen la finalización y el reinicio de las operaciones cada día, que son más susceptibles a daños durante las operaciones a largo plazo y garantizan una mayor frecuencia de las inspecciones de túneles.

3.4 Requisitos de inspección por parte de terceros

La inspección de los túneles hidroeléctricos también puede ser requerida por inversores nuevos o en curso en centrales hidroeléctricas como parte de las tareas de Diligencia Debida. Además, las aseguradoras pueden requerir inspecciones de túneles para proporcionar confianza de un buen desempeño continuo para que las pólizas de seguro continúen siendo válidas, particularmente para túneles que han experimentado problemas históricos o un colapso. Por último, las autoridades locales o nacionales, como los ministerios del gobierno, pueden exigir inspecciones de túneles para confirmar su integridad, particularmente los túneles antiguos, para continuar las operaciones seguras con el fin de limitar los riesgos para el público y el medio ambiente.

3.5 Inspecciones en cortes regulares o planificados

Las interrupciones regulares y / o planificadas proporcionan una buena oportunidad para considerar una inspección de túnel. Sin embargo, los operadores hidroeléctricos no deberían verse obligados a realizar inspecciones en túneles a menos que existan posibles inquietudes, según lo indicado por operaciones hidráulicas inusuales o si no se ha realizado una inspección desde una duración significativa de las operaciones, como un mínimo de 10 años.

4. REQUISITOS DE PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

4.1. Revisión de diseño histórico y construcción

No se debe realizar una inspección de un túnel hidroeléctrico a menos que se complete una revisión exhaustiva de toda la información relevante de diseño y construcción original (as-built). Se debe revisar la siguiente información:

- Alineación, longitud, pendiente y tamaño del túnel;
- Condiciones geológicas (fallas, tipos de rocas);
- Condiciones y niveles del agua subterránea;
- Esfuerzos in situ mínimos;
- Método de excavación;
- Tipos de soporte inicial y final;
- Distribución de los tipos de soporte inicial y final;
- Tipos de revestimiento (shotcrete, concreto, acero);
- Distribución de los tipos de revestimiento
- Distribución de secciones sin revestimiento;
- Calidad del revestimiento (shotcrete y concreto), y;
- Ubicación y capacidades de las trampas de rocas.

4.2 Revisión de operaciones hidráulicas

No se debe realizar una inspección de un túnel hidroeléctrico a menos que se complete una revisión exhaustiva de todos los datos e información relevantes de las operaciones hidráulicas históricas. La siguiente información debe ser revisada:

- Máxima presión interna de operaciones;
- Variación de las presiones de operaciones;
- Capacidad de flujo (m3/s);

• Tamaños y distribución de túneles;
• Velocidades de flujo del túnel (m/s);
• Niveles o datos de la chimenea de equilibrio;
• Frecuencia de datos de operaciones;
• Datos e información de infiltración o exfiltración;
• Generación / limpieza de escombros desde el túnel;
• Ocurrencia / frecuencia de eventos de alta o reducción de presión (water hammer etc.), e;
• Interrupciones planificadas y no planificadas.

La información hidráulica debe estar disponible en los registros de operaciones de la planta hidroeléctrica.

4.3 Revisión de los datos históricos de inspección

Todos los informes de inspección previos de inspecciones con y sin vaciar deben revisarse para identificar posibles problemas históricos y operaciones inusuales.

La capacidad original y remanente de las trampas de roca debe ser revisada para compararla con las condiciones de la próxima inspección para comprender y estimar la tasa general de acumulación de escombros debido a la limpieza de las secciones con y sin revestimiento para la planificación de la limpieza de las trampas de roca.

4.4 Revisión de reparaciones históricas y desempeño

Todas las reparaciones durante inspecciones previas a partir de planos y/o informes deben revisarse para confirmar la ubicación de las reparaciones y cuantificar todo el trabajo realizado para evaluar el desempeño continuo de estos trabajos pasados como parte de la próxima inspección. El desempeño de las reparaciones pasadas debe evaluarse en términos de las operaciones hidráulicas en curso y cualquier cambio relacionado.

4.5 Acceso y consideraciones de seguridad

Las ubicaciones de acceso, las dimensiones de espacio libre y los requisitos generales para realizar una inspección de túnel deben revisarse cuidadosamente para confirmar los requisitos de espacio aceptables y espacio libre para movilizar y desmovilizar todo el equipo de inspección necesario del túnel. Los ventanas de acceso que se usaron como parte de la construcción del túnel original suelen estar equipados con puertas de presión hidráulica y se utilizan comúnmente para acceder a inspecciones vacías. Los requisitos de seguridad para las inspecciones vacías deben incluir permisos de espacios reducidos, pruebas de ventilación y mejora mecánica si es necesario, comunicación por radio efectiva, equipos de rescate y procedimientos de salida de emergencia. Se utilizan generalmente plataformas especiales para la inspección de piques inclinados y verticales con especialistas en acceso por cable.

El acceso para las inspecciones de ROV generalmente utiliza chimeneas de equilibrio y compuertas de acceso en las obras de toma. El protocolo de bloqueo de operaciones y los procedimientos deben ejecutarse para todas las inspecciones.

4.6 Confirmar referencias de túnel

La información histórica de diseño y construcción no siempre está disponible, especialmente para túneles hidroeléctricos antiguos. Por lo tanto, puede ser necesario confirmar las referencias geográficas de coordenadas a lo largo del túnel para una inspección con puntos de conexión importantes en cada extremo o para ubicaciones específicas, como en las ventanas de acceso o la ubicación de la chimenea de equilibrio. Todas las observaciones deben documentarse utilizando el balizado de referencia confirmados y ubicados a lo largo del túnel. También es muy útil y práctico preparar nuevos planos si los históricos no están disponibles para su uso durante una inspección. Todos los lugares de interés previamente identificados a partir de una revisión de la información histórica pueden incluirse en los nuevos planos para referencia durante la inspección.

4.7 Equipo, procedimientos y responsabilidades

La ingeniería de túneles hidroeléctricos involucra múltiples disciplinas de geología, geotecnia, hidráulica, mecánica y estructuras. Es importante que cualquier equipo que participe en una inspección de túneles tenga vasta experiencia en la mayoría de los aspectos hidrotécnicos y, por lo tanto, justifique la participación de múltiples profesionales. Si bien es común que los ingenieros geotécnicos o de túneles participen en las inspecciones, es típico que tales profesionales tengan una comprensión limitada de la hidráulica del túnel, y por lo tanto, se debe incluir un especialista hidráulico al menos para confirmar las presiones internas de

operación, las velocidades de flujo y las reducciones en las presiones operativas.

Los procedimientos que se utilizarán para las inspecciones deben prepararse y revisarse por adelantado y deben ser claramente comprendidos y aceptados por todos los participantes involucrados. Se debe preparar un documento detallado del plan de trabajo como procedimiento formal.

Las responsabilidades de todos los participantes involucrados en una inspección también deben estar claramente establecidas y documentadas de antemano. Es importante que los profesionales técnicos que realizan la inspección no sean molestados o interrumpidos durante la inspección por otros para que la inspección pueda completarse eficientemente con la documentación de datos de buena calidad.

Finalmente, se debe permitir una duración de tiempo adecuada para la ejecución de la inspección y no limitar el tiempo para comprometer la calidad de la información capturada.

4.8 Expertos en túneles hidroeléctricos

Si bien los operadores hidroeléctricos solo pueden confiar en el contratista especializado en servicios de ROV para la ejecución de una inspección de ROV, muchos operadores también se han beneficiado de contratar a un experto en túneles hidroeléctricos para que respalde la inspección. Los expertos en túneles hidroeléctricos con amplia experiencia en inspecciones de túneles, especialmente para inspecciones de ROV, deben participar para revisar toda la información histórica y operativa relevante del proyecto y preparar una lista de ubicaciones objetivo identificadas de particular interés para la inspección, y estar presentes en el sitio para asistir la inspección real del ROV y el trabajo junto con el contratista del ROV durante la inspección para documentar todas las observaciones relevantes del ROV.

Es importante que los operadores hidroeléctricos se den cuenta de que la mayoría de los contratistas especializados en ROV sólo proporcionarán información objetiva de una inspección y, por lo general, no brindan una evaluación de ingeniería integral de la información de inspección y la evaluación del estado de un túnel.

También se alienta a los operadores hidroeléctricos a contratar expertos en túneles hidroeléctricos para realizar inspecciones manuales con experiencia en el diseño, construcción y operación de centrales hidroeléctricas para la identificación de defectos y riesgos asociados a las operaciones del túnel.

5. TIPOS DE INSPECCIONES Y TECNOLOGÍAS

5.1 Inspección con vehículos a control remoto (ROV)

Las inspecciones de túneles hidroeléctricos sin vaciar el túnel son el tipo preferido de inspección siempre que sea posible para evitar cualquier riesgo de causar posibles daños a un túnel existente. Las inspecciones que utilizan vehículos operados por control remoto (ROV) se realizan generalmente durante una interrupción total de la planta hidroeléctrica con condiciones de flujo cero (no flujo) para obtener la mejor calidad de datos al operar el ROV con buen control y estabilidad. Sin embargo, las inspecciones del túnel ROV también se pueden realizar durante el flujo, pero sólo en condiciones de muy baja velocidad, si es absolutamente necesario para mantener una generación de energía limitada.

Los vehículos operados por control remoto (ROV) existentes en la industria, así como los avances tecnológicos, ahora permiten que las inspecciones no controladas se realicen generalmente en 48 horas y, en muchos casos, en 12 horas con una buena planificación y preparación para limitar la interrupción total de la generación de energía.

Se necesita una planificación y preparación exhaustivas para una inspección con ROV que incluye lo siguiente:

- Planificación de la interrupción de la planta;
- Contratación de un contratista en ROV;
- Confirmación de ubicaciones de acceso para ROV;
- Confirmación del tiempo de interrupción;
- Confirmación del ubicaciones de la inspección;
- Requisitos técnicos de inspección, y;
- Entrega de informes del contratista de ROV.

La información a observar durante una inspección de ROV incluye:

- Defectos - grietas en revestimientos con posición y geometría en el perfil del túnel;
- Escombros a lo largo del piso del túnel;
- Ubicaciones y geometría de bloques el túnel;
- Ubicaciones de sobre-excavación;
- Ubicaciones de soporte de túnel instalado;

- Distribución de tipos de revestimiento de túneles, y;
- Ubicaciones y geometría de excavaciones adicionales (ventanas).

En algunos casos donde los planos (as-builts) originales no están disponibles, la primera inspección del ROV también servirá para preparar una versión actualizada de la geometría completa del túnel y/o posiblemente confirme errores en las construcciones originales con ubicaciones de referencias clave y/o geometrías de túneles, lo cual es importante para comprender la hidráulica de túneles.

5.2 Inspección manual (túnel vacío)

La ejecución de una inspección con vaciado del túnel solo debe considerarse en el caso de que los resultados de una inspección sin vaciar (ROV) indiquen preocupaciones claras y graves, como grandes volúmenes de escombros a lo largo del túnel, o con grandes bloques, mucho exfiltraciones y / o reducciones en la presión de operación. Es importante reconocer que se puede esperar el vaciado de los túneles hidroeléctricos, ya que se puede esperar que las inspecciones manuales incluyan riesgos para el túnel al causar inestabilidades adicionales posibles colapsos.

El vaciado de los túneles hidroeléctricos debe planificarse cuidadosamente y realizarse de manera muy controlada y lenta para despresurizar las presiones del agua subterránea dentro de la roca circundante para limitar la inestabilidad. Benson (1989) proporciona pautas para las tasas de vaciado en función de la calidad de la roca. Rothfuss et al. (2011) presenta los principales requisitos, así como los objetivos de una inspección manual del túnel de la siguiente manera:

- Trabajar de forma segura;
- Documentar la condición del túnel;
- Priorizar cualquier deficiencia en relación con los posibles impactos en la confiabilidad y la eficiencia;
- Desarrollar un plan para acceder y reparar las deficiencias;
- Estimar la vida de servicio confiable restante con y sin reparaciones, e;
- Integrar la información de planificación en el plan de gestión de activos.

Fippen et al. (2018) presentan la planificación y ejecución de un túnel hidroeléctrico de 30 km que involucra múltiples disciplinas de un equipo para evaluar la integridad del túnel y la viabilidad de su rehabilitación. Gerstner et al. (2013) presentan una lista completa de defectos de revestimientos de concreto para túneles hidroeléctricos.

Las inspecciones manuales generalmente requieren una planificación extensiva, a veces con años de planificación debido al mayor tiempo requerido con el vaciado de un túnel y toda la planificación asociada para una interrupción prolongada. Por lo tanto, se recomienda que las inspecciones de ROV se consideren realizadas antes de una inspección manual para proporcionar información preliminar útil.

5.3 Tecnología de ROV y avances

Los vehículos operados a remoto (ROV) se han utilizado para inspecciones subacuáticas de presas y otras estructuras hidráulicas durante décadas y, más recientemente, se han utilizado cada vez más, especialmente para la inspección de túneles hidroeléctricos largos. Los ROV generalmente están atados con cables para la inspección de túneles hidroeléctricos de gran longitud para proporcionar energía y para la transferencia de los datos recopilados durante el levantamiento. La maniobrabilidad de los ROV les permite acceder a través de geometrías complejas de chimeneas de equilibrios y puertas de acceso de obras de toma para ingresar a túneles hidroeléctricos largos.

Las Figuras 5 y 6 ilustran dos de los ROV más versátiles y ampliamente utilizados en la industria para la inspección de largos túneles hidroeléctricos, incluidos el Saab Seaeye Sabertooth y el Sub-Atlantic Mohican. El Sabertooth tiene una maniobrabilidad de 360 ° para accesos restringidos, mientras que el Mohican fue diseñado para operar en condiciones de flujo.

La inspección más larga en un sólo paso en un túnel hidroeléctrico fue de 12 km en el Proyecto Snowy Mountain en Australia y la inspección total más larga realizada fue para el túnel de suministro de agua potable Paijanne de 120 km para Helsinki, Finlandia. Los ROV han operado a profundidades de más de 600 m y algunos son capaces de operar hasta 2000 m.

En turbidez baja y agua clara, los ROV pueden proporcionar fotografías de alta resolución e imágenes de video de observaciones de interés. En condiciones de alta turbidez, los sonares de perfiles se utilizan para proporcionar datos continuos de 360 grados para un modelo de nube de puntos 3D de alta resolución y visualizaciones asociadas. Si bien los ROV pueden viajar rápidamente en condiciones de flujo cero, es importante reconocer que se debe planificar una cantidad de tiempo adecuada para realizar una inspección a fin de que se obtengan datos de alta calidad, y los datos no se vean comprometidos debido a restricciones de tiempo. Según las inspecciones completadas hasta la fecha, no es posible confirmar la diferencia entre la roca sin revestimiento y las secciones revestidas de hormigón proyectado a lo largo de un túnel, por lo que las conclusiones sobre el estado de erosión o las condiciones del hormigón proyectado son difíciles además de la posible identificación de grietas y bloques de rocas.

Figura 5 - Saab Seaeye Sabertooth ROV

Figura 6 – Sub-Atlantic Mohican ROV

Por último, los contratistas de ROV han desarrollado y utilizado un software de visualización para ayudar en las observaciones durante una inspección como se muestra en la Figura 7 y esto debería ser un requisito fundamental como parte de los servicios de una inspección de ROV, ya que permite la identificación inmediata de ubicaciones de interés donde los escombres pueden estar presentes a lo largo de un túnel.

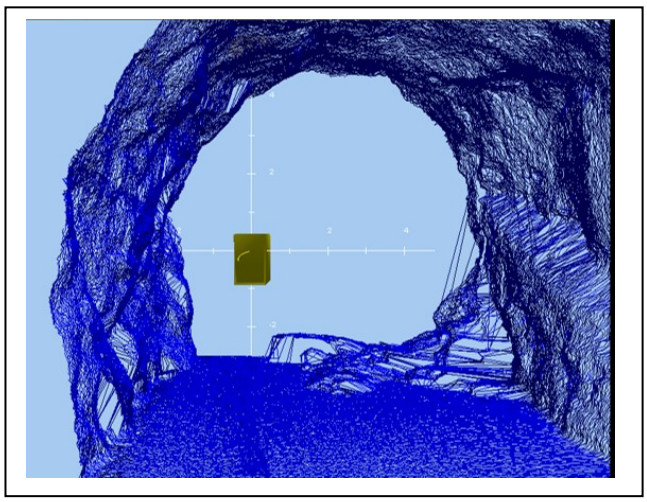

Figura 7 - Visualización durante la inspección

Los operadores hidroeléctricos continuarán beneficiándose de nuevos avances en tecnología para ROV, que incluyen alta propulsión, maniobrabilidad y control mejorados, resolución mejorada de imágenes y datos de sonda para futuras inspecciones de ROV.

5.4 Tecnología para inspecciones manuales

Las inspecciones manuales del túnel se benefician de tener acceso directo a lo largo del túnel para observaciones detalladas e identificación de posibles defectos, erosión y escombros. Otro beneficio importante es que se pueden obtener muestras de secciones de revestimiento de hormigón proyectado y concreto y analizar su durabilidad y resistencia.

Una de las mayores incertidumbres con los revestimientos de concreto dentro de los antiguos túneles hidroeléctricos es la integridad detrás del revestimiento de concreto, ya que muchos túneles fueron soportados históricamente con vigas de madera que comúnmente se pudren con el tiempo y dan como resultado la formación de vacíos detrás del revestimiento. Varios métodos de investigación están disponibles en la industria para las inspecciones

manuales de la siguiente manera (Montero et al, 2015):

- Observaciones visuales;
- Prueba de resistencia;
- Métodos sónicos y ultrasónicos;
- Métodos magnéticos;
- Métodos eléctricos;
- Métodos de termografía;
- Métodos de radar;
- Métodos de radiografía, y;
- Métodos de endoscopia.

Montero y col. (2015) también presentan una lista completa de tecnologías robóticas para su uso en inspecciones manuales junto con sus ventajas y limitaciones, que incluyen:

- Métodos de fotogrametría;
- Métodos de impacto;
- Métodos láser, y;
- Métodos de perforación.

También se están desarrollando avances tecnológicos para métodos nuevos e híbridos para proporcionar información adicional durante las inspecciones manuales.

6. INFORMACIÓN DE INSPECCIÓN SUPLEMENTARIA

6.1 Evaluación de detección de exfiltración

Un problema típico y económico con túneles hidroeléctricos nuevos y antiguos es la exfiltración y/o pérdida de agua del túnel durante las operaciones normales. Las rutas de exfiltración típicas para los nuevos túneles son a través de fracturas geológicas y zonas de fallas y para los túneles antiguos a través de grietas que se han formado en revestimientos de concreto.

Las inspecciones de los túneles hidroeléctricos se realizan específicamente para identificar las ubicaciones de la posible exfiltración, y tanto el ROV como las inspecciones manuales son aplicables para este propósito.

Los métodos de resistividad magnetométrica son capaces de identificar rutas de flujo preferenciales a través del suelo (Jessop et al., 2018) y el uso especializado de este método se ha implementado para detectar con éxito ubicaciones de exfiltración a lo largo de un túnel hidroeléctrico durante una inspección de ROV. Estas inspecciones adicionales que se pueden realizar simultáneamente con una inspección de ROV y brindan información valiosa para la planificación y estimación de trabajos de mitigación, como la inyección posterior o la instalación de revestimientos de concreto para evitar o limitar la exfiltración de los túneles hidroeléctricos.

La confirmación de la ubicación de la exfiltración de las secciones sin revestimiento de un túnel hidroeléctrico es extremadamente difícil durante una inspección manual ya que las fracturas se cierran bajo la despresurización del túnel y, por lo tanto, se recomienda realizar una inspección del ROV antes de una inspección manual.

6.2 Inyección de tinte y Tell-Tails

La ubicación de la exfiltración de los túneles hidroeléctricos durante las operaciones se puede evaluar con la inyección de tinte durante una inspección de ROV. Bajo condiciones de flujo cero, es posible visualizar la pérdida de tinte liberado de un ROV a medida que fluye hacia una grieta abierta dentro de un revestimiento de hormigón o hormigón proyectado o hacia una fractura de roca abierta a lo largo de una sección sin revestimiento del túnel.

Además, las colas compuestas (Tell-Tails) de cordones de nylon brillante se pueden unir a un ROV y, en presencia de exfiltración desde un túnel, los cordones se dirigen a la ubicación de la exfiltración para proporcionar una indicación visual de la ubicación real.

Los métodos acústicos de detección de exfiltración se han utilizado con éxito en la industria de tuberías y también pueden ser aplicables para su uso efectivo en túneles hidroeléctricos mediante la implementación de un micrófono subacuático para detectar sonidos estáticos inusuales asociados con exfiltración.

Se requieren condiciones de no turbidez tanto para la inyección de tinte como para los métodos de detección de exfiltración para confirmar por cámara de video. Las ubicaciones indicadas por estos métodos indirectos de detección de exfiltración a partir de una inspección de ROV pueden confirmarse luego durante una inspección manual.

7. SERVICIOS ESPECIALES O ADICIONALES

Se ha avanzado en los ROV para realizar funciones o servicios adicionales además de las inspecciones no controladas, que incluyen lo siguiente:

• Limpieza de trampas de rocas;
• Limpieza de escombros / dragado, e;
• Instalación de mamparos de presión.

Por lo general, se comprueba que las trampas de roca están llenas de escombros de rocas durante las inspecciones de ROV y, por lo tanto, existe un fuerte deseo de limpiarlas y eliminar todos los escombros de roca para que puedan continuar funcionando para futuras operaciones y no permitir el paso de escombros de roca sobre ellas y en las de tuberías de presión y en la casa de maquinas.

De manera similar, los escombros a lo largo del piso de un túnel pueden limpiarse y eliminarse utilizando un ROV para evitar la necesidad de desaguar un túnel y el riesgo de introducir daños potenciales. Finalmente, las aplicaciones especiales bajo el agua dentro de túneles y piques hidroeléctricos incluyen el requisito de instalar un tapón de presión para permitir que los trabajos de reparación se realicen de manera segura.

8. EVALUACIÓN DE DATOS OBSERVACIONALES

8.1 General

Los datos de observación obtenidos de una inspección de túnel deben evaluarse a fondo en relación con toda la información relevante del proyecto para identificar posibles correlaciones con el fin de comprender y apreciar las condiciones existentes de un túnel y sus riesgos asociados para futuras operaciones.

Se debe asignar una cantidad apreciable de tiempo para la evaluación de los datos de observación de una inspección de túnel y no limitarse, a fin de que no se identifican riesgos importantes para futuras operaciones.

8.2. Presentación de datos fácticos

La siguiente información fáctica debe presentarse a partir de las observaciones de la inspección del túnel:

• Perfil geométrico del túnel;
• Volumen de escombros a lo largo del piso del túnel;
• Número, tamaño y ubicación de las bloques de rocas o revestimiento (shotcrete o hormigón);
• Número, tamaño, profundidad y ubicación de la erosión;
• Número, tamaño y ubicación de defectos o grietas asociadas con el revestimiento del túnel (shotcrete o hormigón), y;
• Cualquier otro daño o defecto inusual o imprevisto.

El perfil geométrico del túnel debe compararse con la información original de construcción, si está disponible, para identificar posibles cambios no anticipados. La sección transversal actualizada del túnel se puede considerar para actualizar los parámetros hidráulicos de distribución de velocidad de flujo para todo el túnel. Es más útil desarrollar un modelo tridimensional (3D) de todo el perfil del túnel para la visualización de áreas de sobre-excavación o secciones transversales reducidas.

La Figura 8 presenta un ejemplo de una vista en 3D del perfil interno de un túnel que resalta la presencia de erosión y escombros a lo largo del piso del túnel que se puede comparar con las observaciones de inspecciones anteriores o posteriores.

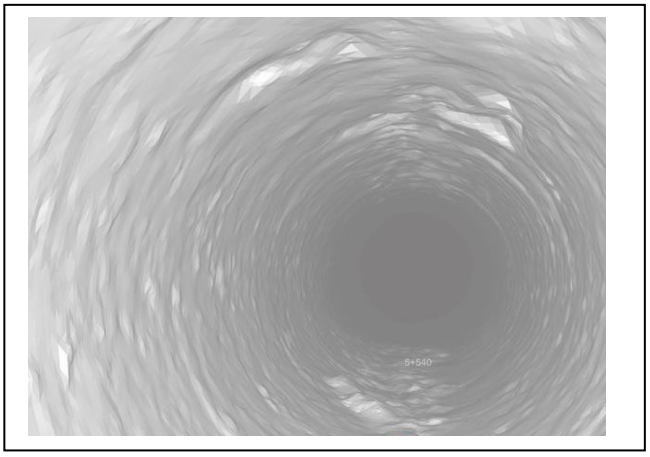

Figura 8 – Vista Interno de Modelo 3D de datos de Point Cloud

La presencia de erosión y escombros a lo largo de un túnel es de importancia crítica, ya que representa parte de la información más importante sobre el estado del túnel. Los volúmenes o vacíos formados debido a la erosión de las zonas de rocas débiles generalmente se concentran y agrandan durante las operaciones en curso. Si están presentes a lo largo de

la corona del túnel, pueden manifestarse en una inestabilidad o con la caída de bloques de roca o incluso un colapso a gran escala con bloqueo parcial o total del túnel. Los aumentos en los volúmenes de erosión y escombros después de las operaciones en curso son de importancia crítica para identificar y comparar las inspecciones previas como parte de una evaluación del estado de un túnel. Toda la información debe desarrollarse en cuadros apropiados para permitir comparaciones y evaluaciones fáciles.

La Figura 9 ilustra un ejemplo de una vista externa de un túnel hidroeléctrico de gran longitud excavado con perforación y tronadura que muestra secciones adyacentes sin revestimiento y revestidas de concreto que se creó utilizando un software especializado. Estos ejemplos de visualizaciones no suelen prepararse como parte de los servicios de un contratista de ROV y, por lo tanto, requieren servicios adicionales como parte del procesamiento posterior de los datos de point cloud de una inspección de ROV.

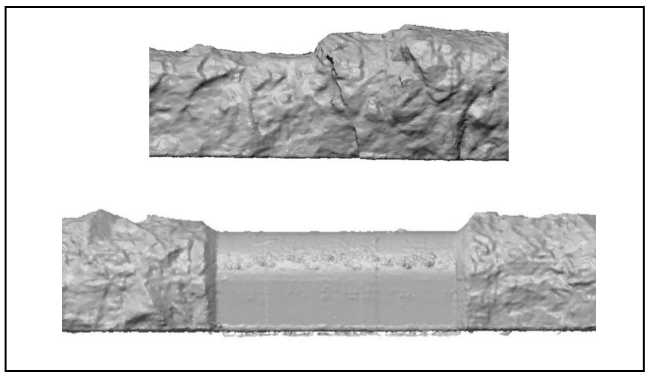

Figura 9 - Vista 3D del perfil del túnel externo

Las condiciones de los revestimientos de túneles de hormigón y shotcrete suelen ser de gran interés y, por lo tanto, también es necesario que se preparen numerosas visualizaciones en 3D a partir de los datos de inspección para presentar observaciones relevantes, como la geometría de las transiciones de revestimientos donde generalmente se produce la erosión y cualquier cambio significativo en la geometría del perfil del túnel.

La Figura 10 presenta un ejemplo de datos de alta resolución de una transición de una sección de revestimiento de hormigón.

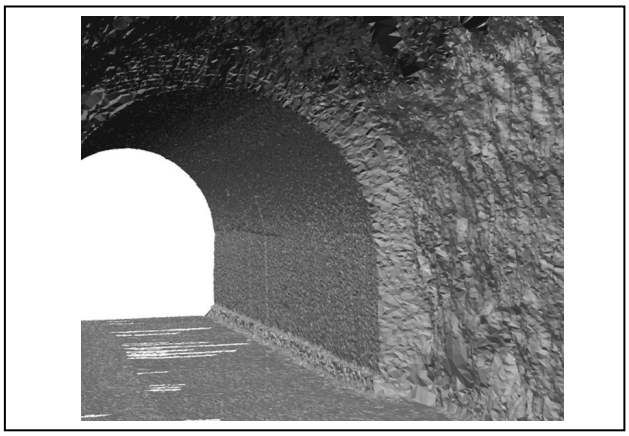

Figura 10 - Transición de revestimiento de concreto

Los datos de observación restantes deben presentarse en un perfil longitudinal del túnel en relación con las condiciones geotécnicas construidas o encontradas para permitir la posible identificación de correlaciones tales como volúmenes de escombros ubicados cerca de fallas geológicas, o enjambres de grietas ubicado a lo largo de formaciones geológicas débiles por las cuales el revestimiento de hormigón ha sido sometido a cargas cíclicas y deterioro contra el sustrato débil detrás del revestimiento. Los datos de observación deben cuantificarse en un formato útil y práctico para la presentación y visualización de los resultados totales.

Un aspecto importante que comúnmente se pasa por alto es la capacidad de cualquier trampa de roca y, por lo tanto, el volumen existente de desechos de roca dentro de la trampa de roca debe estimarse durante la inspección y compararse con la información previa, si está disponible.

8.3 Correlación con operaciones hidráulicas

Los resultados de la inspección de un túnel deben evaluarse en relación con las operaciones hidráulicas existentes e históricas para identificar posibles correlaciones entre la información. Como ejemplo, las áreas de baja velocidad de flujo confirmadas por secciones transversales ampliadas a lo largo del túnel pueden estar asociadas con la acumulación de escombros de roca a lo largo del piso del túnel. De manera similar, las áreas de alta velocidad confirmadas por la sección transversal reducida del túnel pueden estar asociadas con ubicaciones de erosión concentrada. Además, las ubicaciones de los escombros de roca grandes a lo largo del piso del túnel

se pueden comparar con las ubicaciones observadas de bloques desde el techo del túnel.

8.4 Correlación con la información histórica

Los datos que se obtienen de una inspección de túnel pueden incluir observaciones de defectos (grietas) en revestimientos de hormigón o hormigón proyectado, ubicaciones de erosión y otra información relevante. Se debe realizar una evaluación exhaustiva de todos los datos obtenidos de la inspección e intentar correlacionarla con la información histórica de la construcción.

Por ejemplo, las ubicaciones de las infiltraciones durante la construcción del túnel original se pueden asociar con posibles ubicaciones de las exfiltraciones durante las operaciones, particularmente para secciones del túnel sin revestimientos. Además, las ubicaciones de inestabilidad en las fallas geológicas experimentadas durante la construcción del túnel original pueden estar asociadas con ubicaciones de grietas dentro de secciones de hormigón proyectado o revestimiento de hormigón.

9. EVALUACIÓN DE RIESGO DE TÚNEL

Se debe realizar una evaluación del riesgo de túnel después de una inspección de un túnel. La evaluación de riesgos para un túnel hidroeléctrico representa un complejo desafío de ingeniería que debe considerar los criterios presentados en la Sección 3.1. Los aspectos más importantes a considerar son la edad, las operaciones hidráulicas y el revestimiento del túnel. La Figura 11 presenta una matriz de riesgo cualitativa general basada en estos aspectos clave que deben considerarse para una evaluación preliminar de un perfil de riesgo probable para un túnel hidroeléctrico.

Revestimiento	Hidráulica	< 15 años	10 - 30 años	> 30 años
Sin/Roca	Peaking			
	Non-Peaking			
Shotcrete	Peaking			
	Non-Peaking			
Hormigón	Peaking			
	Non-Peaking			

Nota: sin revestimiento se refiere a condiciones de rocas justas y de baja calidad.

CALIFICACIÓN DE RIESGO	
Extrema	
Muy Alto	
Alto	
Medio	
Bajo	
Muy Bajo	

Figura 11 - Matriz de riesgo cualitativa

Las evaluaciones de riesgos cualitativas y cuantitativas deben completarse con base en la información obtenida de la inspección. Una evaluación de riesgos cualitativa debe basarse en todas las observaciones históricas y recientes realizadas durante la inspección, problemas históricos, incluyendo fallas o inestabilidades de fugas, y operaciones hidráulicas históricas y normales. Rothfuss et al. (2011) presenta descripciones cualitativas de las clasificaciones de evaluación de la condición del túnel (excelente, buena, justa y mala) para la confiabilidad para futuras operaciones que sirve para una útil evaluación preliminar de riesgos.

Una evaluación cuantitativa del riesgo debe basarse en supuestos optimistas y pesimistas para proporcionar una indicación de la vida remanente del túnel hidroeléctrico antes de un colapso importante. Se recomienda el uso del método presentado por Rosin (2005). Esta evaluación se basa en acumular las probabilidades de fallas debido a la inestabilidad identificada o mecanismos de falla que se consideran plausibles en base a la consideración de la siguiente información clave:

- Historia del túnel/pique, geología y soporte / revestimiento instalados durante la construcción original;
- Información de informes de inspección históricos y reparaciones;
- Identificación de áreas de problemas/riesgos con base en la información de inspección del túnel, y;
- Revisión histórica de casos de otras fallas del túnel hidroeléctrico en geología similar.

La probabilidad anualizada de un colapso del túnel, P_A se define de la siguiente manera:

$$P_A = P_e \times NRS \times P_C$$

donde P_e es la probabilidad anual de un evento de inicio, NRS es el número de sitios o ubicaciones de riesgo donde se considera posible la falla, y P_C es la probabilidad condicional de falla en cada uno de los sitios de riesgo. Los valores NRS seleccionados para la evaluación de riesgos deben basarse en la consideración del número de secciones sin revestimiento y revestidas de hormigón a lo largo del túnel, el número de ocurrencias históricas de inestabilidades y el número de trampas de roca disponibles. Los resultados de una evaluación cuantitativa del riesgo pueden proporcionar

estimaciones de la vida restante de un túnel hidroeléctrico antes de que pueda esperarse un colapso importante, lo que representa información muy importante para la planificación, el mantenimiento y las reparaciones futuras.

Se recomienda a los operadores hidroeléctricos que realicen una evaluación integral del riesgo a través de un taller formal de riesgos con expertos en túneles hidroeléctricos.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones para realizar inspecciones de túneles hidroeléctricos:

• Los túneles hidroeléctricos son componentes de importancia crítica para operaciones de energía futuras seguras y deben inspeccionarse y mantenerse para evitar un servicio ininterrumpido;
• La frecuencia de las inspecciones debe basarse en la consideración de todos los criterios técnicos relevantes, incluida la antigüedad existente del túnel, el diseño original y la construcción, la construcción histórica y los problemas operativos, las reparaciones históricas y las operaciones hidráulicas;
• Se debe realizar una revisión de toda la información histórica relevante antes de realizar una inspección de túnel para identificar ubicaciones de particular interés durante una inspección;
• Debe asignarse el tiempo adecuado para las inspecciones de túneles para que la calidad de la información no se vea comprometida;
• Deben emplearse tecnologías de vanguardia para las inspecciones de ROV para obtener la mejor calidad de información posible;
• Los métodos de detección de exfiltración deben incluirse con las inspecciones de ROV, especialmente para un túnel antiguo;
• Se debe completar una evaluación técnica exhaustiva de todos los datos de inspección e información histórica por parte de un experto en túneles hidroeléctricos para proporcionar una evaluación general del riesgo del túnel;
• Se debe realizar una evaluación integral del riesgo como parte de un plan de gestión de activos para proporcionar una indicación del perfil de riesgo de un túnel hidroeléctrico antiguo, y;
• Las compañías hidroeléctricas deben tomar nota de las causas fundamentales y las lecciones aprendidas de la reciente serie de colapsos de túneles para evitar futuros eventos.

11. REFERENCIAS

Gerstner R., Netzer, E., and Vogl, A. 2013. Long-term Behaviour of Pressure Tunnels. Geomechanics and Tunnelling 6, No. 5. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin ·

Brox, D. 2019. Hydropower Tunnel Failures – Risks and Causes, International Tunneling Association World Tunnel Congress, Naples, Italy.

Rothfuss, B.D., Bednar, S., and Clarke, E. 2011. Water Tunnel Condition Assessment: A Comprehensive Approach to Evaluating Reliability, Hydrovision, Sacramento, CA.

Fippen, R., Sketchley, J., Redhorse, T., and Tsztoo, D. 2018. In-Depth Inspection of a Century-Old San Francisco Water Tunnel, North American Tunnel Conference, Washington, DC.

Montero, R., Victores, J.G., Martínez, S., Jardón, A., and Balaguer, C. 2015. Past, Present and Future of Robotic Tunnel Inspection. Automation in Construction, Elsevier.

Jessop, M., Jardani, A., Revil, A., and Kofoed, V. 2018. Magnetometric resistivity: a new approach and its application to the detection of preferential flow paths in mine waste rock dumps. Geophys. J. Int. (2018) 215, 222–239.

Rosen, S. 2005. Geotechnical Risk Assessment and Management for Maintenance of Water Conveyance Tunnels in South Eastern Australia. AGS-AUCTA Mini-Symposium: Geotechnical Aspects of Tunneling for Infrastructure Projects.

Benson, R.P. 1989. Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 155–170.

Este documento representa la traducción de la versión original en inglés que se presentará en la Conferencia HYDRO 2020 en Estrasburgo, Francia.