



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRECCIONAL APLICACIÓN EN
CRUZAMIENTO SUBFLUVIAL**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

P R E S E N T A :

ING. OMAR ALEJANDRO RAMOS TREJO

DIRECTOR DE TESINA: DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ

CIUDAD DE MÉXICO

FEBRERO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

I. Diseño de la Investigación	3
I.I. Introducción	3
I.II. Planteamiento del Problema	4
I.III. Objetivo General	5
I.III.I. Objetivos Específicos.....	5
I.IV. Justificación	5
I.IV.I. Justificación Práctica	5
I.V. Hipótesis.....	6
II. Qué es la Perforación Horizontal Direccional.....	7
II.I. Antecedentes	8
II.II. Normatividad.....	11
II.III. Procedimiento Constructivo	14
II.IV. Equipo y Maquinaria.....	18
III. Ejemplo Práctico	22
III.I. Descripción del Caso	22
III.II Exploración del Subsuelo y Resultados Obtenidos.....	23
III.II. Metodología del Cálculo	25
III.III. Resultados	32
IV. Conclusiones	35
V. Referencias.....	36

I. Diseño de la Investigación

I.I. Introducción

La demanda de instalación de nuevos sistemas de servicios públicos subterráneos en áreas congestionadas con obra civil o con otras líneas enterradas ha generado la necesidad de desarrollar sistemas innovadores y económicos para no interferir, o hacerlo en la menor medida posible, con las instalaciones existentes. Las primeras perforaciones horizontales (perforación horizontal direccional PHD) datan de principios de siglo en los Estados Unidos y derivaron de proyectos en los que debían tenderse tuberías atravesando infraestructura civil (vías ferroviarias y/o carreteras) o barreras naturales (ríos, zonas pantanosas, áreas de conservación) sin eliminar, interrumpir o hacer cortes a los obstáculos.

La PHD pertenece a las tecnologías sin zanja, que son los procedimientos cuya finalidad es construir, reemplazar o reparar todo tipo de tuberías de pequeño diámetro (alcantarillados, acueductos, redes eléctricas, de comunicaciones, redes de gas natural, entre otras) sin recurrir a cortes a cielo abierto. La PHD ha presentado un notable progreso en el desarrollo de equipos de instalación y métodos de diseño y control, con lo que se han conseguido mayores capacidades en fuerzas de empuje (y por ende mayores longitudes de enterrado), sistemas semi-automáticos de dirección y seguimiento, y la disponibilidad de trabajar con diferentes tipos de tubería. Por desgracia la preparación de los proyectos, el diseño, las especificaciones de construcción, la inspección de procesos, las pruebas de materiales, incluso la formación de ingenieros, no ha seguido el ritmo de estos avances lo que ha dejado a la PHD como algo “ajeno” a la ingeniería y responsabilizando de su ejecución, casi totalmente, al constructor.

El objetivo de esta tesina es exhibir, de manera general, en qué consiste la técnica PHD y cómo se aplica a un caso práctico (cruce subfluvial). Se abordan los lineamientos geotécnicos, los procedimientos y las etapas de ejecución.

La intención es que documentos como este sean de utilidad para las partes involucradas en el desarrollo moderno de comunidades: propietarios, contratistas y autoridades reguladoras.

I.II. Planteamiento del Problema

En los proyectos de líneas de conducción de sustancias peligrosas ¿Qué alternativa puede ser tomada para minimizar las afectaciones provocadas por la construcción de un cruzamiento? ¿Qué consecuencias acarrea esto? ¿Cuáles deben ser los lineamientos técnicos de esa alternativa? ¿Qué tipo de información se requiere para ejecutarlas y como debe ser analizada?

El problema al que nos enfrentamos es, fundamentalmente, un problema de información. En nuestro país la introducción de este procedimiento ha sido lenta y justificamos esta aseveración a partir de la revisión de las referencias bibliográficas en nuestro idioma, las cuales son mínimas. En este trabajo se espera contribuir a salvar esta insuficiencia desde la perspectiva geotécnica.

I.III. Objetivo General

Analizar la técnica constructiva de la Perforación Horizontal Direccional en su aplicación a la construcción de cruces de líneas de conducción de sustancias peligrosas.

I.III.I. Objetivos Específicos

- Conocer los aspectos técnicos que sustentan al procedimiento de Perforación Horizontal Direccional.
- Presentar la normatividad existente relacionada con la técnica de PHD.
- Mediante un caso práctico, ejemplificar la aplicación de los criterios geotécnicos referentes a la técnica de PHD para resolver el problema planteado por un cruzamiento subfluvial.

I.IV. Justificación

La investigación muestra las consideraciones técnicas de la PHD y busca crear conciencia sobre la necesidad de generar referencias de utilidad para el profesionalista nacional.

I.IV.I. Justificación Práctica

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, ésta permitirá conocer las consideraciones técnicas para ejecutar la PHD de modo que represente una solución acertada para la construcción de cruzamientos en líneas de conducción de sustancias peligrosas.

I.V. Hipótesis

Una empresa distribuidora de sustancias peligrosas, conducidas por tubería, realizará la modificación de una Línea de Distribución en el Estado de México. Dentro de los trabajos que implica se encuentra salvar obstáculos i) canal y ii) carretera. Debido a las condiciones que presenta el canal (geometría-dimensiones) y los suelos (arcillas muy blandas/compresibles) que le rodean, la Gerencia de Ingeniería de la mencionada Compañía ha determinado que tender la línea de conducción en este punto mediante a) excavación a cielo abierto, b) construcción de un puente móvil o c) rodear el cuerpo de agua no son opciones viables, por lo que ha considerado la ejecución de la técnica PHD para resolver el cruce con el obstáculo canal (llamado aquí ***cruce subfluvial***).

II. Qué es la Perforación Horizontal Direccional

La Perforación Horizontal Direccional (PHD) es una técnica de construcción de reciente aplicación que posibilita la instalación subterránea de infraestructura de servicios sin la necesidad de realizar zanjas cuando, por requerimientos del proyecto geométrico del trazo de la línea de conducción, se deben salvar cruces con diversos obstáculos, ya sean naturales (ríos, áreas ecológicas o de protección, zonas pantanosas de difícil acceso, etcétera) o artificiales, es decir, creados por el hombre (vías de comunicación en tierra y núcleos urbanos).

Las principales ventajas relacionadas a la aplicación de esta técnica comprenden: un impacto ambiental prácticamente nulo; la posibilidad de realizar cruces en cauces de ríos y vías terrestres de comunicación sin afectar las condiciones de flujo, servicio y la eliminación de la afectación a la infraestructura existente. La técnica de Perforación Horizontal Direccional comparte ciertas características con la perforación vertical de pozos de agua e hidrocarburos, con la diferencia fundamental de la direccionalidad pues en este proceso la herramienta de ataque o perforación puede ser conducida por el suelo, tanto en la dirección vertical como en la horizontal, siguiendo una trayectoria pre-establecida, definida, entre otras cosas, por el radio de curvatura de la tubería a instalar. Destacan en este proceso que, a diferencia de la perforación vertical, los puntos de entrada y salida están localizados sobre la superficie en ubicaciones distintas. Diferenciándose, a su vez, de la perforación horizontal o tuneleo, por entrar de la superficie y salir a ella, es decir, por no mantenerse a profundidad constante.

El movimiento de perforación generalmente se realiza en un plano vertical que contiene longitudinalmente a la línea de perforación, constituida por la cabeza y la sarta de perforación. Para la ejecución de esta técnica constructiva se hace necesario el empleo de equipo de construcción especializado.

II.1. Antecedentes

En nuestro país como en el mundo, el constante y acelerado crecimiento demográfico aumenta la dificultad de la tarea de satisfacer las necesidades básicas de la sociedad, principalmente en los rubros de servicios de infraestructura y comunicaciones. Para la obtención de esta meta es indispensable la coordinación de diferentes entidades gubernamentales que, desafortunadamente en ocasiones, trabajan a ritmos diferentes, al atender a intereses que poco o nada tienen que ver con el desarrollo del país, generando con esto un crecimiento desordenado de las redes de servicios. La emergente normatividad en materia de protección ambiental prácticamente imposibilita, o en el mejor de los casos dificulta, la ejecución de los proyectos necesarios para cubrir tales servicios, los cuales resultan imprescindibles para toda comunidad que no desee alejarse del proceso de evolución social demandado por los tiempos actuales.

La satisfacción oportuna y adecuada de las necesidades de servicios urbanos, no únicamente en forma, sino en tiempo y costo, requiere, de manera obligada, del empleo de técnicas y procedimientos acordes con el desarrollo tecnológico existente, de lo contrario, todos los esfuerzos serían insuficientes por la gran magnitud de los crecientes requerimientos de la población.

Para atender algunas de las necesidades planteadas, el Gobierno Federal, a través de diferentes entidades paraestatales, tiene como propósito, entre otras actividades, la creación de la infraestructura necesaria. Un ejemplo palpable de este hecho es la construcción de líneas de conducción de hidrocarburos que la entidad paraestatal "Petróleos Mexicanos" (PEMEX) considera dentro de sus programas de desarrollo.

Esta paraestatal señala que "En los próximos años, como consecuencia del desarrollo de nuevos proyectos de transporte se tiene previsto el diseño y construcción de nuevos ductos terrestres, sin olvidar las fases de inspección y mantenimiento para ductos existentes" (*Castro, Guadarrama y Shein-Tiá, Tesis Perforación Horizontal Direccional, México D.F., Octubre 2007*).

- PEMEX (2001 a 2005) Anuario Estadístico México, D F PEMEX
- Hair, Charles W, III (1994) Site Investigations Requirements for Large Diameter HDD Projects Baton Rouge, Louisiana New Advances in Trenchless Technology
- Horizontal Directional Drilling Guidelines Handbook (2002) City of Overland Park, Kansas Department of Public Works
- Barias W Alexander (1999) Overview of Horizontal Directional Drilling for Utility Construction Miami, Florida University of Florida
- Willoughby, D A (2004) Horizontal Directional Drilling Utility and Pipeline Applications USA McGraw-Hill
- Horizontal Directional Drilling Drilling Fluid (2006) KS Straightline o American Society of Civil Engineers (2005) Pipeline Design for Installation by Horizontal Directional Drilling Reston, Virginia, USA ASCE Canadian Association of Petroleum Producers (2004) Planning Horizontal Directional Drilling for Pipeline Construction Calgary & Alberta, Canada CAPP
- American Society of Civil Engineers (2005) Pipeline Design for Installation by Horizontal Directional Drilling Reston, Virginia, USA ASCE)

Durante el proceso del proyecto de trazado de líneas de conducción, se presentan innumerables circunstancias que condicionan el trazo geométrico de la línea en particular. Los problemas fundamentales que se plantean en este tipo de proyectos son cuatro:

- Material del tubo
- Diámetro interior del tubo
- Espesor del tubo
- Trazo

La resolución adecuada de estos problemas depende de la obtención de datos básicos, algunos proporcionados como especificaciones constructivas:

- Naturaleza del fluido a transportar
- Caudal o gasto
- Puntos nodales del trazo (los cuales son los puntos de comienzo, finalización y de paso obligado de la línea de conducción)

El trazo es un aspecto de importancia fundamental en el proyecto de una línea de conducción, de cuya correcta solución dependerá en gran medida el funcionamiento adecuado del proyecto en su conjunto. En el trazo geométrico de las líneas de conducción de hidrocarburos, las decisiones fundamentales que deben hacerse a este respecto son dos: el sitio del cruce y el tipo de cruce, éste influye decisivamente en el costo final del proyecto de la línea de conducción, razón por lo cual las características topográficas, geotécnicas e hidrológicas deben ser estudiadas a detalle en una amplia zona (conocida como zona de influencia).

En cuanto al tipo de cruce, tradicionalmente se han considerado únicamente dos tipos aéreo y subálveo. El cruce aéreo o en puente se realiza llevando a la línea de conducción por arriba del cuerpo de agua, este cruce puede hacerse básicamente de dos formas distintas

- Utilizando un puente o cualquier tipo de obra existente
- Empleando tubería autoportante en arco o colgada, o con algún tipo de estructura de refuerzo (armaduras)

El otro tipo de cruce, es el cruce subálveo que considera la ejecución de una zanja para el tendido y la instalación de la tubería y su posterior rellenado, complementando estos trabajos la ejecución de las obras adicionales de desvío y canalización del flujo. En este tipo de obras se debe dar especial atención al efecto de arrastre que el agua

ejerce sobre las partículas del lecho del río y la evolución del cauce y de sus márgenes. Para este tipo de cruce, el empleo de la técnica PHD como alternativa al método tradicional de apertura de zanjas, representa verdaderas ventajas, siendo las principales:

- La rápida instalación de la tubería frente al método tradicional
- Al alojarse la tubería por debajo del lecho del río, proporciona una protección segura contra anclajes, dragados y socavaciones
- No altera las condiciones de flujo mientras se realiza el cruce
- Los daños al medio ambiente son mínimos a comparación de los métodos tradicionales

La perforación direccional puede ser utilizada en una gran variedad de circunstancias, sin embargo, no es el método óptimo en todas las condiciones. La formación subterránea de mayor dificultad para cualquier método empleado en la construcción de cruces subálveos son los suelos sueltos (por ejemplo las gravas y boleos), debido a la carencia de cohesión entre sus partículas componentes, lo cual dificulta los procesos de perforación y limita el uso de lodos de perforación, por lo que la presencia de este tipo de suelos impide la aplicación de la técnica PHD.

II.II. Normatividad

Dentro de la industria de la construcción, la ejecución de los diversos procedimientos existentes necesariamente involucra el apego a requerimientos que, en general, se conocen como normas. Desde un punto de vista tecnológico, una norma es una especificación que reglamenta procesos y productos para garantizar la operabilidad. Bajo esta acepción, las normas son documentos técnicos reconocidos por la autoridad, y que son aplicables a múltiples campos, cuya aplicación o cumplimiento es de naturaleza obligada para una determinada actividad o proceso. Las normas también representan seguridad; la ejecución de un proceso constructivo fuera de norma puede representar un elevado riesgo para la persona que ejecuta el proceso (contratista) durante la fase de producción, como para el usuario, en la fase de operación.

En cuanto a la construcción, hay normas de cumplimiento obligado para los aspectos más importantes, los cuales generalmente son estructurales. A este respecto, existen normas que señalan el tratamiento que debe dárseles a las cargas que actúan en las edificaciones y que criterios deben seguirse para revisarlas; otras normas y reglamentos obligan a cumplir ciertas condiciones para las instalaciones, etcétera. En este sentido, cumplir lo establecido en las normas correspondientes, implica una garantía de que sigue un procedimiento comprobado.

Por cuanto se refiere a la PHD, aun no existe en nuestro país un conjunto normativo que regule su operación técnica de manera generalizada probablemente por ser esta técnica relativamente novedosa. Sin embargo, existen algunas regulaciones que intentan normar la construcción de cruces direccionales por cuanto se refiere a sus características generales. Estas regulaciones han sido elaboradas por diferentes entidades: la Secretaría de Energía, la Comisión Federal de Electricidad y Petróleos Mexicanos (Tabla 1, *modificada de Castro, Guadarrama y Shein-Tiá, Tesis Perforación Horizontal Direccional, cap. 2.4. Normatividad, México D.F., Octubre 2007, pág. 2-14*).

- Petróleos Mexicanos (2006) *NORMA NRF-030-PEMEX-2006 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE DUCTOS TERRESTRES PARA TRANSPORTE Y RECOLECCIÓN DE HIDROCARBUROS* Mexico, D F PEMEX.

Tabla 1. NORMAS EXISTENTES EN MÉXICO QUE INVOLUCRAN A LA PHD					
NORMA	NOMBRE	EMISOR	FECHA	TIPO	CAPITULO / SECCIÓN DE LA NORMA
PROY-NOM-012-SECRE-2000	TRANSPORTE DE GAS LP POR DUCTOS DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	SENER	OCTUBRE DE 2001	PROYECTO DE NORMA	6.- DISEÑO 6.5.- OBRAS ESPECIALES 6.5.1.- PROTECCIÓN CONTRA RIESGOS NATURALES 6.5.1.5.- CUANDO EL CRUZAMIENTO BAJO UNA CORRIENTE FLUVIAL SE EFECTÚE MEDIANTE PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRECCIONAL, ESTA DEBE REALIZARSE CON BASE EN LOS RESULTADOS DE MECÁNICA DE SUELOS COMO DE IMPACTO AMBIENTAL, ASIMISMO LA TUBERÍA SE DEBERÁ PROTEGER CONTRA LA ABRASIÓN AL DESPLAZARLA DENTRO DE LA PERFORACIÓN.
CFE-IC	NORMAS DE DISTRIBUCIÓN CONSTRUCCIÓN LÍNEAS SUBTERRÁNEAS	CFE	-	NORMA VIGENTE	3.- CONSTRUCCIÓN 3.3.- OBRA CIVIL 3.3.2.- PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA A) CONDICIONES DEL TERRENO B) FLUIDOS DE PERFORACIÓN C) ADITIVOS PARA FLUIDOS D) PERFORACIÓN E) AMPLIACIÓN EN RETROCESO F) TAPÓN HIDRA LOCK G) RENDIMIENTOS H) DESCRIPCIÓN I) PROCEDIMIENTO 1.- CONDICIONES DE TRABAJO 2.- CONDICIONES DEL SUELO Y SUBSUELO 3) EQUIPOS Y EJECUCIÓN 4) CONDICIONES DE LA SUPERFICIE 5) SEGURIDAD

NORMA	NOMBRE	EMISOR	FECHA	TIPO	CAPITULO / SECCIÓN DE LA NORMA
NFR-030-PEMEX-2006	DISEÑO CONSTRUCCIÓN INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE DUCTOS TERRESTRES PARA TRANSPORTE Y RECOLECCIÓN DE HIDROCARBUROS	PEMEX	FEBRERO DE 2007	NORMA VIGENTE	<p>8.- DESARROLLO 8.1.- DISEÑO 8.1.11.- REQUISITOS ADICIONALES PARA EL DISEÑO 8.1.11.5.- CRUCES 8.1.11.5.1.- CRUZAMIENTO CON RÍOS O CUERPOS DE AGUA</p> <p>LOS CRUZAMIENTOS DE LOS DUCTOS CON RÍOS O CUERPOS DE AGUA REQUIEREN UN ANÁLISIS Y DISEÑO PARA DISIMULAR EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN EN CASO DE FUGA DE HIDROCARBURO. ESTOS CRUZAMIENTOS PUEDEN REALIZARSE DE DOS FORMAS AÉREOS Y SUBFLUVIALES DEBEN USARSE TUBOS LASTRADOS O ANCLAJES CON EL FIN DE GARANTIZAR LA ESTABILIDAD DEL DUCTO (VER SUBINCISO 8.1.8) EL DISEÑADOR DEBE EVALUAR LA NECESIDAD DE INSTALAR DERIVACIONES EN ESTE TIPO DE CRUCES (BY PASS)</p> <p>LOS PRINCIPALES FACTORES QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN CRUCE BAJO EL AGUA SON -VELOCIDAD DE CORRIENTE -TURBULENCIA -SOCAVACIÓN Y AZOLVE -DESPLAZAMIENTO DE RIBERAS -CAMBIOS DE TEMPERATURA -CALADO DE EMBARCACIONES -CORROSIÓN -DRAGADO -FLOTACIÓN -ESTADÍSTICAS DE INCREMENTO DE NIVEL DEBIDO A VARIACIONES CLIMATOLÓGICAS -HISTORIAL DEL CAUCE NATURAL</p> <p>CUANDO SE UTILICE PERFORACIÓN DIRECCIONAL, EL ESPESOR MÍNIMO DE CAPA DE TIERRA DEBE SER 6 m, ENTRE EL FONDO DEL LECHO DEL RÍO Y EL LOMO DE LA TUBERÍA CONDUCTORA, EL ESFUERZO ELÁSTICO GENERADO POR EL RADIO DE CURVATURA NO DEBE EXCEDER EL 54% DEL SYMS, ASIMISMO LA TUBERÍA DEBE TENER DOBLE CAPA DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA ESPECÍFICA PARA ESTE SERVICIO Y CONDICIONES DE EXPOSICIÓN CONFORME A 8.1.10</p>

El surgimiento de esta normatividad se deriva del hecho que en sus procesos de instalación de líneas de conducción, sean éstos de hidrocarburos o de líneas energizadas respectivamente, la técnica PHD representa de forma evidente, una ventaja altamente competitiva, especialmente si se le compara con el método tradicional de apertura de zanjas.

II.III. Procedimiento Constructivo

La perforación dirigida se basa en la realización de un orificio mediante un taladro, este taladro dirigido se denomina “perforación piloto”, por su carácter de ser conducido, y constituye el trazado y camino base, para su posterior ensanchado mediante sucesivos repasos interiores con herramientas tipo fresas, de diámetros progresivamente crecientes.

La perforación se inicia desde una pequeña ranura en la superficie del terreno, en la que se introduce una varilla que en su frente sostiene la cabeza de perforación, de características adecuadas al tipo de suelo que se va a perforar.

El ángulo de incidencia puede oscilar, normalmente y dependiendo de características y condiciones del equipo y del trabajo, entre 8° y 15° respecto a la superficie en donde se coloca la máquina. Mediante los movimientos de empuje y rotación, se van introduciendo varillas, que son roscadas automáticamente unas a otras a medida que va avanzando la perforación, combinando controlada y adecuadamente ambos movimientos, que se proporcionan desde la máquina.

Para facilitar la perforación se utilizan lodos constituidos por la dilución de arcillas bentoníticas, “bentonita”, que son inyectados a alta presión y adecuado caudal, por el interior de las varillas y hasta el cabezal de perforación.

A continuación se describen las actividades en la ejecución de la Perforación Horizontal Dirigida:

- Estudio Previo y Replanteo

La ejecución de una perforación dirigida requiere un previo análisis de las condiciones en que debe realizarse. Se deberán determinar los puntos origen y final del cruce, las curvaturas admisibles y en general cualquier circunstancia del terreno, servicios enterrados, que puedan resultar afectados por la perforación, los condicionantes administrativos por distancias de resguardo a infraestructuras públicas, etc. Con ello se realizará un replanteo en campo para analizar los factores esenciales considerados.

- Perforación Piloto

Se realiza la “perforación piloto” (Figura 1), siguiendo con toda precisión la curva de perforación proyectada. Constituye una fase esencial del trabajo, ya que define la trayectoria de la perforación, que posteriormente se ampliará hasta la sección final que se pretenda.

- Información del seguimiento de la trayectoria de la perforación piloto: inmediatamente tras la cabeza perforadora direccional se instala una sonda emisora de señal. La información proporcionada por esta señal, conocida e interpretada mediante un sistema receptor, permite conocer en todo momento la posición exacta del cabezal perforador. Con lo que el trazado ejecutado queda perfectamente controlado y definido, con un seguimiento continuo.

- Ejecución del trazado proyectado: la adecuada ejecución de la perforación al trazado proyectado, mediante el guiado de la cabeza de perforación, se consigue por continuas y mínimas variaciones de la trayectoria, que se realizan gracias a las pequeñas asimetrías axiales de la configuración del cabezal. La orientación de estas asimetrías, ejecutada por el Técnico Perforador a través de los controles y automatismos de la máquina de perforación, son conocidas en todo momento por medio de la información del sistema de sonda, y permiten corregir periódicamente la dirección que se describe en la perforación así pilotada.

La exactitud de la trayectoria real no dependerá sólo del sistema de guiado, influye determinantemente las condiciones del terreno.

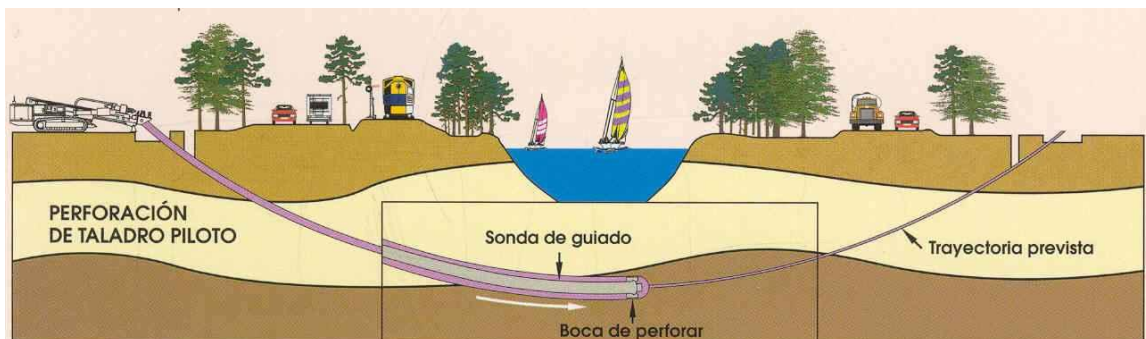


Figura 1. Perforación piloto

(Perphora Tecnología sin Zanja, Procedimiento General Perforación Direccional Horizontal Dirigida (PHD), <http://www.perphora.es/perforacion-dirigida/perforacion-horizontal-dirigida>, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

- Escariado o Ensanche de la perforación

Una vez realizada la perforación piloto, se desmonta el cabezal de perforación y en su lugar se monta un cono escariador para aumentar el diámetro del túnel de la perforación (Figura 2). Este proceso se realiza en sentido inverso, es decir por tracción desde la máquina adicionalmente al giro continuo, con lo que se progresa en el ensanche la perforación anterior hasta alcanzar el diámetro deseado. La repetición

sucesiva de estas operaciones de escariado, con diámetros crecientes, concluye con la tunelación al diámetro deseado.

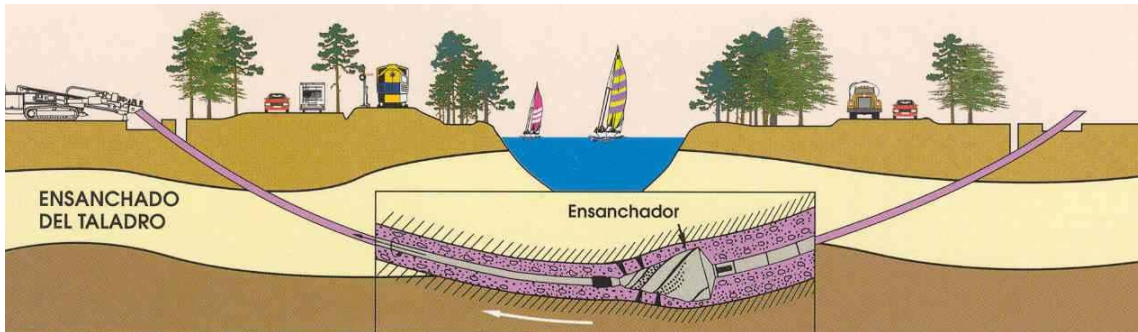


Figura 2. Ensanche del túnel

(Perphora Tecnología sin Zanja, Procedimiento General Perforación Direccional Horizontal Dirigida (PHD), <http://www.perphora.es/perforacion-dirigida/perforacion-horizontal-dirigida>, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

- Instalación de la Tubería

La introducción de la tubería se realiza una vez que el túnel ha sido excavado al diámetro deseado.

Para esta maniobra de instalación de la tubería en la perforación ejecutada, se alinea un tren de tiro para el arrastre de la tubería dentro del túnel ya perforado, arrastre que se realiza mediante el conjunto del varillaje de perforación, y según el siguiente orden:

- A las varillas de perforación se une un cono escariador-ensanchador, normalmente el correspondiente al último diámetro tunelado, el cual girará en su avance hacia la máquina, en un último repaso del túnel en la maniobra de arrastre conjunto para la inmediata introducción de la tubería dentro del propio túnel.

- Tras el escariador se acopla una pieza intermedia, “antigiro”, que es un dispositivo de giro libre, que elimina y no transmite al tubo este movimiento giratorio del varillaje y del escariador anterior a él, con lo que la tubería sólo tiene un movimiento de traslación.

- Finalmente, tras el “antigiro” se engancha a la pieza de tiro. Este enganche se hace mediante una pieza “tirador”, con amarre firme al tubo mediante un sistema de presión.

La maniobra se realiza con arrastre del conjunto desde la máquina de perforación, recogiendo varillas, con lo que el escariador realiza un último repaso del túnel, en giro y avance, seguido inmediatamente del tubo que se instala, en sólo movimiento de traslación, hasta pasar en su totalidad dentro del túnel ejecutado (Figura 3).

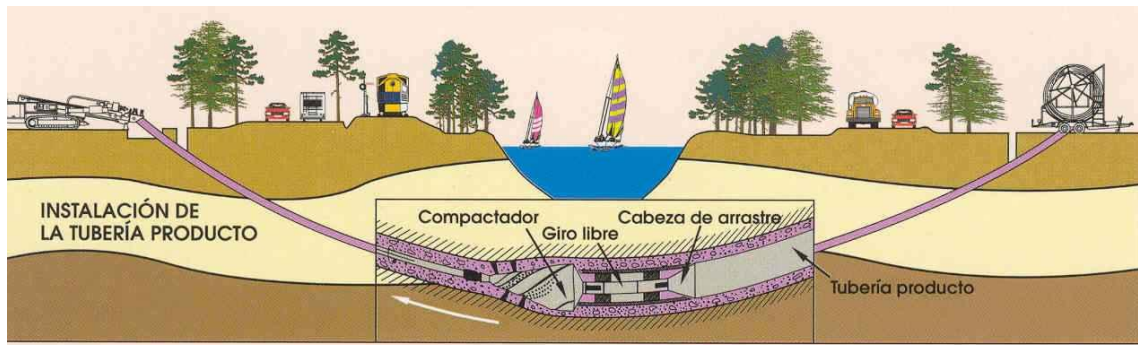


Figura 3. Instalación de la tubería

(Perphora Tecnología sin Zanja, Procedimiento General Perforación Direccional Horizontal Dirigida (PHD), <http://www.perphora.es/perforacion-dirigida/perforacion-horizontal-dirigida>, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

II.IV. Equipo y Maquinaria

Para la ejecución del procedimiento constructivo, al igual que otros procesos especializados, la PHD requiere el empleo de maquinaria y equipo especializado.

El equipo necesario para ejecutar la Perforación Horizontal Direccional generalmente se compone de:

- Máquina de perforación
- Lodo de perforación
- Equipo adicional de apoyo
 - Tanques de mezclado y almacenamiento
 - Bombas de entrega

a) Máquina de perforación

La maquinaria de perforación empleada en la ejecución de la técnica PHD es tan variada al igual que los fabricantes de las mismas. La selección del equipo a emplear estará en función de la tracción necesaria para instalar la tubería en la perforación.

De manera general, todas estas máquinas poseen tres funciones principales: rotación (torque), fuerza de empuje y fuerza de tracción. La clasificación estandarizada de estos equipos normalmente se basa en su capacidad de tracción expresada en libras-fuerza, aunque en algunas ocasiones se hace mayor énfasis en su capacidad de torque, expresada en libras-pie (Tabla 2, *modificada de Castro, Guadarrama y Shein-Tiá, Tesis Perforación Horizontal Direccional, cap. 2.6.1. La máquina de perforación, México D.F., Octubre 2007, pág. 2-59*).

- Willoughby, D. A. (2004). *Horizontal Directional Drilling. Utility and Pipeline Applications. USA:McGraw-Hill.*

Tabla 2. CLASIFICACIÓN DE MÁQUINAS DE PERFORACIÓN			
TAMAÑO	TRACCIÓN / EMPUJE (lbs)	TORQUE (lbs-ft)	BOMBEO (gpm)
PEQUEÑA	HASTA 40,000	HASTA 4,000	HASTA 75
MEDIANA	DE 40,000 A 100,000	DE 4,000 A 20,000	DE 50 A 200
GRANDE	MÁS DE 100,000	MÁS DE 20,000	MÁS DE 200

Los equipos de perforación direccional empleados normalmente son equipos de perforación autopropulsados, montados sobre orugas y que no requieren de mayores

preparaciones para la ejecución de perforaciones más que la localización de los puntos, sobre la superficie de entrada y salida (Figura 4).

Existen dos características esenciales en cualquier tipo de máquina de perforación direccional, la primera es el rack de empuje o impulso, el cual empuja a la sarta de perforación a través del suelo para crear la perforación piloto y posteriormente hala la tubería a instalar a través de la perforación previamente elaborada durante la operación de ensanchamiento.

La segunda característica es el motor y el sistema de para hacer rotar la sarta de perforación y así proporcionar el torque adecuado.

Las capacidades de las máquinas de perforación horizontal varían considerablemente dependiendo del tipo de suelo a través del cual se llevará a cabo el proceso de perforación. De manera general los suelos arcillosos homogéneos son los suelos más favorables para la aplicación de la técnica PHD, en tanto que los suelos arenosos pueden presentar problemas, especialmente si se encuentran debajo del nivel freático. Los suelos gravosos pueden ser muy difíciles de perforar.



Figura 4. Máquina de perforación

(TIMES ASIA, Perforación Horizontal Dirigida VERMEER V200, http://www.asiatimegroup.com/admin/images/product_covers/2014311115234.png, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

b) Lodo de perforación

El lodo de perforación (Figura 5) es un fluido compuesto por agua y un tipo especial de arcilla conocida como bentonita el cual es bombeado a través de la sarta de perforación mientras se ejecuta el proceso de barrenación. Su composición se ajusta conforme cambian las exigencias de la perforación por cuanto a profundidad y naturaleza de los materiales encontrados.

Las principales funciones con las que debe cumplir el lodo de perforación son:

- Estabilizar las paredes de la perforación.
- Enfriar la herramienta de ataque.
- Formar un recubrimiento delgado e impermeable contra la pared de la perforación.
- Remover escombros resultado de la perforación y transportarlos hacia la superficie.
- Soportar parte del peso del taladro.
- Proporcionar potencia hidráulica a la herramienta de perforación.



Figura 5. Lodo de perforación

(https://www.google.com.mx/search?q=Wimpy&bih=770&biw=1600&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjO4LfKn7jRAhXL0FQKHQqECIEQ_AUICSgC#tbn=isch&q=lodo+bentonitico&imgc=Hrjm_WVBkYKQM%3A, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

c) Equipo adicional de apoyo

El equipo adicional de apoyo lo constituye el sistema de mezclado, almacenamiento y bombeo del lodo de perforación.

Los tanques de mezclado y almacenamiento normalmente son de polipropileno. La selección de los tanques adecuados dependerá del tipo de perforación a realizar.

El sistema de bombeo de los lodos de perforación requiere una bomba que trabaje a alta presión con un bajo volumen de lodos (Figura 6 y 7).



Figura 6. Mezclado y almacenamiento de lodos de perforación

(IMC PILOTAJE PROFUNDO SA DE CV, PREPARACIÓN DE BENTONITA PARA PILAS DE CIMENTACIÓN, <https://i.ytimg.com/vi/gS86Jxw5ozE/maxresdefault.jpg>, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)



Figura 7. Bomba de lodos de perforación

(<http://spanish.drillingmudsystem.com/sale-3281296-api-drilling-mud-pump-triplex-single-acting-piston-pump-for-oil-field-drilling.html>, Figura tomada en el mes de octubre de 2016.)

III. Ejemplo Práctico

III.I. Descripción del Caso

El proyecto consiste en la realización de un cambio de dirección en una línea de conducción de hidrocarburos, la cual se encuentra localizada en el Estado de México.

El nuevo trazo tendrá en su mayoría tramos en donde se utilizará el método de excavación por zanja, sin embargo, existe un obstáculo sobre el cual no podemos realizar dicho procedimiento, se trata de un canal con revestimiento de concreto. Para poder atravesarlo con la línea de hidrocarburos utilizaremos el método de perforación direccional horizontal, con el objetivo de no interrumpir su funcionamiento.

Las características del canal son las siguientes:

- Ancho= 43.66 m
- Profundidad del canal = 4 m
- Las elevaciones del terreno natural a ambos lados son iguales

La tubería a instalar es de acero al carbón de 24" Diámetro Nominal (609.60 mm), 8.8 mm espesor de pared.

Se presenta un plano de planta del lugar en donde se desarrollara el ejemplo práctico (Figura 8):

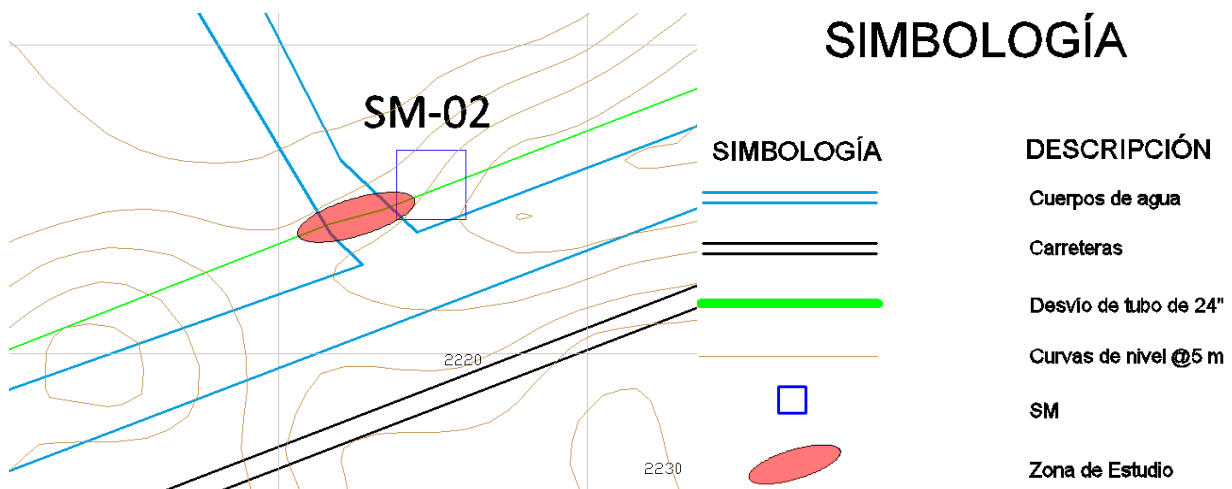


Figura 8. Planta del sitio de interés

III.II Exploración del Subsuelo y Resultados Obtenidos

En el sitio del cruce se efectuó una perforación clasificada como SM-2 en la margen izquierda del canal y con profundidad de 20.00 m.

La estratigrafía del subsuelo definida a partir de los materiales recuperados por el barreno SM-2 mediante el tubo bipartido del penetrómetro consistió en (Figura 9):

- Relleno de tezontle espesores <1.00 m. El nivel freático se localiza entre los 0.50 y 0.90 m.
- Arcilla de color gris verdoso de consistencia muy blanda y alta plasticidad que llega a profundidades hasta 4 m. El contenido de agua es en promedio 150 %. A partir de los 4 m se pueden encontrar arcillas más resistentes de firmes a duras.
- Lente de arena basáltica fina de 30 cm de espesor, localizada a 7.6 m de la superficie.

Siguiendo el procedimiento constructivo, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de los sondeos realizados en el sitio, con los cuales se construyó la siguiente estratigrafía, la cual muestra los primeros 9 metros de profundidad:

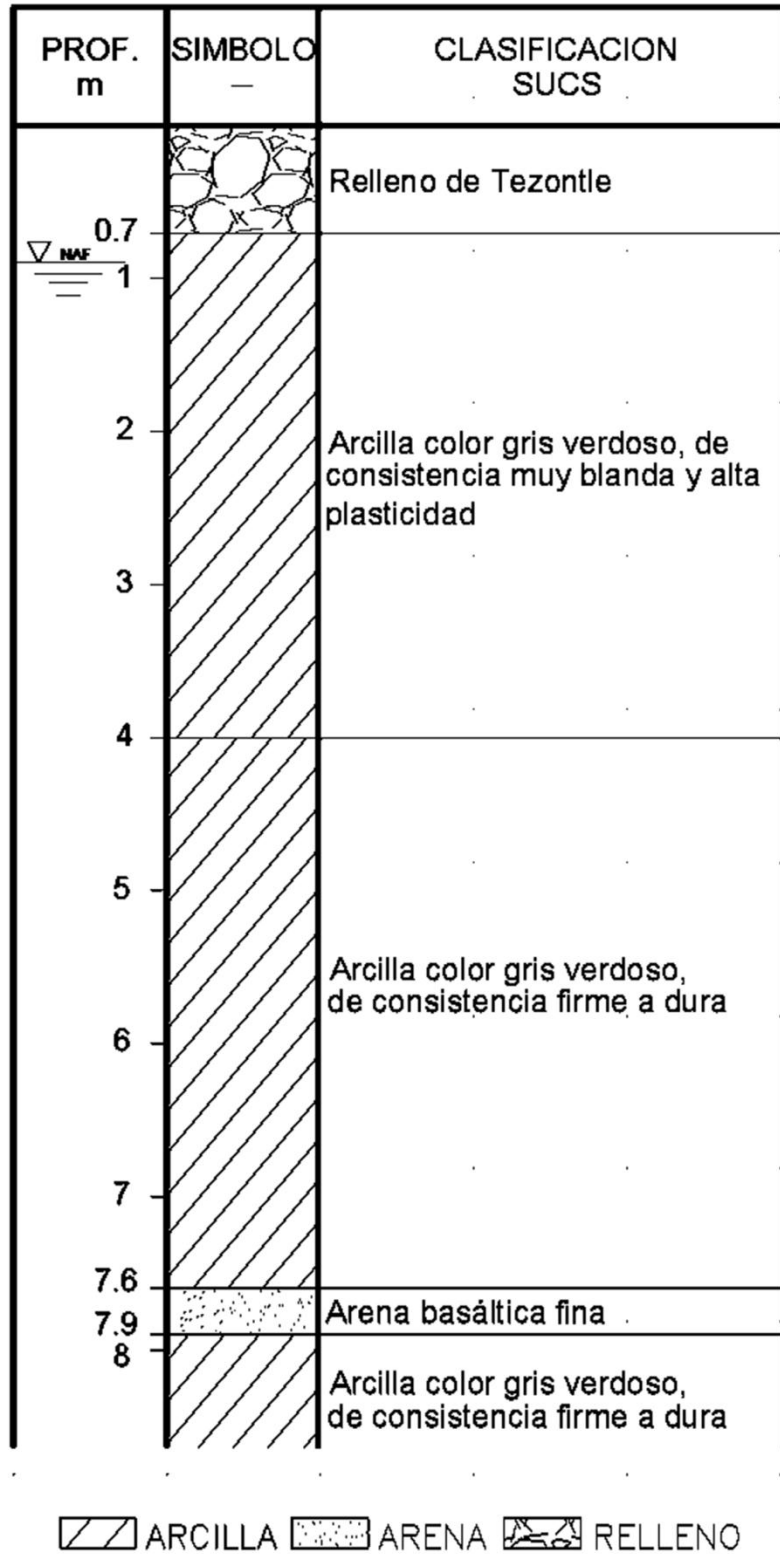


Figura 9. Perfil estratigráfico del sitio

III.II. Metodología del Cálculo

Para determinar la perforación inicial o piloto y la instalación de la tubería se lleva a cabo el desarrollo de las partes del cruzamiento con su ajuste para determinar las rectas inclinadas, las curvas y el ajuste recto horizontal en el centro.

El desarrollo del diseño se lleva a cabo aplicando fórmulas trigonométricas, que emanan de los elementos conocidos o predeterminados, hasta terminar con la definición de la longitud mínima del cruzamiento direccional.

Previo al Pozo Piloto, se diseña el perfil del cruzamiento, de acuerdo a las necesidades del proyecto. Es aquí donde aparece la exigencia de diseñar y definir la longitud del cruzamiento.

En la Figura 10 se muestran los cinco segmentos que constituyen el cruzamiento direccional.

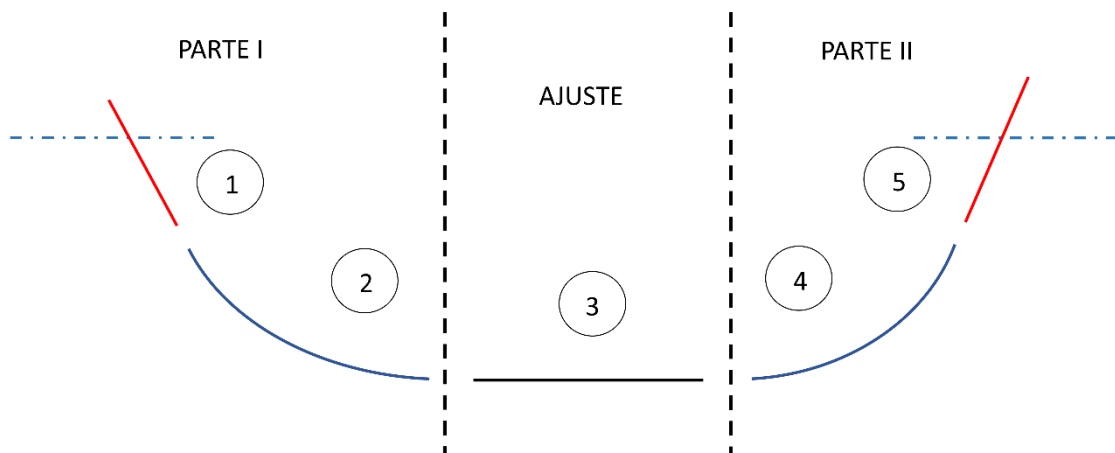


Figura 10. Partes del cruzamiento direccional

Una vez que se identificaron las PARTES, se procede a adaptarlas al proyecto, iniciando con los segmentos de la PARTE I.

Nomenclatura
' : Pies
" : Pulgadas
DN: Diámetro Nominal
DCCA: Directional Crossing Contractors Association
m: Metros
MY: Módulo de Young – En acero al carbón es de 29, 000,000 psi
Psi: Pound per Square Inch (Libras por Pulgada Cuadrada)
r: radio del tubo a instalar que es el DN dividido entre 2, en pulgadas
R: Radio de curvatura del segmento curvo del Cruzamiento Direccional, en Pies.
SMYS: Specified Minimum Yield Stress (Esfuerzo de Cedencia Mínimo Especificado)

En el tema de la profundidad a la cual se instalará el ducto, se propuso un valor de 10m.

Se realiza el cálculo para esta situación y después se presentan los resultados para otras alternativas de profundidad (7.5 y 8 metros), con el objetivo de determinar qué solución es la más viable en cuestión de costo, condiciones del terreno, facilidad de proceso constructivo y mantenimiento.

Otro dato conocido se deriva del parámetro del DN de la tubería a instalar: El radio de curvatura de la porción curva de la PARTE I del direccional. En la industria se utiliza la regla de definir el radio de curvatura en pies, como 100 pies por pulgada de DN.

En este caso:

$$\begin{aligned}100' \times \text{DN}'' &= \text{DN}00' \\100' \times 24'' &= 2400'\end{aligned}$$

La razón primordial de haber llegado a esta regla se relaciona con el esfuerzo ejercido, en lo que respecta a la flexibilidad del tubo a instalar. En este caso se conoce que es un tubo X-52, o de otra forma descrito, el SMYS es de 52,000 psi. La práctica en la industria indica que el tubo debe quedar instalado con un esfuerzo menor al 25% del SMYS. Por lo tanto se desarrolla la siguiente ecuación para determinar el esfuerzo de flexibilidad del tubo:

$$\text{Esfuerzo} = (\text{MY} \times r) / R$$

donde

$$\begin{aligned}\text{MY} &= 29,000,000 \text{ psi} \\r &= \text{DN} / 2 = 24'' / 2 \\R &= (100' \times \text{DN}) \text{ en pies, } (100 \times 24) \text{ pies} \times 12 \text{ para convertir a Pulgadas}\end{aligned}$$

En el ejemplo se traduce a

$$\begin{aligned}\text{Esfuerzo} &= 29,000,000 \times (24 / 2) / ((100 \times 24) \times 12) \\ \text{Esfuerzo} &= 12,083.33 \text{ psi}\end{aligned}$$

es decir

$$\text{Esfuerzo} / \text{SMYS} = 12083.33 / 52000 = 23.2 \% \text{ de SMYS}$$

Se procede a definir de una manera casi-arbitraria, el ángulo de entrada de lo que se ha definido como el segmento recto inclinado de la PARTE I del cruzamiento (Lado Taladro) (Figura 11).

Los lineamientos de la industria vuelven a aparecer como guías para determinar este ángulo: Se recomienda que el ángulo de entrada sea de entre 8° y 20° .

Este rango se relaciona tanto con las capacidades de inclinación de los equipos, las cuales varían dependiendo de la marca, modelo y tamaño del taladro de perforación, así como con las características de profundidad del proyecto.

En el caso práctico se utiliza un ángulo de entrada de 8° .

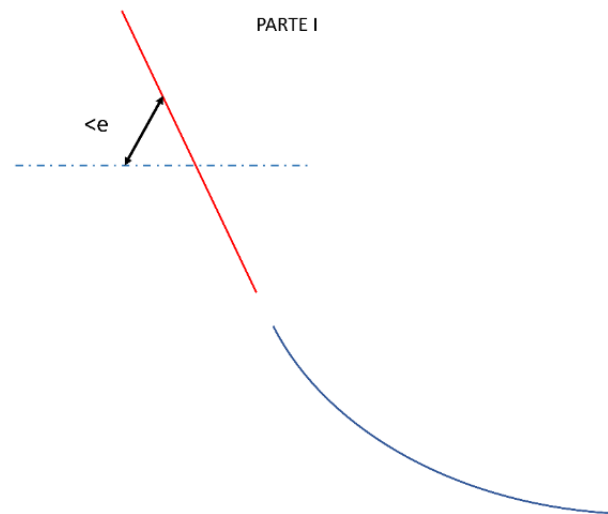


Figura 11. Ángulo de entrada (Lado Taladro).

A continuación (Figura 12) se presenta un esquema que contiene los parámetros y las variables de las ecuaciones que utilizaremos para el cálculo.

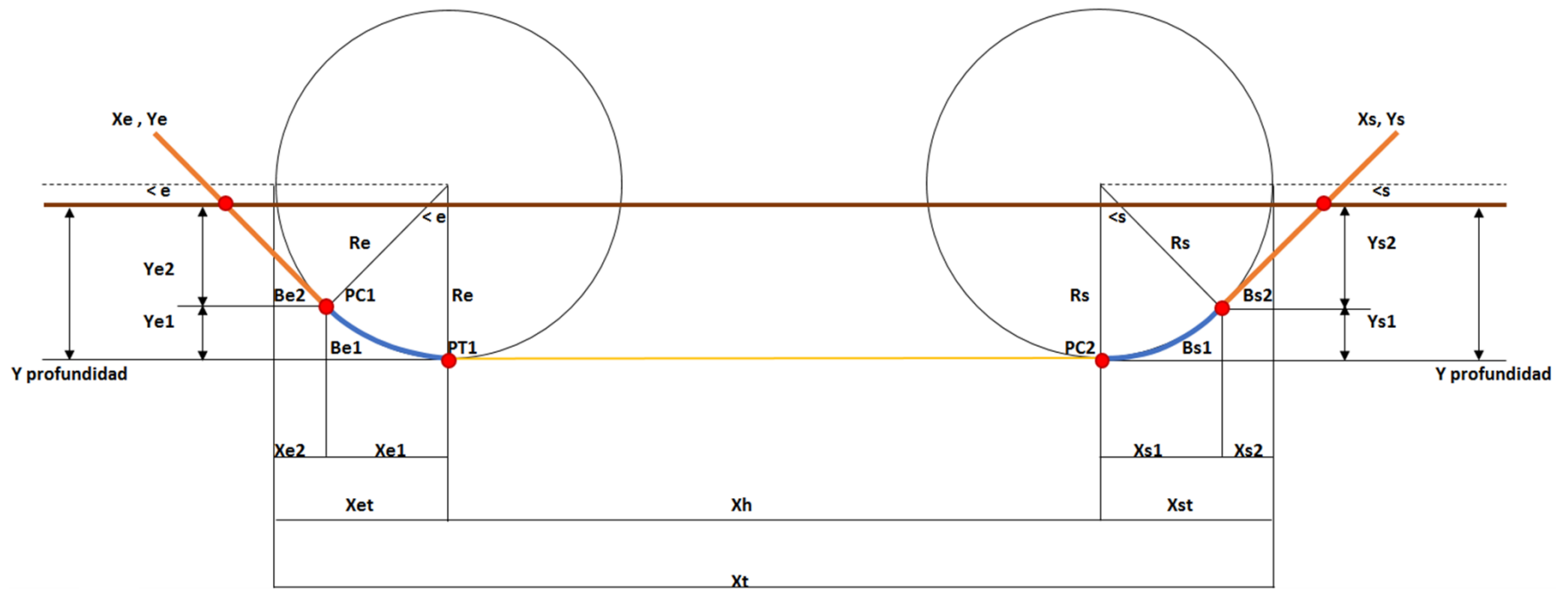


Figura 12. Variables que intervienen en el cálculo

Aplicando fórmulas trigonométricas a la PARTE I de este cruzamiento direccional del canal, con una profundidad aproximada de 10 m., las elevaciones del terreno natural a ambos lados iguales y la tubería a instalar es de acero al carbón de 24" Diámetro Nominal, 8.8 mm espesor de pared, X-52, las variables quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X_{e1} &= R_e * \text{sen } < e \\ X_{e1} &= 2400' * \text{sen } 8^\circ \\ X_{e1} &= 334.02' \\ X_{e1} &= 101.81 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{e1} &= (R_e) (< e * \text{Pi} / 180) \\ B_{e1} &= 2400 * (8^\circ * 3.1416 / 180) \\ B_{e1} &= 335.10' \\ B_{e1} &= 102.14 \text{ m} \end{aligned}$$

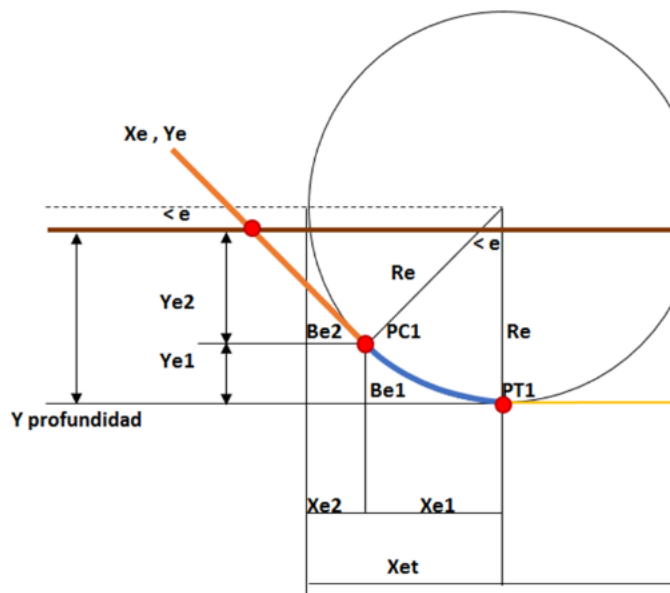
$$\begin{aligned} Y_{e1} &= R_e * (1 - \text{cos } < e) \\ Y_{e1} &= 2400' * (1 - \text{cos } 8^\circ) \\ Y_{e1} &= 23.36' \\ Y_{e1} &= 7.12 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{e2} &= Y \text{ profundidad} - Y_{e1} \\ Y_{e2} &= 10 \text{ m} - 7.12 \text{ m} \\ Y_{e2} &= 2.88 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{e2} &= Y_{e2} / \text{tan } < e \\ X_{e2} &= 2.88 \text{ m} / \text{tan } 8^\circ \\ X_{e2} &= 20.49 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{e2} &= X_{e2} / \text{cos } < e \\ B_{e2} &= 20.49 / \text{cos } 8^\circ \\ B_{e2} &= 20.69 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{et} &= X_{e1} + X_{e2} \\ X_{et} &= 101.81 \text{ m} + 20.49 \text{ m} \\ X_{et} &= 122.3 \text{ m} \end{aligned}$$



Por otro lado, el análisis de la PARTE II del cruzamiento direccional, es decir del lado de la Salida (Lado Lingada), es similar al de la Entrada.

Los lineamientos de la industria vuelven a aparecer como guías para determinar el ángulo de salida: Se recomienda que el ángulo de salida sea de entre 5° y 12° , para minimizar los riesgos de seguridad industrial al “embocar” la tubería a instalar en el túnel.

Más aún, la tubería a instalar se debe de levantar para acoplarse al mismo ángulo con el que se efectuó el Pozo Piloto en el lado de la salida; específicamente, la tubería habrá de levantarse por medios mecánicos a la altura de “acople”, y seguir la curvatura en superficie a lo largo de la lingada, lo cual implica que, entre mayor es el ángulo de salida, mayor es el riesgo en la maniobra del jalado para la instalación de la tubería. En el cruzamiento direccional del canal, margen izquierdo, se considera una profundidad aproximada de 10m., considerando que ambos lados son iguales. Queda definido el ángulo de salida en 5° , lo cual está dentro de los lineamientos de la industria.

La longitud de la PARTE II del cruzamiento direccional arroja lo siguiente:

$$\begin{aligned} X_{s1} &= R_s * \text{sen } \angle s \\ X_{s1} &= 2400' * \text{sen } 5^\circ \\ X_{s1} &= 209.17' \\ X_{s1} &= 63.76 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{s1} &= R_s * (1 - \text{cos } \angle s) \\ Y_{s1} &= 2400' * (1 - \text{cos } 5^\circ) \\ Y_{s1} &= 9.13' \\ Y_{s1} &= 2.78 \text{ m} \end{aligned}$$

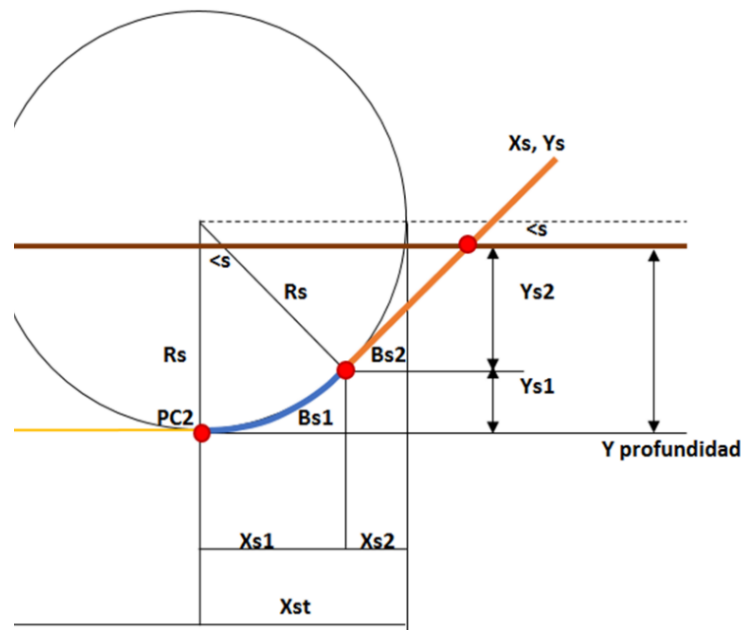
$$\begin{aligned} Y_{s2} &= Y \text{ profundidad} - Y_{s1} \\ Y_{s2} &= 10 \text{ m} - 2.78 \text{ m} \\ Y_{s2} &= 7.22 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{s2} &= Y_{s2} / \text{tan } \angle s \\ X_{s2} &= 7.22 \text{ m} / \text{tan } 5^\circ \\ X_{s2} &= 82.52 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{st} &= X_{s1} + X_{s2} \\ X_{st} &= 67.76 \text{ m} + 82.52 \text{ m} \\ X_{st} &= 150.28 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{s1} &= (R_s) (\angle s * \text{Pi} / 180) \\ B_{s1} &= 2400 * (5^\circ * 3.1416 / 180) \\ B_{s1} &= 209.44' \\ B_{s1} &= 63.84 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{s2} &= X_{s2} / \text{cos } \angle s \\ B_{s2} &= 82.52 / \text{cos } 5^\circ \\ B_{s2} &= 82.83 \text{ m} \end{aligned}$$



De modo que considerando la PARTE I y la PARTE II da como resultado la suma de **269.5 m.**, sin el AJUSTE horizontal.

Como una práctica común en la industria, es la de dejar como AJUSTE horizontal entre las PARTES I y II del cruzamiento direccional, al menos el equivalente de una barra y media de perforación. Esto es con el afán de evitar direccional en curva por una longitud larga, y para proveer de una longitud adecuada para correcciones al momento de estar direccionado. Es prudente recordar que lo diseñado en el papel es afectado en la implementación en campo por elementos en la formación como rocas, cavernas, madera, etc., que desvían a la broca de perforación del trazo de diseño originalmente planeado.

III.III. Resultados

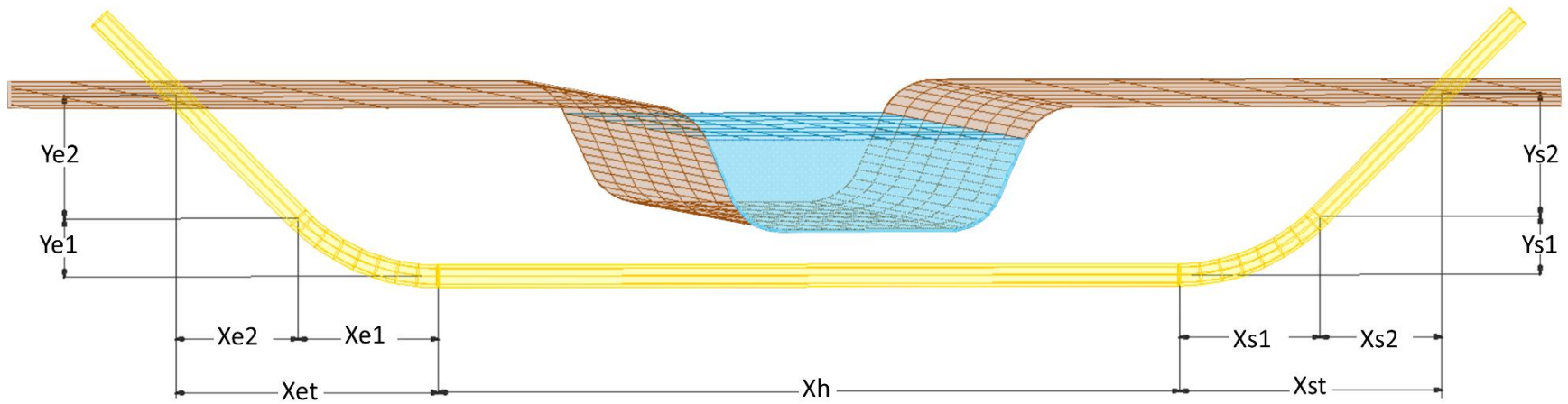


Figura 13. Isométrico de la PHD

DATOS DE LA PERFORACIÓN		
R	731.52 m	
	EN LA ENTRADA (e)	EN LA SALIDA (s)
PROFUNDIDAD (m)	7.5	7.5
GRADO DE CURVATURA (°)	8	5
X1 (m)	101.81	63.76
Y1 (m)	7.12	2.78
Y2 (m)	0.38	4.72
X2 (m)	2.71	53.91
Xt (m)	104.52	117.66
Xh (m)	AJUSTE	
TOTAL INSTALADO	222.83 m	

Tabla 3. Resultados de la PHD para 7.5m de profundidad de la perforación

DATOS DE LA PERFORACIÓN		
R	731.52 m	
	EN LA ENTRADA (e)	EN LA SALIDA (s)
PROFUNDIDAD (m)	8	8
GRADO DE CURVATURA (°)	8	5
X1 (m)	101.81	63.76
Y1 (m)	7.12	2.78
Y2 (m)	0.88	5.22
X2 (m)	6.27	59.62
Xt (m)	108.08	123.38
Xh (m)	AJUSTE	
TOTAL INSTALADO	232.16	

Tabla 4. Resultados de la PHD para 8m de profundidad de la perforación

DATOS DE LA PERFORACIÓN		
R	731.52 m	
	EN LA ENTRADA (e)	EN LA SALIDA (s)
PROFUNDIDAD (m)	10	10
GRADO DE CURVATURA (°)	8	5
X1 (m)	101.81	63.76
Y1 (m)	7.12	2.78
Y2 (m)	2.88	7.22
X2 (m)	20.5	82.48
Xt (m)	122.31	146.24
Xh (m)	AJUSTE	
TOTAL INSTALADO	269.48	

Tabla 5. Resultados de la PHD para 10m de profundidad de la perforación

De acuerdo a los resultados (Tabla 3, 4 y 5), se elige que la propuesta más apropiada para el ejemplo práctico se da utilizando una profundidad de 7.5 m, un ángulo de entrada de 8° y de salida de 5°, esto se determinó debido a que son ángulos pequeños y no se presentarán daños en la tubería, la maquinaria es fácil de conseguir y el espacio para la instalación de la tubería es adecuado.

Esta opción es más viable gracias a que se tiene la menor cantidad de tubería instalada, lo cual representa un ahorro en cuestión económica.

Al realizar trabajos de mantenimiento a la tubería, es más fácil hacerlos a una profundidad menor.

Cabe mencionar que al elegir la profundidad de 7.5 m., no se afectan las condiciones del canal y del tubo por el hecho de que el canal se encuentra revestido y no se presentan problemas de socavación ni azolve, lo cual asegura que no se tendrán problemas de contaminación del cauce y del hidrocarburo transportado.

IV. Conclusiones

La PHD es un método muy ventajoso cuando se tienen que salvar obstáculos cuyo funcionamiento no puede detenerse por medio de métodos tradicionales de tendido (zanja). A diferencia de otros métodos, permite seguir con gran precisión el trazo de proyecto debido a que cuenta con una sonda de guiado en la cabeza de perforación, por lo cual se necesita personal con conocimientos y aptitudes necesarios para el manejo y supervisión de esta práctica.

El impacto al medio ambiente de esta técnica es muy bajo o prácticamente nulo.

Los suelos arcillosos homogéneos (suelos cohesivos) son los más favorables para la aplicación de la Perforación Horizontal Direccional, por otro lado, los suelos arenosos pueden presentar problemas, especialmente si se encuentran debajo del nivel freático y los suelos con gran cantidad de gravas (suelos gravosos) pueden ser muy difíciles de perforar.

Una desventaja o problema de utilizar este método es su costo, sin embargo, es la solución más factible cuando se tienen que librar obstáculos.

V. Referencias

- Castro, Guadarrama y Shein-Tiá, Tesis “Perforación Horizontal Direccional”, México D.F., Octubre 2007.
- García Benítez Silvia Raquel, Direccional Proyecto Notas Claves, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, págs. 7.
- García Benítez Silvia Raquel, Cambio de Trayectoria de la Tubería de acero 24” de diámetro, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, 2016, págs. 34.
- Mínguez Santiago Felicidad, Tesis “Métodos de Excavación Sin Zanjas”, 2015.
- Perphora Tecnología sin Zanja, Procedimiento General Perforación Direccional Horizontal Dirigida (PHD), Tomado de <http://www.perphora.es/perforacion-dirigida/perforacion-horizontal-dirigida> en el mes de octubre de 2016.
- Correa Tello José Humberto, Tesis “Fundamentos de Perforación Direccional”, México D.F., Abril 2009.
- Fernández Marcos y Romero Jorge, Curso Básico de Perforación Direccional, Julio 2003.
- Damián García Domingo, Tesis “Perforación Direccional Para Pozos de Hidrocarburos, Coahuila México, Mayo 2015.