

BASES PARA ESTUDIOS DE GEOLOGIA E HIDRODINÁMICA FLUVIAL PARA EL CRUCE DE DRENAJES NATURALES EN PROYECTOS DE GASODUCTOS

Ciro A. Arévalo Ortiz
Golder Associates Perú S.A.
carevalo@golder.com.pe

1.0 INTRODUCCIÓN

Los estudios para cruzar drenajes naturales en la construcción de ductos, sean estos gasoductos, oleoductos, mineroductos, entre otros, involucra el concurso de diversas especialidades, entre ellas hidrología, hidráulica fluvial, geología aplicada y geotecnia. Las soluciones de cruce pueden variar desde tuberías enterradas debajo del fondo del cauce, cruces aéreos e instalación de tuberías con perforaciones horizontales dirigidas (HDD). La elección de una de estas soluciones dependerá de diversos factores, incluyendo las condiciones geológicas de sitio.

De los tipos de cruce, los más frecuentes son los que van enterradas bajo el cauce, por su reducido costo y rápida implementación con los equipos disponibles para la construcción del ducto. Así por ejemplo, los gasoductos que transportan el gas de Camisea a la costa (TgP y Perú LNG) cuentan con más del 98 % de estos casos, mientras que los cruces aéreos escasamente son dos, y de HDD, uno, en el río Urubamba.

Tomando en cuenta la frecuencia de casos de los tipos cruces, en este trabajo se expone el contexto en que deben llevarse a cabo los estudios geológicos necesarios para ductos enterrados bajo el cauce de los cursos de agua, a partir de la experiencia en el desarrollo de los proyectos y la construcción de los gasoductos mencionados en el párrafo anterior.

2.0 CONSIDERACIONES SOBRE TIPOS DE CRUCE DE DRENAJES NATURALES

La clasificación de los tipos de obra actualmente no responde a un consenso. En algunos casos se diferencian con detalles mínimos de construcción, implicando hasta nueve tipos (*Cross Cascade Pipeline, EFESC Application, 1998*)¹, o bien toman en consideración de manera especial el contexto ambiental de las obras²:

La clasificación de las obras de cruce, desde una perspectiva de la geotenia y de la manera en que se abordan los estudios geológicos, comprende a los siguientes tipos:

- Cruce aéreo
- Cruce con perforación dirigida, y
- Cruces con zanja y tapado de tubería

Cruce aéreo

Los cruces aéreos son alternativas que se utilizan cuando la sección del valle es angosta, con taludes muy empinados y estables. En este contexto, las evaluaciones están orientadas principalmente a la fundación de los estribos, y eventualmente también de los pilares, de la estructura que soportará la tubería. Es decir se asemejará a los estudios geológicos- geotécnicos para puentes. Esta solución, por ejemplo, se implementó para cruzar el río Comerciato en el tramo de selva del gasoducto TgP.

Cruce con perforación horizontal dirigida

Tiene su origen en la tecnología de perforación de pozos de petróleo. Inicialmente su uso se limitó al cruce de ríos y obstáculos de otra naturaleza, como carreteras y canales, por la industria petrolera. Actualmente su aplicación se ha extendido a la instalación de cables eléctricos y de comunicaciones, entre otros, y ya cuenta con la capacidad para la instalación de tuberías con más de 1 m de diámetro y más de 1000 m de longitud. En resumen, consiste en una técnica que utiliza segmentos de tubería de perforación articulados de tal forma que permiten construir una cavidad de sección circular de una orilla a otra a varios metros por debajo del lecho del río, donde se instala el ducto. Implementar esta alternativa requiere de estudios geológicos detallados de superficie y del subsuelo con métodos geofísicos, preferentemente sísmica de refracción y ensayos MASW, perforaciones diamantinas y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y de rocas. A partir de ellos se obtiene información confiable de las características de los materiales que atravesará la perforación dirigida (HDD), de modo que las empresas especializadas puedan llevar a cabo el planeamiento y costeo de la obra.

Las perforaciones horizontales dirigidas vienen alcanzando importantes niveles de aceptación y competitividad en la instalación de ductos en los cruces de los ríos. En un principio se utilizaron para cruzar ríos con caudales inmanejables. Pero ahora se recurre a esta tecnología por sus ventajas ambientales, dado que no interfieren con el régimen natural del río y no impactan la claridad o nivel de turbidez de sus aguas, como ocurre con el cruce mediante zanja y tapado de la tubería.

Cruce con zanja y tapado de tubería

Los estudios y la construcción de los ductos enterrados debajo de los cauces de los ríos y quebradas requieren estudios orientados a que los flujos no generen daños a la tubería. Los daños pueden conducir inclusive al seccionamiento del ducto y producir derrames de sustancias contaminantes que pueden llegar a centenares de kilómetros.

La excavación de zanja y enterrado de la tubería es el método más frecuente para el cruce de ríos y quebradas, principalmente por su reducido costo y rapidez de ejecución. Para este caso es conveniente que las obras sean programadas para las épocas de estiaje, cuando los cursos de agua estén secos o con caudales mínimos.

Este método se aplica en la medida que los caudales de avenida puedan ser manejados con equipos u obras de derivación. En este último caso se requiere la conformación de obras temporales de desvío a manera de liberar de los flujos de agua la mitad de la sección del río, mientras se ejecutan las obras de excavación, instalación y tapado de la tubería, para que una vez concluidas las obras en esta sección del río se proceda de igual manera con la otra mitad, haciendo discurrir los caudales sobre la sección donde la tubería ya está enterrada y con las obras de protección colocadas.

3.0 ESTUDIOS DE GEOLOGÍA Y DE HIDRÁULICA FLUVIAL PARA EL DISEÑO DE LAS OBRAS DE CRUCE

El propósito de los estudios de hidráulica fluvial y de geología aplicada es que la tubería sea instalada a una profundidad mínima (CM en la Figura 1) respecto al punto más bajo del cauce del drenaje, de tal manera que no quede descubierta como consecuencia de la socavación generada por avenidas extremas (periodos de retorno de 200 ó 500 años, según sea el caso), y consecuentemente no se dañe el ducto. Así también definir los puntos de inflexión de la tubería hacia los bordes del río o de la quebrada, de modo que la erosión lateral no tenga consecuencias en la seguridad del ducto. Otro punto no menos importante es definir las características y especificaciones de las obras de protección que deben implementarse para aumentar la seguridad del ducto contra la erosión del lecho y reberas del río.

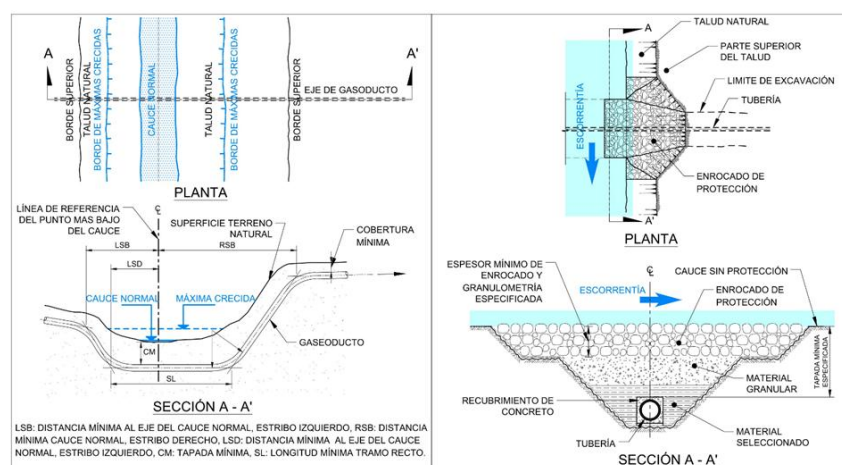


Figura 1. Elementos que necesitan ser definidos para el cruce de tuberías en los cursos de agua y esquema de tubería instalada y obras de protección (plantas y secciones).

Existen diferentes teorías sobre erosión general por contracción de flujo para estudios de socavación de cauce por el paso de avenidas. El modelo que considera la anulación del arrastre de sólidos es el

más adecuado, y la ecuación de Laursen, la más aceptada. La ecuación, en términos analíticos, es la siguiente (Golder, 2002):

$$Y^2 = (Ku \times Q^2)^{3/7} / (Dm^{2/3} \times W^2)^{3/7}$$

Y² = Profundidad de equilibrio luego de la erosión. **Dm** = Diám. de partículas no sujetas a transporte.
Dm=1.25xD₅₀.

Ku = Constante (en el sistema SI = 0.025) **W** = Ancho del fondo del río.

Q = Caudal de la avenida de diseño.

Actualmente estos problemas se resuelven con software elaborados para este fin, como el HEC-RAS (AWI1104102), consiguiéndose de esta manera modelar la erosión del cauce bajo diferentes consideraciones y escenarios. Pero como en la casi totalidad de los fenómenos de la naturaleza que se tratan de modelar numéricamente, tienen la gran incertidumbre de los datos de entrada y las limitaciones para incorporar todas las variables. No por ello dejan de ser útiles y muy importantes, pero es preciso tomar en cuenta que en estos casos el modelamiento numérico es una herramienta matemática de ingreso y salida de datos, que ayuda a comprender el problema analizado bajo diferentes consideraciones, y no es la solución en sí.

La información recabada en los estudios geológicos de sitio y el conocimiento del especialista de los procesos geológicos en la hidrodinámica fluvial serán de gran utilidad para ayudar a establecer las restricciones y darle sentido al modelamiento, más allá de los datos fácticos que proporcionará para la aplicación en el modelo, como por ejemplo el tamaño de los clastos, la pendiente del cauce en el tramo en evaluación, la descripción apropiada para la estimación del coeficiente de Manning (n) que interviene en el cálculo de la velocidad del flujo, etc. En el modelamiento se recurrirá en algunos casos a calibraciones del ancho de la sección de flujo y el tirante respectivo bajo diferentes escenarios de avenidas y contracciones de del flujo, y para esto será necesario el entendimiento de las modificaciones que puedan darse en el cauce en el corto, mediano y largo plazo. En buena cuenta, el modelamiento tiene tanto de ciencia como de arte, y la geología aplicada tiene que ver bastante con esta última.



Figura 2. Cauce de avenida normal y de máximas avenidas, o también de máximas crecidas. El cauce normal es divagante en los ríos anastomosados, y la contracción del flujo puede darse en cualquier parte del cauce de máximas crecidas.

La determinación de la distribución granulométrica de los sedimentos que conforman el cauce, orientado a definir el tamaño medio de los clastos (D₅₀) para estimar la socavación y explorar la posibilidad de que sean aprovechados en el enrocado de protección, actualmente es facilitada por los

software que utilizan fotografías digitales con referencia a un elemento de tamaño conocido (Figura 3).

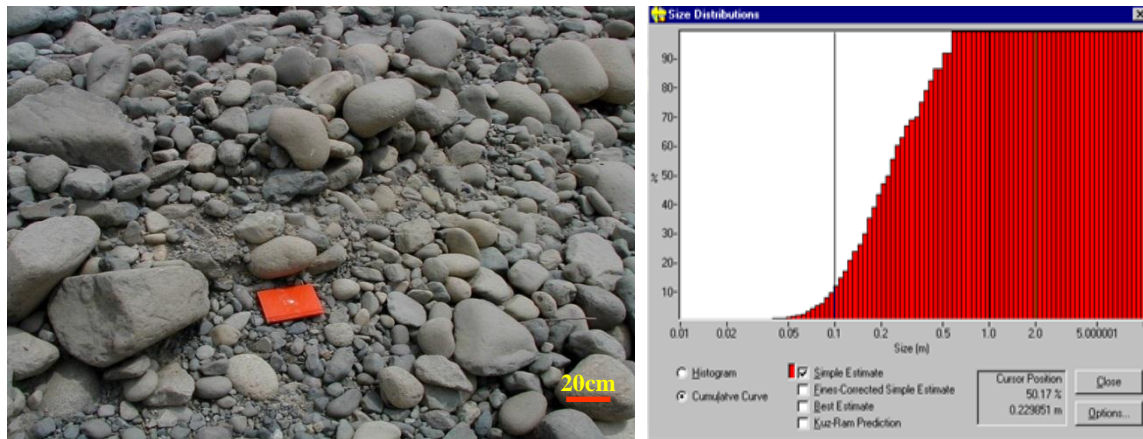


Figura 3. Sedimentos de río y cuaderno con dimensiones conocidas para determinar digitalmente la distribución granulométrica de los clastos. A la derecha, salida del software GoldSize®, con las distribución granulométrica de la fotografía.

Los cantos y bloques para el enrocado de protección, que funcionan como rip – rap, usualmente provienen del mismo cauce del río, y para determinar el tamaño medio a ser especificado existen diferentes ecuaciones (Lagasse P.F. et. al. 2006)³. Así por ejemplo las siguientes ecuaciones permiten determinar el D_{50} para el enrocado, considerando números de Froude (Fr) mayores y menores que 0.8, respectivamente (U.S. Customary Edition-ASSHTO, 2005)⁴:

$$\begin{aligned} D_{50}/y &= [(K/(Ss - 1)) (V^2/gy)] , & Fr < 0.8 \\ D_{50}/y &= [(K/(Ss - 1)) (V^2/gy)]^{1/4}, & Fr > 0.8; \quad \text{Donde:} \end{aligned}$$

D_{50} =Diámetro medio del enrocado. V =Velocidad media del flujo. Ss =Peso específico del material para enrocado. g =Aceleración de la gravedad. y =Profundidad del flujo. K =Constante 0.89.

Los cruces de cursos de agua en lechos rocosos prácticamente no reportarán procesos de socavación de cauce para el periodo de vida de un ducto. En este caso la zanja que alberga a la tubería es rellena con concreto ciclópeo, a manera de restablecer las mismas condiciones de resistencia del lecho natural.

4.0 ASPECTOS GEOLÓGICOS QUE DEBEN SER ABORDADOS EN LOS ESTUDIOS PARA LAS OBRAS DE CRUCE

Las evaluaciones de cruce de ríos y de quebradas requiere del concurso de la geología para proporcionar información de las condiciones de sitio, orientar los criterios para los cálculos y modelamientos de hidrodinámica fluvial, anticipar los riesgos distintos a los de erosión a los que podría estar expuesta la tubería y proponer anticipadamente las obras de control o mitigación de los riesgos identificados, entre otros.

La información geológica resulta principalmente de la inspección del sitio de cruce. De esta manera se definen las características geológicas, geomorfológicas, sedimentológicas, referencias hidrológicas y de hidrodinámica fluvial. A este efecto la información se consigna en formatos elaborados para tal fin y se elabora el mapa ingeniero geológico de detalle sobre una base topográfica con curvas de nivel espaciadas a un metro o menos, que abarque no menos de 100 m aguas arriba y abajo del eje del ducto. En esta etapa también se toman las fotografías digitales de los sedimentos para determinar el tamaño y distribución granulométrica de los clastos.

Una ficha típica de relevamiento de información de campo para el cruce de un drenaje natural contempla la siguiente información:

- 1) Datos generales de: nombre del río, progresiva de la conducción, coordenadas y cota referenciales, fecha en que se efectúa la inspección, etc.
- 2) Descripción de las características del área: geomorfológicas, geológicas e hidrodinámicas en un contexto regional y local.
- 3) Detalle de las características del cauce y las riberas del río, tanto las del cauce normal como el cauce de las máximas crecidas, en estrecha relación con el plano ingeniero geológico de detalle que se elabora.
- 4) Pendiente longitudinal del río medida con eclímetro.
- 5) Referencias altitudinales del caudal normal y de avenidas extremas, y anchos del cauce respectivos.
- 6) Descripción del cauce normal, características de riberas y sedimentos: granulometría, redondez, esfericidad, tamaño máximo, compacidad, composición litológica, etc.
- 7) Descripción del cauce de máximas avenidas y características de riberas y sedimentos.
- 8) Descripción de los estribos del cruce. Materiales de cobertura y coraza de protección natural, tipo de vegetación, pendiente de los taludes.
- 9) Sinuosidad del cauce
- 10) Riesgos de geodinámica externa e hidrodinámica fluvial. Deslizamientos, potencial de erosión de riberas, colmatación de cauce, erosión de fondo
- 11) Obstáculos que afectan el flujo. Estribos y pilares de puentes, muros de encauzamiento, obras de toma, bloques de gran tamaño, etc.
- 12) Modificaciones previsibles en el cauce. Por sedimentación, estrechamiento de cauce, cambios en el curso del río, formación de nuevos brazos, basculamiento del flujo.
- 13) Fotografías ilustrativas y de sedimentos análisis granulométricos.

Es importante resaltar que los estudios geológicos para cada cruce de un curso de agua en particular son únicos, y que no se debe confiar en el entendimiento generalizado de las características morfológicas, sedimentarias, ni hidrodinámicas del drenaje natural en cuestión. Es imprescindible el relevamiento de la información de terreno para el estudio y diseño de las obras de cruce de cada uno de ellos.

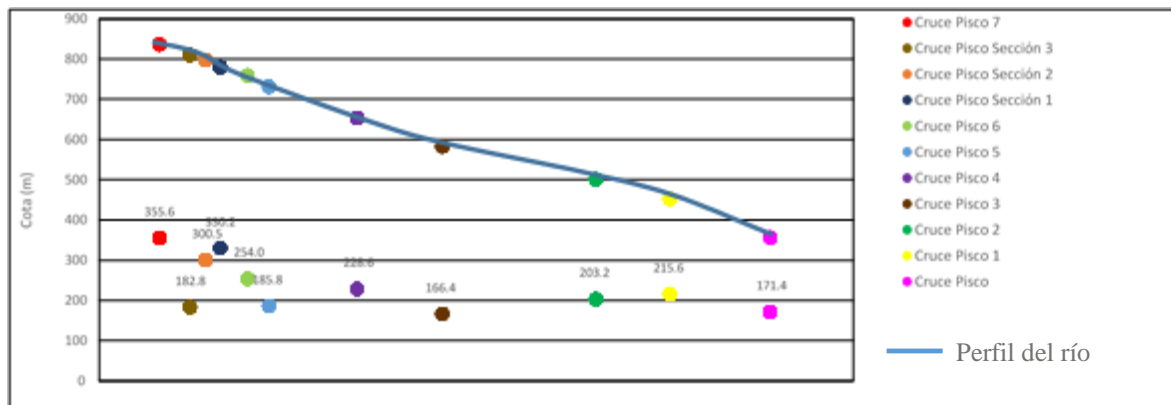


Figura 4. D_{50} para diferentes locaciones en el río Pisco. No obstante que se tiene una tendencia definida en la disminución del tamaño de los clastos con la cota (mayor recorrido de sedimentos), este parámetro cambia a cortas distancias.

CONCLUSIONES

- Los estudios de geología aplicada e hidrodinámica fluvial, conjuntamente con los de otras especialidades, aportan información relevante para la selección del tipo de cruce que se implementará en cada caso particular.

- Cada método de cruce requiere procedimientos de estudios geológicos específicos.
- Los estudios para los cruces mediante zanja y tapado de tubería tienen por intención que la profundidad de enterramiento de la tubería sea mínima, al igual que el retiro de las curvaturas de la tubería en los extremos de la obra de cruce, con la finalidad de minimizar el volumen de movimiento de tierras y las dificultades de obra que implica la interferencia del nivel freático, de ser el caso. Estas distancias mínimas deben ser tales que no afecten la seguridad del ducto ante avenidas extremas por socavación de cauce y erosión de riberas, respectivamente.
- Los estudios de geología aplicada y de hidrodinámica fluvial son fundamentales en los cruces de los drenajes naturales con zanja y tapado de tubería, tanto porque proporcionan información específica del terreno para los análisis de socavación de cauce y estimación del tamaño de clastos a ser especificado para el enrocado de protección, así como para establecer las consideraciones y restricciones en los modelamientos numéricos para el análisis de socavación del cauce.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.efsec.wa.gov/opl/sec2-14.pdf>
2. CAAP, CEPA, CGA. (2005). Pipeline Associates Watercourse Crossings. 3rd Ed. Cap 3. Ottawa, Canadá
3. Lagasse P.F. et. al. (2006). Riprap design criteria, recommended specifications and quality control-NCHRP Report 568 pg. 28 -29 –Washington D.C. USA.
4. U.S. Customary Edition-ASSHTO (2005). Model Drainage Manual, 3rd Ed. Washington D.C. USA.
5. Golder Associates Perú S.A. (2002). Buried river crossing. Sistema de transporte de Gas y Condensados Proyecto Camisea. Lima, Perú.
6. Golder Associates Perú S.A. (2006) Evaluación de Cruce de Ríos Proyecto de Gasoducto Perú LNG. Lima, Perú.
7. Golder Associates Perú S.A. (2008). TM Review of Pisco river crossing works. Lima, Perú.