

**Producto 5:
Informe final. V3**



**Empresa de
Acueducto,
Alcantarillado y
Aseo de Bogotá-
ESP**

**Contrato No. 2-02-25500-
00149-2014**

**Diseño detallado de la
estructura de conexión
de los túneles principal y
de emergencia del
interceptor Tunjuelo
Canoas**

Septiembre 15 de 2016



**CDM
Smith**



**EMPRESA DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO DE
BOGOTÁ E.S.P.**

CONTRATO NO. 2-02-25500- 00149-2014

**Diseño detallado de la estructura de conexión de los túneles
principal y de emergencia del Interceptor Tunjuelo Canoas**

**PRODUCTO No. 5
INFORME FINAL. V3**

CONTROL DE REVISIONES

TITULO DEL DOCUMENTO: PRODUCTO No. 4 "INFORME FINAL"	
CLIENTE: ACUEDUCTO DE BOGOTA	
PROYECTO: Diseño detallado de la estructura de conexión de los túneles principal y de emergencia del Interceptor Tunjuelo Canoas	No. CONTRATO 2-02-25500- 00149-2014
PROPUESTA:	No.

DESCRIPCIÓN DE REVISIONES.

VERSIÓN	DESCRIPCION Y/O ESTADO	FECHA DE APROBACION	OBSERVACIONES
0	Informe con toda la documentación relativa a costos de construcción, cronograma, documentos para licitación, etc.	Abril 04 de 2016	Observaciones realizadas por la Supervisión del Contrato.
1	Informe con toda la documentación relativa a costos de construcción, cronograma, documentos para licitación, etc. Se atienden las observaciones realizadas a los TDR y cronograma de obra, y se ajustaron los valores de cálculo de cantidades de obra y presupuesto.	Septiembre 8 de 2016	Observaciones realizadas por la Supervisión del Contrato.
2	Informe con toda la documentación relativa a costos de construcción, cronograma, documentos para licitación, etc. Se atienden las observaciones realizadas a los TDR, cronograma de obra, y se ajustaron los valores de cálculo de cantidades de obra y presupuesto; se incluye el PMA.		Observaciones realizadas por la Supervisión del Contrato.
3	Informe con toda la documentación relativa a costos de construcción, cronograma, documentos para licitación, etc. Se atienden las observaciones realizadas a la versión anterior, y se incluyen los anexos respectivos.		

DESCRIPCIÓN DE ANEXOS.

Anexo A:	Cantidades de obra
Anexo B:	Presupuesto
Anexo C:	Balance económico
Anexo D:	Cronograma de obra
Anexo E:	Documentos de licitación - Términos de Referencia
Anexo F:	Plan de manejo ambiental
Anexo G:	Ficha predial
Anexo H:	Animación 3-D



CONTROL DE REVISIÓN Y APROBACION.

<p>REVISADO POR: (AREA/CARGO/FIRMA)</p> <p>Solomon J. Abel Asistente CO-DIRECTOR NACIONAL CDM Smith INC</p>	<p>APROBADO POR: (AREA/CARGO/FIRMA)</p> <p>Michael B. Gilbert Director Internacional de la Consultoría CDM Smith INC</p>
--	---

©2016 CDM SMITH. TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, REUTILIZACIÓN DE DOCUMENTOS: DOCUMENTOS Y DISEÑOS SUMINISTRADOS POR EL SERVICIO PROFESIONAL, INCORPORADOS EN ESTE DOCUMENTO, SON PROPIEDAD DE CDM SMITH Y EAB, NO SERÁN UTILIZADOS, NI TOTAL NI PARCIALMENTE, PARA CUALQUIER OTRO PROYECTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE CDM SMITH Y/O EAB.

PRODUCTO No. 5 INFORME FINAL

APROBACIÓN DEL INFORME

<p>Michael B. Gilbert Director Internacional de la Consultoría CDM Smith INC</p>	<p>Reinaldo Pulido Supervisor del Contrato de Consultoría N° 2-02- 25500-0149-2014 Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá</p>
--	--

Tabla de contenido

Sección 1	Introducción.....	1-1
Sección 2	Aspectos contractuales	2-1
Sección 3	Descripción detallada de los trabajos de consultoría.....	3-1
3.1	Revisión de información disponible	3-1
3.2	Investigación de campo y topografía.....	3-1
3.3	Estudio geotécnico.....	3-2
3.4	Diseño detallado	3-3
Sección 4	Procedimientos e innovaciones tecnológicas empleados.....	4-1

ANEXOS

Anexo A: Cantidades de obra
Anexo B: Presupuesto
Anexo C: Balance económico
Anexo D: Cronograma de obra
Anexo E: Documentos de licitación - Términos de Referencia
Anexo F: Plan de manejo ambiental
Anexo G: Ficha predial
Anexo H: Animación 3-D

Lista de figuras

Figura 3-1 Localización de los frentes de excavación y de las perforaciones ejecutadas	3-2
Figura 4-1 Secuencia constructiva para la excavación de los pozos de ventilación-Raise Boring	4-2

Sección 1

Introducción

El presente documento corresponde al Informe Final – Producto 5 del Proyecto del contrato No. 2-02-25500-00149-2014, que tiene por objeto el “*Diseño detallado de la estructura de conexión de los túneles principal y de emergencia del interceptor Tunjuelo Canoas*”, el cual fue suscrito entre la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá E.S.P. (EAB) y CDM Smith Inc., el 24 de enero de 2014.

En este producto se presentan los anexos correspondientes al presupuesto y cantidades de obra, cronograma, términos de referencia, etc., necesarios para la realización de la interconexión de los túneles del ITC.

El documento está estructurado de la siguiente forma:

- Sección 1: Introducción
- Sección 2: Aspectos contractuales
- Sección 3: Descripción detallada de los trabajos de consultoría
- Sección 4: Procedimientos e innovaciones tecnológicas empleados

Adicionalmente en el presente Informe se incluyen los siguientes anexos:

- Anexo A: Cantidades de obra
- Anexo B: Presupuesto
- Anexo C: Balance económico
- Anexo D: Cronograma de obra
- Anexo E: Documentos de licitación - Términos de Referencia
- Anexo F: Plan de manejo ambiental
- Anexo G: Ficha predial
- Anexo H: Animación 3-D

Sección 2

Aspectos contractuales

En enero de 2014 mediante Invitación Directa ICSM-0115-2014 la EAB solicitó a CDM Smith que desarrollara el diseño geotécnico detallado de la de la estructura de interconexión de los túneles principal y de emergencia del Interceptor Tunjuelo Canoas ITC. Luego de ser aprobada la propuesta presentada por CDM Smith se procedió con la formalización del Contrato el cual se desarrolló, entre otras, bajo las siguientes condiciones principales:

- Objeto: “Diseño detallado de la estructura de conexión de los túneles principal y de emergencia del Interceptor Tunjuelo Canoas ITC”
- Plazo: 4 meses
- Valor: \$268.231.497. De este valor \$101.430.300 correspondieron a gastos reembolsables destinados a la exploración geotécnica y ensayos de laboratorio, y a viajes de especialistas internacionales

Una vez cumplidos los requisitos legales, se firmó el Acta de Inicio el día 17 de marzo de 2014 con lo cual la fecha límite para la ejecución del Contrato se estableció para 16 de julio de 2014.

El día 10 de abril de 2014 la EAB suspendió el Contrato por un período de 60 días con el fin de poder tener claridad acerca de la manera cómo deberían recuperarse las máquinas tuneladoras (TBM) que excavaron los túneles y que se encuentran actualmente en los frentes de cada estructura. Con esta suspensión el contrato debería reiniciarse el día 9 de junio de 2014, y finalizar el día 16 de septiembre de 2014.

El 10 de junio de 2014 nuevamente la EAB suspendió el contrato indefinidamente debido a que en esa fecha aún no se tenía certeza de cuándo se iba a dar el pronunciamiento del Consejo de Estado respecto a cómo debería proceder la EAB para adoptar la solución técnicamente de menor valor para la construcción del pozo ITC-12, y en lo relativo a la extracción de las TBM's ya que se encontraba vencido el contrato con el Consorcio Canoas.

El Contrato se reinició el día 31 de julio de 2015 luego de 477 días de haber estado suspendido; la fecha de finalización debería ser el 5 de noviembre de 2015.

Una vez reiniciados los trabajos, y bajo las nuevas directrices establecidas por la EAB las cuales a su vez estaban basadas en el fallo emitido por el Dr. Carlos Eduardo Medellín Becerra, CDM Smith consideró que para poder dar cumplimiento al objeto del Contrato bajo los estándares de calidad y buen servicio que caracterizan la firma, y que cubren las expectativas de la EAB, era necesaria una prórroga de tres (3) meses para la ejecución del Contrato. Esta solicitud se sustentó en el tiempo requerido para el análisis de alternativas teniendo en cuenta las condiciones reales para la extracción o recuperación de las TBM's, o para la alternativa de que la solución a desarrollarse debería hacerse al margen de que las mismas permanecieran enterradas en el sitio; adicional a esto, el diseño de la solución requería la ejecución de una topografía detallada al interior de los túneles con el fin de determinar la posición exacta de los frentes de cada uno de ellos. Dada la complejidad de adelantar los trabajos de topografía en espacios confinados, estos tuvieron un costo mayor al contemplado inicialmente en los pliegos de condiciones del Contrato, y requerían como mínimo dos a tres semanas para su ejecución.

Con todo esto, se fijó una nueva fecha de finalización del Contrato para el día 4 de febrero de 2016. Sin embargo, por inconvenientes logísticos ajenos a las partes y derivados de los procesos para obtener los permisos respectivos de ingreso a los túneles y especialmente de ocupación del predio en donde se encuentran los frentes de los túneles, cuya propiedad le pertenece al municipio de Soacha, los trabajos de campo (topografía y perforaciones para la toma de muestras de suelo), se iniciaron durante la segunda quincena de 2015 y se postergaron hasta los primeros días de enero de 2016.

CDM Smith Inc. revisó el cronograma de ejecución y determinó que dado el retraso presentado en los trabajos de campo no sería posible cumplir con la fecha límite de entrega, y solicitó de nuevo una prórroga de dos (2) meses con lo cual se estableció el día 4 de abril de 2016 como nueva fecha límite de entrega del diseño.

Una vez cumplida la entrega, la EAB procedió con la revisión de la información y emitió las observaciones respectivas. Entre otras se solicitó que el diseño hidráulico realizado se sustentara en un modelo computacional con el software CFD, para las condiciones de flujo libre requeridas.

El desarrollo de las modelaciones con el software CFD se realizó para varios escenarios de flujo, llegando a la conclusión de que la estructura hidráulica diseñada (vórtice), no tenía suficiente caída para disipar la energía y poder cumplir así con la condición de flujo libre. Por lo anterior, hubo necesidad de ajustar el diseño a una nueva estructura que cumpliera con la condición solicitada; el ajuste al diseño requirió una prórroga en el Acta de Liquidación de 1,5 meses, la cual se estableció para el día 15 de septiembre de 2016.

Sección 3

Descripción detallada de los trabajos de consultoría

El diseño objeto del presente Contrato se desarrolló siguiendo el siguiente orden:

3.1 Revisión de información disponible

Se revisó toda la información disponible facilitada por la EAB. Esta información consistía principalmente en todos los documentos relativos al diseño y construcción de los túneles del ITC. En esta etapa se revisó cada uno de los documentos y se planteó una matriz para valorar su relevancia y determinar su utilidad dentro del desarrollo del presente diseño.

La información geotécnica sirvió, entre otros aspectos, para corroborar los resultados de la exploración geotécnica ejecutada en el desarrollo del presente diseño; así mismo los datos hidráulicos y estructurales sirvieron de punto de partida para definir los parámetros iniciales del diseño.

3.2 Investigación de campo y topografía

En esta etapa del diseño se ejecutaron los trabajos de topografía al interior de los túneles. Para esto se accedió al túnel principal a través del pozo ITC-8A, mientras que para el túnel de emergencia se accedió normalmente por el portal de entrada de este. En superficie también se realizó un levantamiento en la zona de intersección de los túneles.

La importancia de los trabajos de topografía radicó en la necesidad de localizar exactamente los frentes de avance de cada uno de los túneles pues existía una incertidumbre derivada de la información de referencia, debido a que se tenían tres fuentes de información topográfica que diferían entre sí.

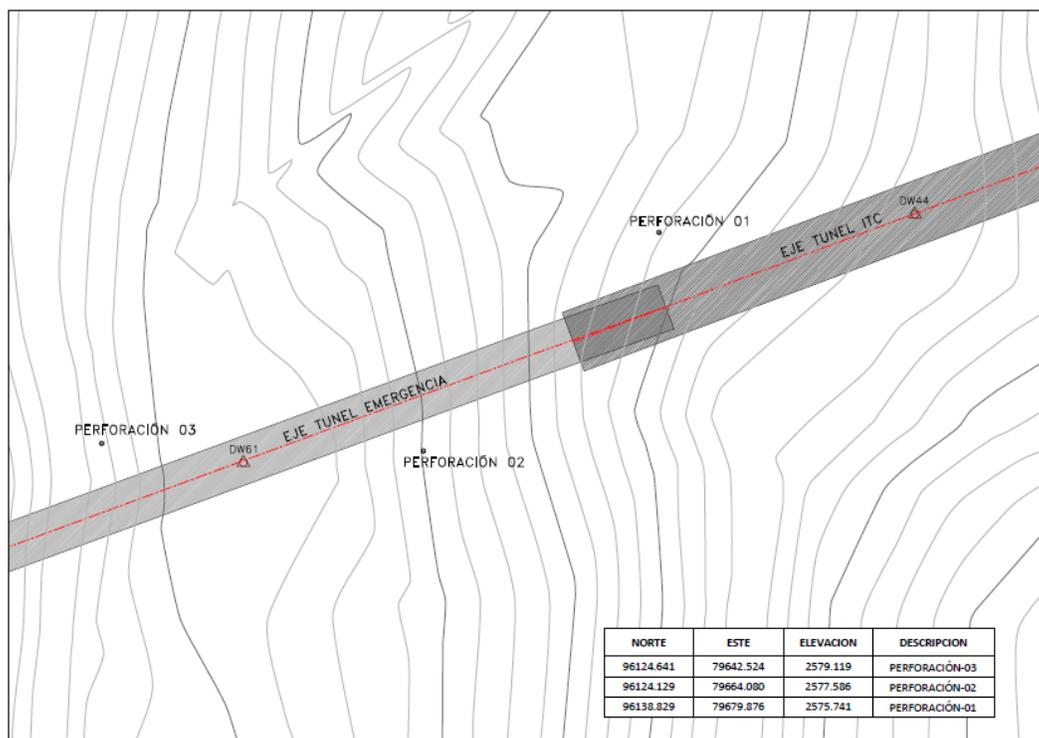
Tan pronto se tuvo certeza de la localización de los dos frentes de excavación, y de su proyección en superficie, se definieron los puntos de perforación para la exploración geotécnica. En la zona se realizaron dos perforaciones a diferentes profundidades. Estas perforaciones se localizaron en cercanías a cada uno de los frentes de los túneles del ITC, es así como la Perforación 1 (PF-01) se localizó al norte del túnel principal y la Perforación 2 (PF-02) hacia el costado sur del túnel de emergencia. La PF-01 alcanzó una profundidad de 70 m, cinco metros por debajo de la cota batea del ITC o túnel principal que corresponden a un diámetro adicional, y la PF-02 llegó hasta los 75 m de profundidad igualmente al equivalente a un diámetro por debajo de la cota batea del túnel de emergencia; la diferencia en profundidad se debe a los niveles en superficie dados por la pendiente natural del terreno. Ver la Figura 3-1. Los frentes de los túneles se localizan en la zona conocida como “Predio INVIAS”.

El proceso empleado para toma de muestras fue el convencional, recuperando muestras inalteradas cada 1,5 m de avance; a las muestras inalteradas obtenidas se le tomaron lecturas con penetrómetro de bolsillo para poder tener una referencia de la resistencia del material in situ. Adicionalmente siempre que fue posible y que las condiciones del material así lo determinaron, se tomaron lecturas con veleta de campo. En las zonas en las que el suelo aumentó su resistencia se avanzó con SPT registrando las

lecturas correspondientes, hasta que este dio rechazo; a partir de esta profundidad se avanzó con muestreo continuo de núcleos de roca con diámetro HQ.

En total se recuperaron siete (7) muestras inalteradas tipo Shelby de las cuales seis se obtuvieron en la perforación 1.

Figura 3-1 Localización de los frentes de excavación y de las perforaciones ejecutadas



Una vez finalizadas las labores de perforación las muestras obtenidas se llevaron al laboratorio; se hizo una revisión visual de las muestras y se contrastó con la información referenciada en los registros de perforación. Se seleccionaron las muestras representativas en función de las necesidades del diseño requerido. En total se ordenaron 13 ensayos de caracterización discriminados de la siguiente manera:

- Corte Directo en Suelo: 4
- Compresión Simple en Suelo: 3
- Compresión Simple en Roca: 6

3.3 Estudio geotécnico

La información presentada correspondió a los resultados de los trabajos ejecutados por CDM Smith Inc. a lo largo del desarrollo del contrato, complementados con información relevante extraída de la información de referencia que se tenía, específicamente del informe I-TU-PT-011-v1 DISEÑO TÚNEL DE EMERGENCIA.

En el estudio geotécnico se reseñaron aspectos relevantes para la caracterización geomecánica del subsuelo. Se hizo mención al origen geológico del material presente en la zona de interconexión, areniscas pertenecientes a la formación denominada Labor-Tierna ($K2t$), que según el Mapa Geológico de la

Sabana de Bogotá 2005 – INGEOMINAS se caracterizan por la presencia de intercalaciones de areniscas y lodolitas.

En el estudio geotécnico se definieron las propiedades principales del suelo y el macizo rocoso, a partir de los análisis de los resultados de laboratorio ejecutados sobre las muestras tomadas. Con base en las perforaciones de campo ejecutadas, se identificó el material de la siguiente manera general:

- Se distingue una capa de suelo que corresponde a una arcilla limo arenosa y arena limosa de color gris y oxidada en presencia de gravas, con valores N de SPT desde 8 para el material más blando hasta 58 para el material más resistente. El espesor de esta capa varía desde 0,0 hasta 12,5 m en la PF-01, y entre 0,0 hasta 10 m en la PF-02; esta variación en el espesor es atribuible a la inclinación del material.
- A partir de las profundidades indicadas en el párrafo anterior se observa una transición hacia la roca con espesor 0,50 a 2 m; esta transición está compuesta por una arcillolita meteorizada con algo de arena, oxidada.

Para determinar las propiedades del macizo rocoso se ejecutaron seis (6) compresiones a diferentes profundidades con el fin de poder obtener valores representativos en todo el espesor de roca perforada. El objetivo de los ensayos, tanto en suelo como en roca, fue poder estimar el comportamiento del terreno ante las excavaciones que se pretenden realizar.

Se determinaron las propiedades mecánicas de la roca a partir del criterio de falla de Hoek-Brown y del *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek.

El informe incluyó un capítulo con el análisis de alternativas de interconexión realizado por solicitud de la EAB. Dicho análisis comprendió la interconexión de las estructuras actuales a través de estructuras hidráulicas diseñadas para ajustar el caudal que discurre por los túneles teniendo en cuenta que el flujo pasará de un tubo de 4,2 m de diámetro a otro de 3,2 m de diámetro. Las alternativas se evaluaron bajo los condicionantes y lineamientos establecidos por la EAB.

Por solicitud expresa de la EAB se evaluó una cuarta alternativa que incluía una estructura tipo vórtice. Luego de varias reuniones con la EAB se solicitó a CDM Smith que solo analizara dos alternativas bajo la condición de que las máquinas tuneladoras se retirarán de los frentes actuales y que los escudos se abandonarán en sitio. Se analizaron dos estructuras hidráulicas, una rápida escalonada y una tipo vórtice; de cada una de ellas se presentaron los aspectos técnicos principales junto con un estimado de tiempo y presupuesto necesarios en el desarrollo de las mismas. Esto con el fin de poder seleccionar la mejor alternativa basados en criterios técnicos, de constructibilidad y de costo.

3.4 Diseño detallado

En esta etapa del Contrato se desarrollaron todas las áreas involucradas en el diseño de la estructura de interconexión de los túneles. Basados en la alternativa seleccionada, estructura tipo vórtice, se definieron los aspectos principales desde el punto de vista geométrico, de dimensiones, materiales, excavabilidad, viabilidad constructiva, etc.

El diseño geotécnico de la interconexión se sustentó en clasificaciones mecánicas y modelos computacionales de elementos finitos. El diseño hidráulico se realizó siguiendo los lineamientos planteados en la literatura técnica disponible para este tipo de estructuras, sin embargo, una vez modelada esta solución con el software hidráulico *Computational Fluid Dynamics* (CFD), se evidenció

que debido a la poca diferencia de nivel existente entre ambos túneles, el vórtice no disipaba suficientemente la energía y esta se acumulaba en la galería de conexión con el túnel de emergencia. Esta condición obligaba a la ampliación de la galería de conexión a unas dimensiones que la hacían prácticamente inviable debido al costo en el que podría resultar.

Conjuntamente con la EAB se determinó que la mejor opción era contemplar una estructura diferente. Se concluyó que una rápida con baffles funcionaría mejor para disipar la energía del flujo; esta nueva solución se modeló en CFD y evidentemente se pudo constatar su correcto funcionamiento. A partir de las dimensiones requeridas hidráulicamente, se ajustaron los análisis geotécnicos y se definió el soporte requerido por la excavación; de igual manera se ajustaron los cálculos estructurales.

Junto con el informe de diseño final se elaboraron los planos y las especificaciones técnicas de construcción respectivos.

Sección 4

Procedimientos e innovaciones tecnológicas empleados

Desde el punto de vista del diseño los programas computacionales empleados para soportar y corroborar los análisis y cálculos desarrollados, corresponden a los comúnmente conocidos en el mercado actual y ampliamente difundidos. Entre estos se pueden mencionar:

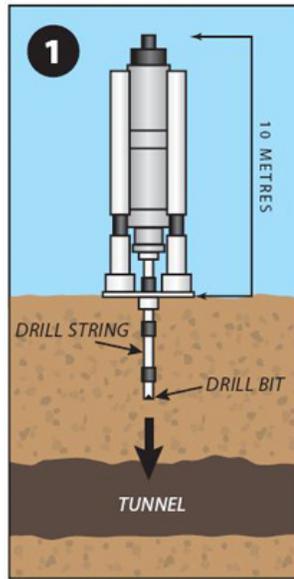
- **FLAC^{3D}5.0:** desarrollado por Itasca Consulting Group, es un software de 3 dimensiones (3-D) empleado en el diseño geotécnico de túneles, presas, taludes, y demás obras de ingeniería con cierto grado de complejidad. Este software se empleó para modelar las condiciones y estimar el comportamiento de la roca circundante a la estructura tipo vórtice, dada la complejidad de su geometría.
- **Phase 2:** desarrollado por RocScience, es un software de 2 dimensiones (2-D) de elementos finitos que permite estimar las deformaciones alrededor de excavaciones en obras geotécnicas, incluyendo las subterráneas. Este software se empleó para estimar las deformaciones de la roca alrededor de la excavación de la cámara para la estructura tipo rápida con bafles.
- **ANSYS FLUENT:** es un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), que cuenta con capacidad de modelar diferentes tipos de problemas relacionados con el movimiento de fluidos. FLUENT tiene la posibilidad de modelar la turbulencia, transferencia de calor e incluso reacciones para aplicaciones industriales. Este software fue seleccionado como idóneo para realizar el análisis de la estructura de interconexión dada su capacidad de simular el comportamiento de los flujos turbulentos y la interacción de distintas fases o fluidos en geometrías complejas.

Para la ejecución de las obras no se contempló el empleo de maquinaria o métodos constructivos innovadores, pues se estableció que la excavación se realice con métodos tradicionales de perforación y voladura, y/o manuales (retromartillo), de ser necesario.

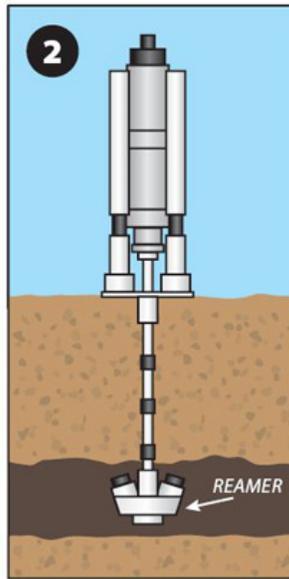
La excavación de los pozos de ventilación se hará con el sistema Raise Boring, también conocido como Raise Drilling, que consiste en la excavación mecánica de pozos entre dos o más niveles. Este método de excavación se desarrolló en Estados Unidos en los años 50, y básicamente consiste en ejecutar una perforación piloto entre los niveles deseados, y posteriormente ir ensanchando el pozo en sentido ascendente utilizando una cabeza de corte de mayor tamaño; esto se puede hacer en una o varias etapas hasta lograr el diámetro requerido. Los detritos generados por la perforación piloto se pueden evacuar con ayuda de agua o aire comprimido, mientras que el material de excavación para el ensanche del pozo se puede retirar a través del túnel localizado en el nivel inferior. Ver la Figura 4-1.

Figura 4-1 Secuencia constructiva para la excavación de los pozos de ventilación-Raise Boring

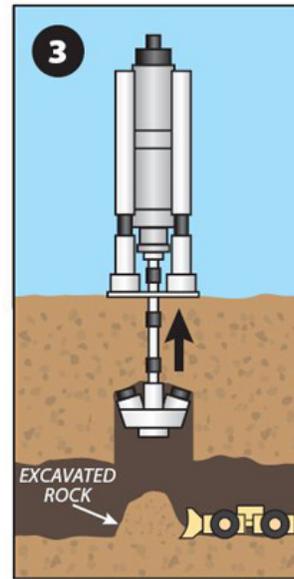
Raise bore process



Working above and below ground, the boring machine drills a pilot hole.



A reamer is attached in place of the drill bit.



As the drill string is raised, it pulls the reamer up. Excavated rock drops down the shaft and is removed eastward via the tunnel and out the Seymour end