

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Desarrollo de normativa de construcción para aplicar la técnica  
constructiva:**

**Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica**

**Proyecto de Graduación**

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Preparado por:

**José David Rodríguez Arce**

Director del proyecto de graduación:

**Ing. Marcos Rodríguez Mora, M.Sc.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

octubre, 2015

**Comité asesor:**

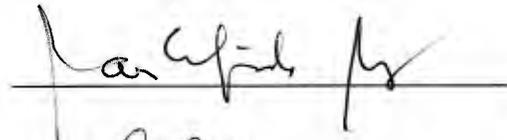
**Director:**

Ing. Marcos Rodríguez Mora, MSc.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. Rodríguez Mora', written over a horizontal line.

**Asesores:**

Ing. Marcos Elizondo Breedy

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Marcos Elizondo Breedy', written over a horizontal line.

Ing. Manuel Martínez Guevara,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Manuel Martínez Guevara', written over a horizontal line.

**Estudiante:**

José David Rodríguez Arce

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'José David Rodríguez Arce', written over a horizontal line.

## **Derechos de autor**

**Fecha:** 08 de octubre de 2015

**El suscrito, José David Rodríguez Arce**, cédula 1-1417-0568, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A85307**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **“Desarrollo de normativa de construcción para aplicar la técnica constructiva: Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica”** bajo la Dirección del Ing. Marcos Rodríguez Mora, MSc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

*"Este esfuerzo va dedicado a mi familia quien siempre estuvo a mi lado en todo este camino y sobre todo a Dios quien es el que te da la fuerza en los momentos más difíciles"*

## **Reconocimiento**

Agradezco de primera mano a mi familia, ya que este logro no pudo haber sido realizado sin el apoyo de cada uno de ellos.

Sin Dios no somos nada, es por esto que le dedico toda mi dedicación a través de estos años a él quien me dio la dicha de tener esta oportunidad de estar en esta gran universidad y de permitirme finalizar mis estudios de manera satisfactoria.

No hay palabras para agradecer la ayuda y el apoyo incondicional a la persona que aunque no tenía el deber, de todas maneras se dedicó por completo a ayudarme en esta ardua tarea, es por esto que para mí don Marcos Elizondo Breedy se ha convertido no sólo en un amigo, sino más bien, en un ejemplo a seguir.

Agradezco a todo el comité de apoyo, al Ing. Marcos Rodríguez por darme la oportunidad de ser su asistente por mucho tiempo y seguir su apoyo hasta finalizar mi carrera, ya que con él vi la oportunidad de desarrollar un tema de tanto interés. Además debo agradecerle al Ing. Manuel Martínez por su apoyo por sus observaciones y palabras de aliento que él siempre tiene para brindar

## Tabla de Contenidos

CAPÍTULO 1. MARCO METODOLÓGICO.....	xiii
1.1. Resumen.....	xii
1.2. Justificación.....	xiii
1.3. El problema en específico. ....	xv
1.4. Importancia.....	xvi
1.5. Antecedentes.....	xvii
1.6. Objetivos.....	xviii
1.6.1. Objetivo general.....	xviii
1.6.2. Objetivos específicos.....	xviii
1.7. Marco Teórico.....	xix
1.7.1. Etapas.....	xx
1.8. Delimitación del problema.....	xxiv
1.8.1. Alcance.....	xxiv
1.8.2. Limitaciones.....	xxvii
CAPÍTULO 2. TRADUCCIÓN DE NORMA ASTM F1926-11 .....	1
2.1. Alcance .....	1
2.2. Documentos de referencia .....	3
2.2.1. ASTM standards .....	3
2.3. Terminología .....	4
2.3.1. Definiciones .....	4
2.4. Investigación preliminar del sitio .....	6
2.4.2. Investigación de superficie (2, 3).....	7
2.4.3. Investigación del subsuelo .....	9

2.5.	Consideraciones de seguridad y medio ambiente .....	14
2.5.1.	Consideraciones generales .....	14
2.5.2.	Ropa de trabajo .....	14
2.5.3.	Prácticas de seguridad en máquinas .....	14
2.5.4.	Efectos de la construcción en sitio .....	16
2.6.	Reglamentos y prevención de daños .....	17
2.6.1.	Consideraciones generales .....	17
2.6.2.	Plan de medio ambiente, salud y seguridad .....	18
2.6.3.	Estudio de impacto ambiental y arqueológico .....	18
2.6.4.	Vías navegables (ver ANSI / EIA / TIA-590).....	18
2.6.5.	Cruces de trenes (ver ANSI / EIA / TIA-590) .....	19
2.7.	Trayectoria de perforación maquetación y diseño.....	19
2.7.1.	Consideraciones generales .....	19
2.7.2.	Restricciones de la dirección y las barras taladro.....	19
2.7.3.	El camino propuesto.....	20
2.7.4.	Trayectoria perfil de ruta de excavación (plano vertical) .....	21
2.8.	Diseño y consideraciones de selección de la tubería .....	23
2.8.1.	Directrices generales .....	23
2.8.2.	Cargas en la tubería .....	24
2.9.	Aplicación.....	39
2.9.1.	La magnitud de la operación típica y complejidad de los equipos.....	39
2.9.2.	Seguimiento y localización .....	40
2.9.3.	Escariado.....	41
2.9.4.	Sujetando la tubería .....	42
2.10.	Inspección y limpieza de sitios.....	44
2.10.1.	Finalización e inspección .....	44

2.10.2.	Limpieza.....	45
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DE NORMAS .....		54
3.1.	Cambios, adaptación y discusión .....	54
3.1.1.	Inspección topográfica .....	55
3.1.2.	Fluido de perforación eliminación .....	56
3.1.3.	Estudio .....	57
3.1.4.	Ropa de trabajo.....	57
3.1.5.	Prácticas de seguridad en máquinas .....	58
3.1.6.	Consideraciones generales.....	59
3.1.7.	Estudio de impacto ambiental y arqueológico .....	60
3.1.8.	Cruces de trenes.....	60
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE EQUIPO Y RECOMENDACIONES.....		62
4.1.	Retroexcavadora .....	62
4.2.	Montacargas, bobcat o similar .....	63
4.3.	Máquina de corte, presión y termofusión en tubos de polietileno.....	64
4.3.1.	Cómo calcular la presión y tiempo de aplanchado: .....	66
4.3.2.	Algoritmo detrás de la aplicación.....	68
4.3.3.	Máquina de electro-fusión .....	69
4.4.	Equipo de localización .....	71
4.5.	Sistemas de mezclas .....	74
4.6.	Perforadora Horizontal Direccional .....	77
4.6.1.	Características físicas de máquina de perforación HDD .....	78
4.7.	Cabezales de perforación.....	79
4.8.	Brocas.....	82
4.9.	Escariador .....	84
4.10.	Procedimientos de montaje y desmontaje .....	85

CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES Y ASPECTOS PRÁCTICOS EN EL MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	88
5.1. Importancia de los estudios preliminares.....	88
5.2. Aspectos prácticos del procedimiento constructivo de Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica.....	90
5.2.1. Acumulación de fluido de perforación .....	91
5.2.2. Cedencia y rompimiento de la tubería dentro de la perforación.....	92
5.2.3. Inserción de tubería que se va a colocar en tubería existente.....	92
5.2.4. Falla de barra de perforación .....	93
5.2.5. Entrabamiento de la cabeza escariadora en suelo o roca.....	94
CAPÍTULO 6. DETERMINACIÓN DE COSTOS.....	95
6.1. Introducción .....	95
6.2. Costos de colocación de tubería con la Perforación Horizontal Direccional .....	95
6.2.1. Descripción de los proyectos .....	96
6.3. Duración de la perforación en Costa Rica .....	102
6.4. Costos de colocación de tubería por medio de método tradicional .....	103
6.5. Análisis de Resultados .....	107
6.6. Limitaciones .....	108
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
7.1. Conclusiones .....	110
7.2. Recomendaciones .....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

## Índice de Figuras

Figura 1. Método de penetración de la Máquina Perforadora .....	xx
Figura 2. Ensanchamiento de la perforación .....	xxiii
Figura 3. Etapas de la colocación de tubería .....	xxiv
Figura 4. Área de estudio en la Conducción Potable San Ramón- Palmares.....	xxvii
Figura 5. Diagrama ubicación de parámetros de diseño. ....	6
Figura 6. Factor de compensación de ovalidad.....	27
Figura 7. Retroexcavador.....	63
Figura 8. Montacargas tipo Bobcat.....	64
Figura 9. Máquina de Termofusión TracStar™ 28 .....	65
Figura 10. Ejemplo cálculos app McCalc. ....	67
Figura 11. Equipo de electrofusión.....	71
Figura 12. Equipo de localización .....	72
Figura 13. Diagrama de giro.....	73
Figura 14. Perforadora Horizontal Direccional FDP-32.....	77
Figura 15. Cabeza de perforación. ....	79
Figura 16. Barras de perforación.....	82
Figura 17. Escariador.....	85
Figura 18. Partes de la máquina .....	87
Figura 19. Precio vs ml de perforación .....	100
Figura 20. Comparación de precios. ....	105

## **Índice de Cuadros**

Cuadro 1. Conveniencia y condiciones de suelo para la Perforación Horizontal Direccional..	13
Cuadro 2. Área efectiva del pistón.....	68
Cuadro 3. Características del modelo FDP-32 máquina de Perforación Horizontal Direccional.....	78
Cuadro 4. Metros lineales de construcción para la partida "Cruces bajo autopista Licitación 2014LA-000043-PRI" para las líneas 441.051, 441.052 y 441.053.....	96
Cuadro 5. Costos en colones de construcción de la conducción mediante HDD (Topo), para la licitación 2014LA-000043-PRI.....	97
Cuadro 6. Costos en colones de construcción de la conducción mediante HDD (Topo), para la licitación 2014LA-000077-PRI.....	98
Cuadro 7. Costo por metro lineal de construcción según la de cantidad de metros lineales a ejecutar.....	99
Cuadro 8. Cuadrilla típica para los trabajos con Perforadora Horizontal Direccional.....	103
Cuadro 9. Duración de la Perforación Horizontal Direccional según las licitaciones descritas.....	104
Cuadro 10. Desglose de costos para cuadrilla con zanjeo tradicional.....	104
Cuadro 11. Comparación entre la metodología de zanjeo tradicional y la Perforación Horizontal Direccional.....	106

## **Índice de Cuadros anexo norma**

TABLA X1.1. Módulo aparente de elasticidad y esfuerzo de halado seguro a 73 °F.....	47
TABLA X2.1 Valores de diseño seguro a corto plazo enterrado presurizado de tubería de polietileno.....	53
TABLA X3.1. Presión crítica de colapso sin restricciones HDPE tubería A, B, C a 73 °F....	54

## **Resumen**

Rodríguez Arce, José David

Desarrollo de normativa de construcción para aplicar la técnica constructiva:

Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

J. Rodríguez A., 2015

xxvii, 116, [5]h; ils. col. – 19 refs.

El método de instalación subterránea de tuberías conocido como Perforación Horizontal Direccional (HDD, Horizontal Directional Drilling) es el tema principal de esta tesis. De esta manera, la investigación pretende ser una herramienta para diseñadores y constructores de nuestro país tomando como referencia la norma ASTM F1962 para lograr los objetivos trazados. Asimismo, el autor propone algunas correcciones para ser aplicadas al contexto costarricense.

Se identifican problemas comunes en la aplicación de la HDD los cuales se estudiaron mediante la observación en visitas de campo y entrevistas. Estos problemas son descritos y se sugieren métodos tanto preventivos como correctivos. Uno de los factores de éxito de la HDD es el buen uso que se le dé al equipo de perforación. Es por eso que se añadió información actualizada y completa de los componentes de estos equipos, así como su manejo, aplicaciones y mantenimiento.

Se incluye una comparación de costos entre las tuberías instaladas con la técnica constructiva de Perforación Horizontal Direccional y las instaladas mediante el zanjeo tradicional. Se busca que la conveniencia de utilizar esta tecnología se refleje en la comparación anterior con el fin de que el lector tenga una idea de los beneficios que representa y asuma de manera integral, las características del proyecto. J.D.R

ZANJEO TRADICIONAL, TUBERÍAS SUBTERRÁNEAS, EQUIPO DE PERFORACIÓN,  
PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRECCIONAL

Ing. Marcos Rodríguez Mora, M.Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

## **CAPÍTULO 1. MARCO METODOLÓGICO**

### **1.1. Justificación**

El sistema constructivo Perforación Horizontal Direccional es poco conocido, esto genera un vacío en el conocimiento técnico y práctico de su aplicación.

La implementación de nuevas técnicas constructivas ayuda al crecimiento tecnológico pero para poder utilizarlas provechosamente, se deben conocer sus ventajas y desventajas. Dado que, si queremos hacer un uso ingenieril del sistema constructivo de Perforación Horizontal Direccional, es nuestro deber conocer tanto lo negativo como lo positivo que pueda acarrear su implementación.

Ahora bien, el sistema constructivo Perforación Horizontal Direccional posee una de las ventajas más buscadas en el campo de la ingeniería, evitar la destrucción. Con esta tecnología se trabaja directamente bajo la superficie del terreno, se hacen perforaciones controladas en puntos específicos sin tener que hacer zanjeo para colocar tuberías. Esta ventaja es de gran ayuda en muchos ámbitos, por ejemplo, en el área de pavimentos, ya que si se requiere colocar una tubería bajo cualquier tipo de calzada, sea asfalto o concreto, no será necesario romper la totalidad de la superficie en la que se vaya a instalar la tubería subterránea, simplemente se hacen algunas perforaciones controladas las cuales pueden ser fácilmente resanadas.

En el caso de Costa Rica, los materiales preferidos para relleno de zanja, como el lastre, son muy costosos. Por ejemplo, en mayo del 2014 la página [www.centralamericadata.com](http://www.centralamericadata.com) asegura que en Costa Rica el costo del cemento y sus derivados representa el 30% del costo total de una construcción de lujo y hasta un 50% en construcciones de acabado medio o de interés popular. Así que, evitar su uso reduce el costo final de los trabajos. Por otra parte, la calidad final y vida útil del acabado del pavimento no sufre el usual deterioro que sí ocurre en instalaciones con apertura de zanja, en las cuales los trabajos de reposición de pavimentos, frecuentemente, tienen una calidad y durabilidad menor.

Otro beneficio económico del uso de esta tecnología es la reducción en las interrupciones en el tráfico vehicular en la zona de trabajo. Lo cual se contrapone a tecnologías tradicionales de instalación en donde hay que realizar excavaciones y rellenos acompañados de costosos reordenamientos temporales del flujo de automóviles. En nuestro país, donde hay una red vial desbordada por la flota vehicular, este es un punto muy importante.

Otro punto importante para Costa Rica es el cuidado del medio ambiente, por tal motivo, los procesos constructivos deben mitigar las prácticas que generen contaminación. El sistema constructivo Perforación Horizontal Direccional tiene la ventaja del ahorro de materiales, tal es el caso del asfalto o concreto, el cual debe usarse en grandes cantidades en caso de hacer un zanjeo para colocar tubería. Por ejemplo, una planta productora de asfalto que genere trescientas doce mil toneladas de su producto al año produce setenta y seis mil kilogramos de contaminantes gaseosos por año, y por ende, se convierte en una de las principales fuentes de contaminación según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, E.P.A por sus siglas en inglés. Se evita la destrucción de las calles para la colocación de tubería, se puede evitar el consumo innecesario de asfalto y tener una herramienta más para el cuidado del medio ambiente.

Si bien, en los últimos 20 años se ha desarrollado una metodología constructiva para la Perforación Horizontal Direccional, existe un vacío en nuestro país relacionado con los protocolos y prácticas para los estudios previos, el diseño de las instalaciones, el control de la aplicación y la inspección en sitio de este sistema. El presente trabajo tiene como objetivo llenar ese vacío al tiempo que facilita un documento técnico que sirve de apoyo a los especificadores de proyectos, a las empresas, y a los inspectores que deben velar por el cumplimiento constructivo óptimo y de calidad de los trabajos. Se trata de un documento que sirva de base para una futura normativa nacional que regule este novedoso procedimiento constructivo.

## **1.2. El problema en específico.**

1. Costa Rica no cuenta con un documento regulador para la instalación de tuberías que use el sistema constructivo Perforación Horizontal Direccional. Actualmente, la inspección y aplicación del método son sólo regulados por el fabricante de la máquina perforadora y los suplidores de ayudas de proceso, lo cual resulta insuficiente desde el punto de vista ingenieril.
2. Existen, a nivel internacional, normas y técnicas acerca de los equipos de perforación de esta nueva tecnología, pero no siempre tienen la validez para regular su uso en nuestro país, pues no están adaptadas a este contexto específico. En este momento, la homologación de algunas de esas normas está apenas iniciándose en el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO)
3. Los inspectores de la metodología de la HDD no cuentan con algún documento de carácter nacional en el cual apoyarse. Así que, cuando se presenta una situación en la que existen problemas, los inspectores no tienen ningún fundamento teórico con el cual puedan resolver o rechazar alguna medida brindada por parte del constructor. La necesidad de brindar un documento en el cual se puedan basar para tomar las medidas respectivas ante situaciones críticas en el procedimiento es imprescindible.
4. Un documento en el cual se norme y especifique tanto el sistema constructivo, como las pautas para su respectiva inspección de proceso, no sólo puede asegurar mejores obras, sino que puede incentivar la inversión por parte de empresas constructoras nacionales para utilizar este método. Debido a su bajo costo en mano de obra, la no destrucción de elementos superficiales como el asfalto y facilidad de empleo. Esta Inversión haría expandir el mercado de la colocación de tuberías y aumentaría la competencia que mejore la calidad y precio por parte de las empresas constructoras.
5. En Costa Rica, actualmente, sólo existen dos empresas que logran este tipo de construcciones con la nueva metodología constructiva, se trata de la empresa Fernández Vaglio y Proyectos Turbina. Debido al mínimo mercado que encontramos en el país para desarrollar y ofrecer proyectos con tecnología, se fundamenta la importancia de abrir mercados de competencia.

#### **1.4. Importancia**

La trascendencia del presente trabajo de investigación radica en la necesidad de que exista un documento regulador del sistema constructivo Perforación Horizontal Direccional. Un documento que contenga todas las técnicas necesarias para brindar un producto de calidad. De este modo, se logre facilitar el trabajo de inspección y atraer la inversión tecnológica al abrir el mercado de competencia. Se pretende con el presente trabajo, brindar ese documento que funcione como base para una futura normativa nacional que regule la aplicación de este novedoso sistema. Otro de los aportes de esta información es promover la innovación tecnológica en nuestro país.

EL HDD es un sistema "Trenchless" (sin apertura de zanja) que cuenta con los siguientes beneficios:

- Mínimo rompimiento de carreteras: Cuando se emplean métodos tradicionales de instalación de tuberías mediante excavación y relleno de zanjas, es casi inevitable el deterioro por hundimiento, desprendimiento o agrietamiento del pavimento. Estos problemas no se presentan al utilizar la HDD. Por lo que, es una tecnología con la cual todas las partes salen gananciosas, ya que sólo utiliza ventanas de exploración que no tienen un tamaño importante en contraposición con las zanjas a cielo abierto.
- Evasión de zanjeo en cruce de pasos fluidales: Con este sistema se evita el zanjeo que siempre resulta difícil de realizar en ríos, mares, mantos acuíferos, entre otros; así como, la construcción de costosos puentes aéreos.
- Bajo en costos por mano de obra: Con un rendimiento optimizado del HDD, se ahorra más que con el sistema tradicional. Sus gastos principales son la máquina, sus accesorios, el mantenimiento y el operario.

## **1.5. Antecedentes**

En julio del 2010 la empresa Vermeer Centro América presentó los fundamentos y técnicas de la Perforación Horizontal Dirigida mediante un curso de dos días realizado en el Double Tree – Hilton de Cariari en San José, Costa Rica. Los puntos tratados en ese seminario fueron:

- Aplicaciones
- Limitaciones
- Fluidos de perforación
- Sistemas de vacío para succión de fluidos

El seminario incluía la visita a uno de los proyectos que desarrolla el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), por medio de un contratista de la institución.

Éste curso fue de gran ayuda, ya que capacitó a los participantes en el uso de éste sistema, pero su gran deficiencia es el alcance de la actividad. Las personas que no pudieron asistir, dado que la entrada al evento se otorgaba por invitación, permanecen en el desconocimiento de la información. De igual manera, el curso fue promovido por un fabricante particular que responde a sus propios intereses. Por lo que, el impacto de la actividad es poco, en comparación a si hubiera sido de carácter público.

La Universidad de Costa Rica, como unidad impulsora de innovación, tiene el deber de brindar el conocimiento general a todos aquellos interesados en el tema. El objetivo de esa acción es compartir una información de utilidad como la que se presenta en los aportes de esta investigación.

## **1.6. Objetivos**

### ***1.6.1. Objetivo general***

- Preparar un documento técnico que sirva como base de una normativa nacional para aplicar la Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica y como difusor darla a conocer al mercado nacional.

### ***1.6.2. Objetivos específicos***

- Traducir al español la normativa internacional estadounidense para este sistema constructivo.
- Analizar la posible adaptación de la normativa internacional ASTM F1962-11 existentes en el mercado costarricense y sus respectivas modificaciones.
- Dar a conocer las características del equipo, sus partes, uso y mantenimiento más común actualmente, según lo que se observa en el mercado nacional para la colocación de tubería mediante el método constructivo Perforación Horizontal Direccional.
- Determinar algunos de los problemas más comunes que puedan ocurrir durante la colocación de tubería con el método constructivo Perforación Horizontal Direccional, así como sus respectivas soluciones y recomendaciones.
- Divulgar la importancia de los estudios preliminares en el método constructivo Perforación Horizontal Direccional
- Comparar el método tradicional de zanjeo a cielo abierto con el método Perforación Horizontal Direccional mediante una determinación de costos.

## 1.7. Marco Teórico

La Perforación Horizontal Direccional (PHD, o "HDD" en inglés, como se encuentra frecuentemente en la literatura técnica disponible) es una técnica de construcción de reciente desarrollo que posibilita la instalación subterránea de infraestructura de servicios sin la necesidad de realizar zanjas. Su uso es ideal cuando por requerimientos del proyecto geométrico del trazo de la línea de conducción, se deben salvar cruces con diversos obstáculos naturales como ríos, áreas ecológicas o de protección, zonas pantanosas de difícil acceso; o artificiales, entre otras. Asimismo, si se tiene la Máquina se ahorra tiempo y recursos, por lo que se reduce el personal de zanjeo y se utiliza únicamente personal especializado.

Esta tecnología tiene su origen en la tradicional perforación de pozos, la diferencia con esa técnica anterior radica en que en la Perforación Horizontal el movimiento de perforación, en la mayoría de los casos, se realiza en un plano vertical que contiene longitudinalmente a la línea de perforación, constituida por la cabeza y el equipo de perforación como se puede observar en la figura 1. Para la ejecución de esta técnica constructiva es necesario el empleo de equipo de construcción especializado.

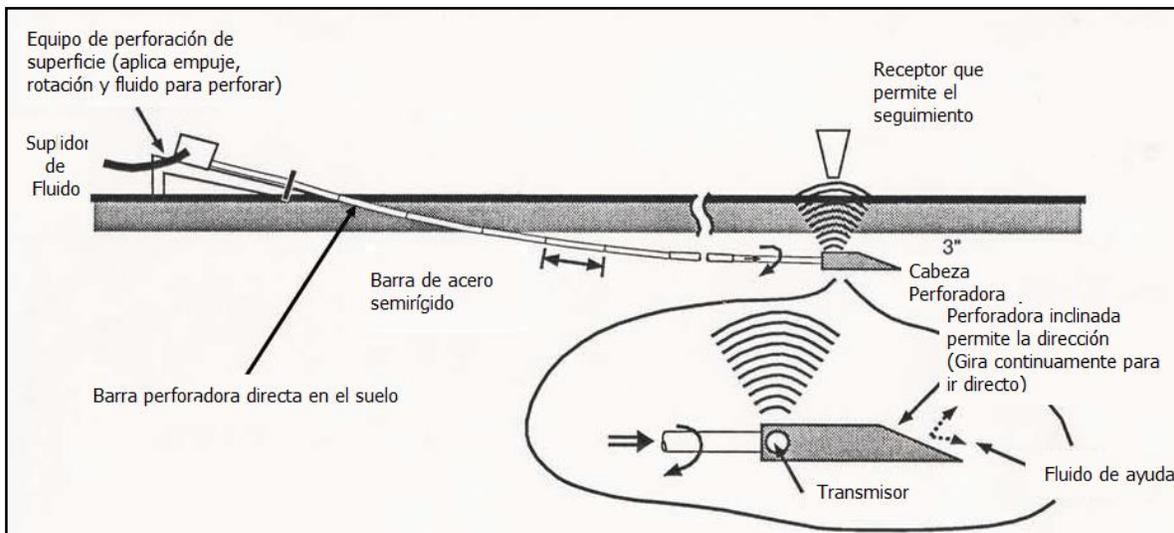


Figura 1. Método de penetración de la Máquina Perforadora

Fuente: Vermeer (modificado por autor), 2014

### **1.7.1. Etapas**

- Exploración preliminar:

Se debe tener una idea de las condiciones físicas del lugar donde se va a hacer uso de la técnica, para esto se debe hacer un modelo geotécnico, que abarque la parte superficial y subterránea.

Se debe tener presente que no basta con el levantamiento topográfico, sino que se necesita tener conocimiento de la existencia de rocas y mantos acuíferos que pueden contener en el suelo del entorno donde se va a hacer la perforación. Además, se debe hacer el trazo por donde debe pasar la tubería a colocar.

Los aspectos específicos constructivos en los que se necesita esta información son, por ejemplo, corte de las formaciones del suelo y lodos que lo integran, para así tener una mezcla capaz de fluir; el mantenimiento continuo de las paredes y cortes para la estabilidad de la penetración.

Respecto a los parámetros del suelo, para poder establecer sus características de comportamiento, se puede considerar 4 grandes rubros:

1. Los principales parámetros requeridos para la clasificación cualitativa son obtenidos de las pruebas que permiten determinar las propiedades índices, peso volumétrico, contenido de agua y límites de consistencia. Además, se requiere de los resultados de las pruebas de los parámetros de resistencia que el material en el sitio exhiba. Estos últimos pueden determinarse mediante correlaciones con la prueba de penetración estándar cuando ésta sea aplicable. Otro factor clave para clasificar a los suelos (especialmente suelos gruesos), lo constituye la distribución granulométrica de sus partículas que puede ser determinada mediante un análisis granulométrico. En el caso de materiales pétreos, las propiedades índice necesarias para caracterizar cualitativamente al material son peso volumétrico, dureza y su condición *in situ* determinada.

2. Se debe determinar la resistencia de las rocas y las arcillas, para medir la fuerza y aceptación con que la máquina pueda desempeñarse durante su labor.

3. Las deformaciones que puedan presentarse que sean elásticas (inmediatas) o debidas a un proceso de consolidación (diferidas), pueden ser establecidas a través de varias técnicas numéricas especificadas y descritas en la norma ASTM 1962-11.

4. Se deberá dar especial atención al efecto de flotación que pudiera presentar la tubería durante el proceso de instalación, por lo que es imprescindible la consideración de las aguas freáticas en los análisis numéricos de la etapa de proyecto.

- Exploración Piloto

La segunda etapa en el proceso de ejecución de la técnica PHD la constituye la perforación inicial. Esta perforación se realiza mediante el empleo de un equipo de perforación, como se aprecia en la figura 1, que incluye a la maquinaria y los accesorios correspondientes (herramientas de ataque, lodos de perforación y equipo complementario). El equipo de perforación es colocado en el sitio donde se iniciará, también llamado punto de entrada.

La perforación inicial o piloto debe efectuarse a todo lo largo de la ruta especificada en el proyecto. Se debe, frecuentemente, verificar el rumbo de la misma mediante el empleo de una sonda situada cerca de la cabeza de perforación. Se ejecuta mediante el empleo de herramientas adecuadas para penetrar al suelo. Una gran variedad de herramientas de ataque pueden ser usadas para tal fin, su elección dependerá de las condiciones geotécnicas predominantes, es decir las condiciones del suelo.

- Ensanchamiento de la perforación inicial

Una vez alcanzado el punto de salida, la cabeza de perforación se remueve de la perforadora y en su lugar se coloca un ensanchador cuya función es agrandar el diámetro de la perforación inicial. De esta manera, el diámetro será halado por la máquina como se puede apreciar en la figura 2. Este ensanchador, también, puede ser empujado por la maquinaria si es necesario realizar varios procesos de agrandamiento de la perforación. Esta etapa puede ser omitida si el diámetro de la tubería a colocar es menor que el de la barra perforadora de la máquina.

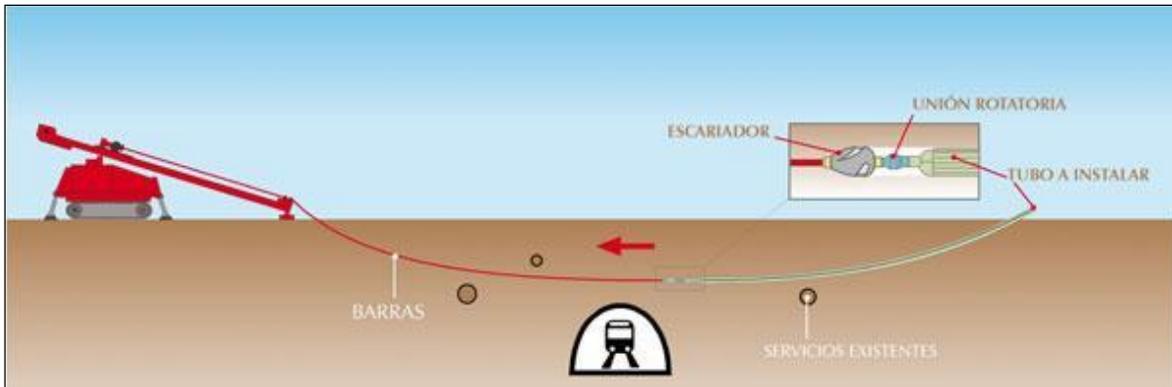


Figura 2. Ensanchamiento de la perforación

Fuente: [www.lasperforaciones.com](http://www.lasperforaciones.com)

- Instalación de la tubería
- Una vez lista la perforación, la máquina arrastra de regreso el tubo que va a colocarse. A pesar de que el tubo va a estar rodeado de fluidos los cuales ayudan al acomodo de la misma, se ve afectado por tres factores que son la Tensión, la flexión y la presión interna. Los tres son influenciados por la fricción generada entre las paredes de la cavidad y la tubería, aunado al peso mismo de la tubería.
- Una vez terminadas las etapas se puede concluir con éxito la colocación de éste tramo de tubería. En la figura 3 se pueden apreciar las 3 etapas juntas:

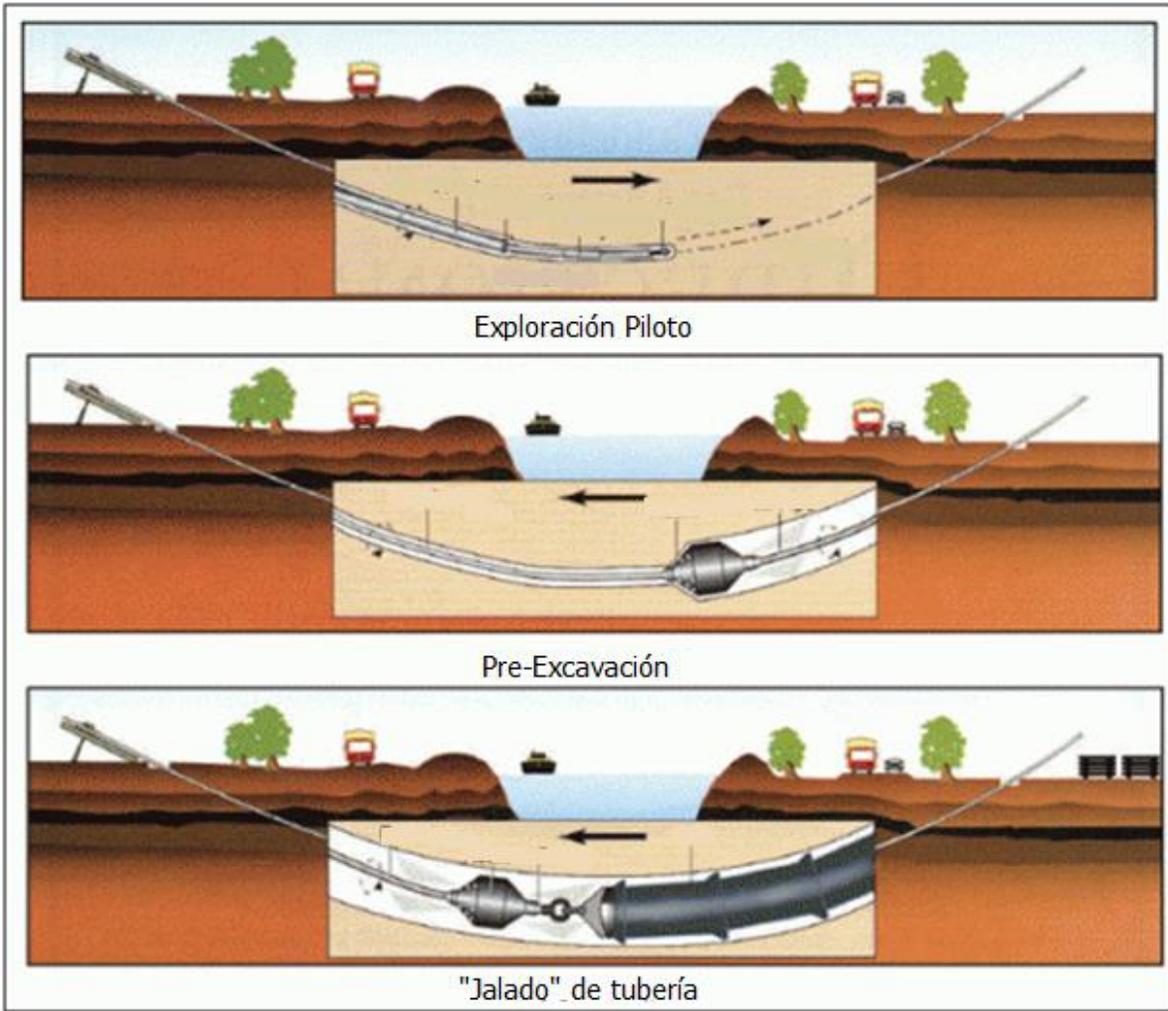


Figura 3. Etapas de la colocación de tubería

Fuente: [www.lasperforaciones.com](http://www.lasperforaciones.com) (modificado por autor, 2014)

## **1.8. Delimitación del problema**

### ***1.8.1. Alcance***

Es importante que Costa Rica conozca acerca del método constructivo Perforación Direccional Horizontal para que Ingenieros, operarios, empresas, municipios y las personas involucradas en las actividades afines a la construcción tengan acceso a información completa sobre este novedoso sistema. Por tal motivo, se pretende preparar un documento que sirva como base para una futura normativa que establezca los parámetros para el empleo de éste método de construcción.

El documento pretende adaptar normativas internacionales a nuestro país y dar seguimiento a un caso presente en Costa Rica. Se encuentra ubicado, específicamente, en la Conducción Potable de la Ruta San Ramón-San Carlos. Asimismo, el documento hace una comparación y análisis entre las técnicas utilizadas dentro y fuera de nuestro país.

Mediante el análisis de la información de la normativa internacional, los documentos nacionales y la observación de estudio, se busca ofrecer recomendaciones en el uso de la Perforación Horizontal Direccional en nuestro país.

Del mismo modo, se quiere obtener un documento que sirva de ayuda a los inspectores para la corrección y perfeccionamiento en los trabajos realizados mediante esta técnica. Además, se intenta incentivar a los empresarios costarricenses para que prefieran este sistema. Se les brinda las herramientas básicas de conocimiento a los grupos empresariales, para que puedan desarrollar trabajos con esta novedosa técnica. Si más empresas conocieran y aplicaran el método aquí propuesto, el mercado de la construcción en Costa Rica se abriría a la competitividad en beneficio de todos.

Ahora bien, cabe señalar que no se hará un estudio de rendimientos en la construcción, ya que el tema de investigación no es la optimización de éste método constructivo, sino que la puesta en norma del mismo y hacer una descripción mediante el ejemplo de aplicación del sistema en los trabajos sobre la ruta San Ramón-Palmares. Tampoco se ahondará en el progreso en la colocación de la tubería, solamente se hará una recopilación de su avance.

Queda fuera de los alcances de esta investigación el análisis propiamente mecánico sobre la máquina perforadora, sino que se abordará su uso y partes en términos generales. También se omitirá cualquier consideración sobre el mantenimiento, rendimiento y costos del mercado para diferentes tipos de máquinas. En cuanto al suelo, el estudio únicamente contempla el tipo de suelo que será intervenido en el caso de estudio en específico. Para el resto, se comparará, basados en las normas internacionales, con suelos de composición similar.

Por otra parte, se realizará una comparación económica entre la HDD y el método tradicional de zanjeo a cielo abierto. Dicho análisis cuenta con las ofertas de dos licitaciones diferentes para la HDD. Así pues, con un libro de rendimientos, se obtendrá el costo por metro lineal para la técnica de zanjeo tradicional.

Finalmente, se analizarán los problemas más incidentes de la perforadora Vermeere su aplicación, según el personal entrevistado. De igual manera, se determinarán sus respectivas soluciones y medidas para evitarlos.

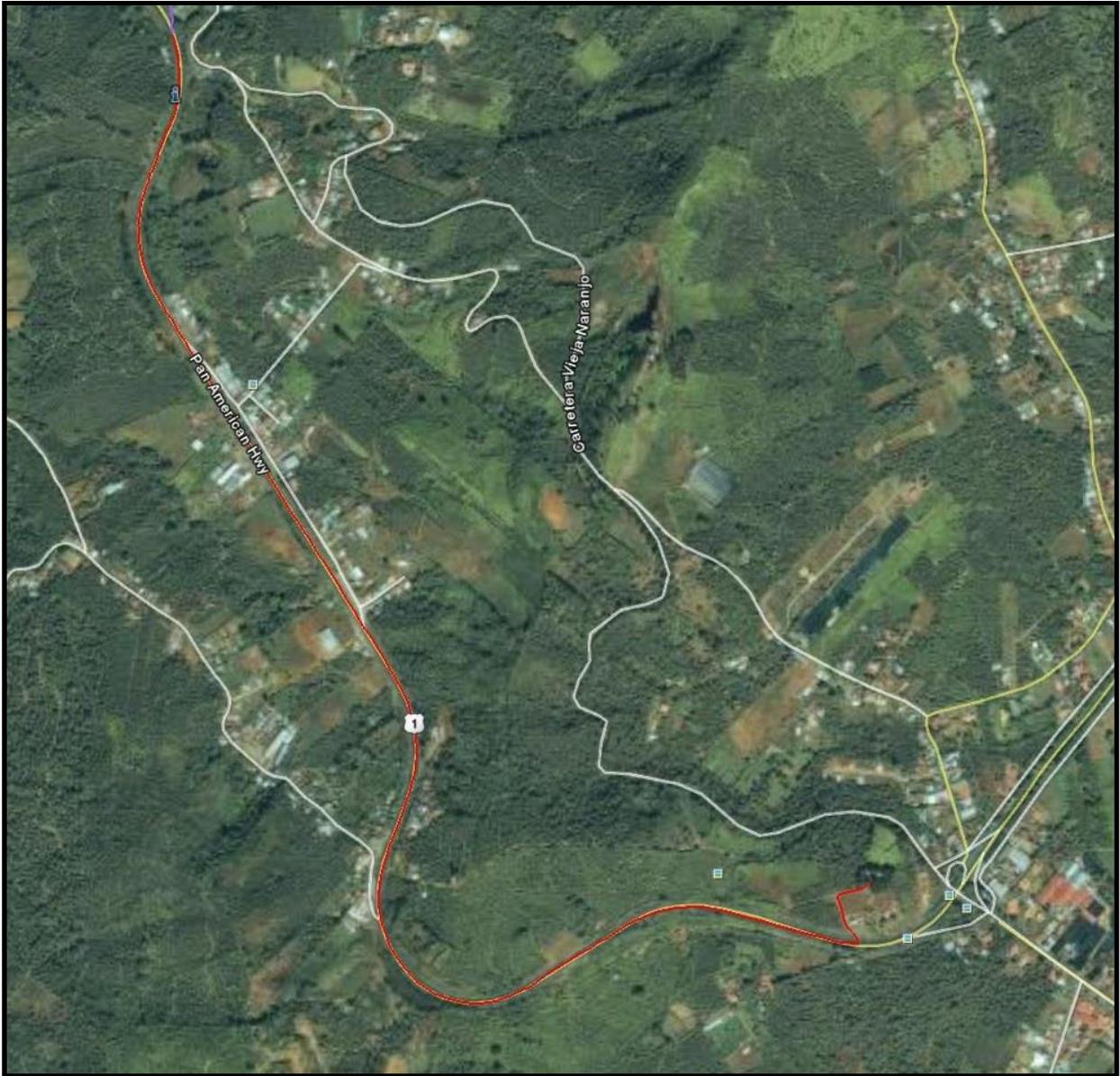


Figura 4. Área de estudio en la Conducción Potable San Ramón- Palmars

Fuente: Google Earth, 2014

### **1.8.2. Limitaciones**

La falta de estudios en Costa Rica sobre este tema dificulta la recolección de información que aborde la aplicación de este mecanismo de trabajo en nuestro. Así que, se utilizará únicamente con normativa internacional, dado que no es aplicable en su totalidad en nuestro país, se deberá adaptar en la medida de lo posible para uso su uso.

La mayoría de las normas están escritas en inglés, por tal motivo deberán ser traducidas correctamente. Esto puede causar diferencias en el sentido de algunas oraciones, pero se mantendrá fiel al significado original.

Puesto que no se tiene un estudio previo de rendimientos, las recomendaciones van a resultar de lo observado. Las buenas prácticas en el proceso constructivo no podrán ser evaluadas para una posible optimización en los rendimientos de trabajo.

Los meses cuando se va a desarrollar el estudio de observación serán los más lluviosos en Costa Rica, esto afecta la aplicabilidad del mecanismo en situaciones ideales. Es probable que se presenten problemas a resolver que no se apeguen, necesariamente, a la teoría metodológica.

Se analizaron dos licitaciones con 9 oferentes y un total de 23 líneas ofertadas, dado que son las licitaciones más recientes encontradas en el mercado. Puede que se obtengan variaciones muy altas entre líneas de un mismo oferente u entre los otros por el caso de inflación de precios por línea, práctica común en el mercado, por esto se debió eliminar un rubro de un mismo oferente por la inconsistencia de su oferta.

Por otra parte, Los precios de alquiler de maquinaria están basados en un documento del MOPT "Tarifas de maquinaria" del 2013, este detalle puede afectar los ajustes de precios en el mercado entre año a año.

Asimismo, los rendimientos de pega de tubería se debieron basar mediante observación, y los de compactación fueron obtenidos de una empresa privada.

Otra de las limitaciones obedece a los rendimientos de excavación y relleno que fueron obtenidos de un libro estadounidense *Heavy Construction Data*. Este de carácter internacional puede que no sea muy ajustable a las metodologías costarricenses.

Para las ofertas se analizaron, únicamente, los rubros en los cuales se vaya a utilizar el método de perforación dirigida. Específicamente, el aspecto del costo de construcción sin tomar en cuenta utilidades, costos administrativos, materiales, entre otros.

Finalmente, en cuanto a limitaciones en el tema de costos, no se encontró el costo de construcción por parte de la empresa CODOCSA lo cual podría hacer un ligero cambio en los costos promedio de la perforación.

## **CAPÍTULO 2. TRADUCCIÓN DE NORMA ASTM F1926-11**

En este capítulo se presenta la Norma ASTM F1926-11 la cual fue escrita y publicada en los Estados Unidos, pero considerada de carácter internacional. Se hizo una investigación acerca de las normativas que apliquen el método constructivo de la Perforadora Horizontal Direccional alrededor del mundo, por ejemplo, en Colombia se utiliza una guía técnica llamada: *Guía para el uso de perforación maxi-horizontal dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno bajo obstáculos, incluyendo cruce de ríos*, la misma es una adaptación de la Norma ASTM F1926-05 hecha por El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, (ICONTEC).

La Norma ASTM F1926-11 fue escogida por su amplio contenido acerca de aplicación del método HDD, además de que la mayoría de entes internacionales hacen referencia a la misma como base para una guía de buenas prácticas constructivas, referencia para el diseño y estudios preliminares.

Asignación: F1962 - 11

**Guía Estandarizada para el Uso de Maxi-perforación Direccional Horizontal para la Colocación de Tubería de Polietileno o Conducto Bajo Obstáculos, entre ellos, cruce de ríos, Costa Rica**

### **2.1. Alcance**

2.1.1 Esta guía describe el diseño, consideraciones de selección y procedimientos de instalación para la colocación de tubería de polietileno o conducto bajo tierra, utilizando equipos maxi-horizontal de perforación direccional. Los tubos o conductos pueden ser utilizados para diversas aplicaciones, incluyendo telecomunicaciones, energía eléctrica, gas natural, petróleo, líneas de agua, líneas de alcantarillado u otro transporte de fluidos.

2.1.2 La Perforación Horizontal direccional es una tecnología de perforación sin zanjas a cielo abierto. El equipo y los procedimientos están destinados a minimizar daños en la superficie, los requisitos de restauración y la interrupción del tráfico vehicular o marítimo con poco o ninguna interrupción de otras líneas o servicios existentes. La mini-horizontal perforación direccional (min-HDD) se utiliza típicamente para distancias relativamente más cortas y tuberías de menor diámetro, asociados con líneas de distribución de servicios públicos locales. En comparación, la perforación maxi-horizontal direccional (maxi-HDD) se utiliza típicamente para distancias más largas y tuberías de mayor diámetro, comunes en los principales cruces de ríos. Las aplicaciones que son intermedias a las categorías mini-HDD o maxi-HDD pueden utilizar adecuado equipo "medi" de tamaño y capacidades intermedio. En tal caso, las directrices de diseño y prácticas de instalación deberían seguir los pasos descritos para las categorías mini o maxi-HDD, como sea más adecuada en cada situación.

2.1.3 Los valores indicados en unidades pulgada-libra deben considerarse como estándar. Los valores entre paréntesis son conversiones matemáticas a unidades del SI que se proporcionan únicamente a título informativo, y no se consideran estándar.

2.1.4 Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma es establecer apropiadamente las prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso. La sección 6 contiene información general de seguridad relacionados con el uso de equipo de perforación direccional maxi-horizontal.

## **2.2. Documentos de referencia**

### **2.2.1. ASTM standards**

D420 Guide to Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes (Withdrawn 2011) (Guía de sitio para la caracterización del diseño ingenieril y propósitos constructivos (retirada 2011)).

D422 Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Método de prueba para el análisis de tamaño de partícula en suelos).

D1586 Test Method for Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils (Método de prueba para la penetración (prueba SPT) y muestreo de suelos *Split-barrel*).

D1587 Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes (Práctica para de tubería de pared delgada muestreo de suelos para propósitos geotécnicos).

D2113 Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation (Práctica para perforación de roca y muestreo de roca para el sitio de investigación).

D2166 Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (Método de prueba para esfuerzo a compresión sin confinamiento de suelos cohesivos).

D2435 Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading D2447 Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe, Schedules 40 and 80, Based on Outside Diameter (Withdrawn, 2010) (Método de prueba para propiedades de consolidación unidimensionales de suelos, usando fuerzas incrementales D2447 especificaciones para tuberías de polietileno (PE), cédulas de la 40 a la 80, basado en el diámetro externo (retirado 2010)).

D2513 Specification for Polyethylene (PE) Gas Pressure Pipe, Tubing, and Fittings (Especificaciones para tuberías para gas a presión de polietileno, tubos y accesorios).

## **2.3. Terminología**

### **2.3.1. Definiciones**

2.3.1.1 La perforación direccional horizontal, HDD, es una técnica para la instalación de tuberías o líneas de servicios públicos bajo tierra, utilizando un equipo de perforación para montaje en superficie que pone en marcha y coloca una sarta de perforación con un ángulo pequeño a la superficie con capacidad de seguimiento y dirección.

2.3.1.1.1 *Discusión.* La sarta de perforación crea un orificio piloto en una trayectoria esencialmente horizontal o arco superficial que puede, posteriormente, ser ampliada hasta un diámetro mayor durante una operación secundaria que incluye típicamente escariado y luego retroceso de la línea de tubería o conducción. El seguimiento de la ruta inicial se lleva a cabo por medio de un receptor de accionamiento manual o un sistema de seguimiento remoto. La dirección se logra mediante el control de la orientación de la cabeza de perforación que tiene un direccional y empujando la sarta de perforación hacia delante con la cabeza de perforación orientado en la dirección deseada. La rotación continua de la sarta de perforación permite que el cabezal de perforación excave un camino recto. El procedimiento utiliza un chorro de fluido, corte mecánico o ambos, con bajo volumen de flujo de perforación controlado, para minimizar la creación de vacíos durante la perforación inicial o el retroensanchamiento.

El fluido de perforación ayuda a estabilizar el taladro, quitar cortes, proporcionar lubricante para la sarta de perforación y tubo de plástico, y enfría la cabeza del taladro. La suspensión resultante rodea el tubo, llenando el espacio anular entre el tubo y la cavidad excavada.

2.3.1.2 *Perforación Horizontal maxi-direccional*, maxi-HDD, una clase de HDD, a veces, referido como la perforación direccional, para agujeros de perforación de hasta varios miles de metros de longitud y la colocación de tuberías de hasta 48 in. (2,2 m) de diámetro o mayor a profundidades de hasta 200 pies (60 m).

2.3.1.2.1 *Discusión*-Maxi-HDD. Es apropiado para la colocación tubos bajo grandes ríos u otros obstáculos grandes (ver Figura 5).

La información de seguimiento se proporciona de forma remota para el operador del equipo de perforación por sensores situados en el extremo delantero de la sarta de perforación. El corte del agujero piloto y la expansión del agujero normalmente se llevan a cabo con un bit o un escariador unido a la tubería de perforación, que se hace girar y es tirado por la plataforma de perforación.

2.3.1.3 *Mini-Perforación Horizontal Direccional.* La mini-HDD, una clase de HDD, a veces, referido como excavación guiada para agujeros de perforación de hasta varios cientos de metros de longitud y colocación de tuberías de típicamente 12 pulg. (300 mm) o menores de diámetro nominal en profundidades típicamente menores de 25 pies (7 m).

2.3.1.3.1 *Discusión.* La selección de la tubería polietileno y el uso del mini-HDD se discute ampliamente en el Plastics Pipe (PPI) TR-46, "Directrices del Instituto para el Uso de Mini-Perforación direccional horizontal para la colocación de tubería de alta densidad".

2.3.1.3.2 *Discusión-Mini-HDD* es apropiado para la colocación de líneas de distribución locales (incluyendo las líneas de servicio o laterales) por debajo de las calles locales, la propiedad privada, y a lo largo de derecho de vías.

La creación del orificio piloto y las operaciones de escariado típicamente se logran mediante corte por chorro de fluido o el corte par proporcionado por la rotación de la sarta de perforación, aunque los motores de lodo son accionados por el fluido de perforación, se utilizan, a veces, para condiciones de suelo duro o rocosos. El uso de motores de lodo solo sería aplicable para las grandes máquinas mini-HDD. Los sistemas de localización y seguimiento suelen requerir un receptor manual de sobrecarga operado para seguir el progreso del orificio inicial piloto. El receptor se coloca por encima de la ubicación general de la cabeza de perforación para permitir la determinación de su ubicación exacta y la profundidad, indica, también, la orientación de la cabeza de perforación para determinar la información de dirección por implementarse desde el equipo de perforación.

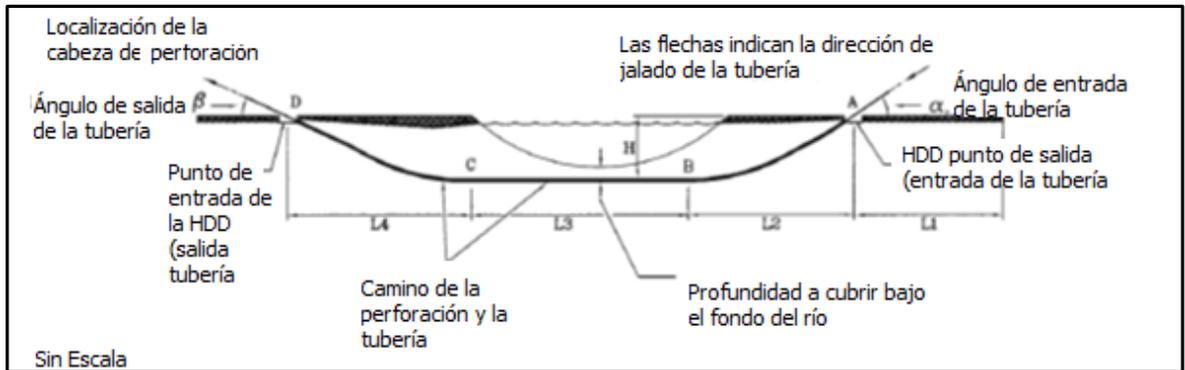


Figura 5. Diagrama ubicación de parámetros de diseño.

2.3.1.4 *Relación de dimensiones tubería, DR, n* La medida promedio especificada del diámetro del tubo dividido entre el valor mínimo especificado de espesor de pared.

2.3.1.4.1 *Discusión* Para tubos fabricados por control del diámetro exterior (OD), el DR es la relación del diámetro exterior de la tubería y el espesor mínimo de pared. La relación de dimensión estándar (SDR) es una relación específica del diámetro exterior y el espesor de pared mínimo especificado por "ANSI Preferred Número de la serie 10".

NOTA 1- Valores bajos de DR corresponden a tuberías más gruesas y fuertes.

## 2.4. Investigación preliminar del sitio

### 2.4.1 Consideraciones Generales

Un proyecto maxi-HDD, como es un gran evento que hará que se asocie un cruce del río, requiere investigaciones extensas y minuciosas superficiales y subsuperficiales.

Los ingenieros geotécnicos calificados deben realizar la preparación para la planificación y el diseño de la ruta de perforación. La información también debe proporcionarse a los contratistas potenciales para dar orientación para la licitación, y posterior a la finalización de la instalación. El contratista podrá realizar investigaciones adicionales, según lo desee. Como los proyectos

típicos de maxi-HDD son el cruce de ríos, los siguientes procedimientos son descritos en términos de las investigaciones y temas específicos que surgen en estos casos. Los procedimientos generales; sin embargo, pueden ser apropiadamente interpretados para aplicar también a los cruces no fluviales, como debajo de los obstáculos terrestres, incluyendo carreteras, ferrocarriles, etc.

## **2.4.2. Investigación de superficie**

2.4.2.1 *Inspección Topográfica.* Debe realizarse para definir con precisión las áreas de trabajo que se describen en el apartado 5.4.1 del lugar propuesto de paso. Las referencias horizontales y verticales deben ser establecidas para referenciar hidrográfica y geotécnicamente los datos. La inspección normalmente debe incluir de manera anticipada perfiles de desbordamiento en la trayectoria del centro de línea, que se extiende unos 150 pies (75 m) de la tierra desde el punto de entrada hasta la longitud (prefabricada) de sección de halado terrestre del punto de salida de la perforación. La información de la inspección debe estar relacionada con las características topográficas en las proximidades del cruce propuesto. La información topográfica existente puede estar disponible en el Servicio Geológico de Estados Unidos, o Federal, publicaciones estatales o del condado. Las fotografías aéreas o investigaciones previas pueden ser útiles, especialmente para el cruce de obstáculos terrestres en las zonas urbanas, ya que estos pueden indicar la presencia de edificios demolidos y la posibilidad de fundaciones, así como ningún área rellena. También, es necesario comprobar los registros de servicios públicos disponibles para ayudar a identificar la ubicación exacta de las instalaciones por debajo del suelo en la zona existente, incluyendo la energía eléctrica, gas natural, petróleo, agua, alcantarillado, o líneas de telecomunicaciones. La presencia de tuberías existentes, pilotes de apoyo, etc., que contienen una masa de acero significativa puede causar interferencia magnéticamente con la sensible orientación del equipo o instrumentación de ubicación.

2.4.2.1.1 *Plataforma del equipo de perforación (Excavador) Lateral.* El área disponible requerida para la plataforma de perforación debe ser suficiente para la plataforma en sí y su

equipo auxiliar. En general, el tamaño del área requerida al lado del equipo de perforación dependerá de la magnitud de la operación, incluyendo la longitud de la perforación y el diámetro de la tubería a ser colocada. Típicamente, un espacio de trabajo temporal de aproximadamente 150 pies (45 m) de ancho por 250 pies (75 m) de longitud será suficiente. Estas dimensiones pueden variar de 100 por 150 pies (30 por 45 m) para las travesías más cortas de 1 000 pies (300 m) o menos, a 200 por 300 pies (60 por 90 m) para los cruces mediano o largo.

2.4.2.1.2 *Suministro de agua.* El almacenamiento de agua e instalaciones para mezclar, almacenar y bombear fluido de perforación requerirá un espacio significativo. Aunque es una práctica normal tomar agua encontrada en la ubicación para mezclar el fluido de perforación, alternar suministros de agua puede ser necesario para obtener fluido de perforación con adecuadas características. El agua dura o salada no es deseable, aunque pueden ser utilizados aditivos para crear el valor de pH adecuado. Puede ser necesaria para facilitar el acceso de los camiones para el transporte de agua o proporcionar para la instalación de una tubería de superficie relativamente largo o manguera que conecta a un hidrante a distancia.

2.4.2.1.3 *Orificio de salida.* Suponiendo que el tubo a ser colocado tiene un diámetro demasiado grande para ser suministrado en un carrete (por ejemplo, más de 6 pulg. (150 mm)), debe haber suficiente espacio en el lado opuesto del equipo de perforación, en el que el orificio saldrá y se inserta el tubo, para dar cabida a una continua longitud recta de tubería prefabricada. El espacio para una longitud recta comenzará aproximadamente 50 a 100 pies (15 a 30 m) a partir del orificio de salida prevista y se extienden hacia la tierra directamente a un anchura de 35 a 50 pies (10 a 15 m), dependiendo del diámetro de la tubería. En las inmediaciones de la salida de la perforación (tubería entrada), se requiere un área típicamente de 50 pies (15 m) de ancho por 100 pies (30 m) de longitud. Para tuberías de diámetro relativamente grande (más grande de 24 pulg. (600 mm), o en casos de condiciones de suelo difíciles, una área de ancho de 100 pies (30 m) por 150 pies (45 m) de longitud debe ser proporcionado.

2.4.2.2 *Estudio Hidrográfico / Potamológico.* Para cruce de agua importantes, debe llevarse a cabo un estudio con precisión para describir las curvas de nivel y la estabilidad del río para establecer la idoneidad para la vida de diseño de la tubería.

Típicamente, las profundidades deben establecerse a lo largo de la esperada línea central, y aproximadamente 200 pies (60 m) aguas arriba y aguas abajo; pueden ser necesarios lecturas más cercanas para monitorear la actividad futura del río. Deben considerarse los futuros cambios en el terreno a orillas del río. Los derrumbes, bancos migratorios, o socavación pueden exponer la tubería.

**2.4.2.3 Eliminación del fluido de perforación.** Deben ser consideradas los medios para la eliminación de los desechos de fluidos de perforación. El volumen de fluido de perforación utilizado dependerá de las características del suelo, pero es típicamente del orden de 1 a 3 veces el volumen de suelo removido. La mayoría de los fluidos de perforación utilizan bentonita o polímeros aditivos que no se consideran, generalmente, peligrosos. Sin embargo, deben seguirse las regulaciones locales en relación con la eliminación.

**2.4.2.3.1 Reciclaje del fluido de perforación.** Ocasionalmente, se utiliza fluido reciclado para reducir el material y los costos de disposición. Si se contempla el uso de este fluido, deben ser considerados los medios para el transporte de cualquier fluido agotado desde el lado opuesto (salida orificio), durante la operación del retroceso, a un lado de perforación. Esto puede lograrse por camión, barcaza, o una línea de tubería de recirculación temporal en la parte inferior de la vía acuática (por cruce de ríos). La línea de recirculación debe ser adecuada para evitar la descarga accidental en la vía acuática.

**2.4.3. Investigación del subsuelo.** La técnica general y la viabilidad económica del proceso maxi-HDD es altamente dependiente de las propiedades de la formación del suelo por medio del que se llevará a cabo la penetración. Por lo tanto, debe realizarse una precisa y exhaustiva investigación geotécnica por un ingeniero calificado, incluyendo la revisión de la información existente y estudios específicos de sitios para la ubicación propuesta. Esta información será utilizada para producir dibujos de diseño (incluyendo ruta final taladro, diseño de tuberías, y el diseño de perforación), la construcción de especificaciones, y las solicitudes de permisos, así como para proporcionar información para los contratistas sobre la cual seleccionar las apropiadas herramientas y métodos para la construcción real. Mientras que las directrices dadas en las siguientes secciones señalan, en general, procedimientos, tipos de información o ambos, que podrían ser desarrollados, variables específicas imprevisibles hacen que la minuciosidad y la exactitud de cualquier estudio de caracterización del sitio dependan directamente de la habilidad, experiencia, y la curiosidad del ingeniero investigador. Por lo

tanto, el investigador debe definir la configuración, extensión y circunscripción de la investigación. La información de caracterización del sitio debe ir más allá de definir las condiciones del suelo a lo largo de la trayectoria de perforación para incluir una previsión de las condiciones futuras (es decir, el río serpentea y escurre) y para prever el efecto del proceso de maxi-HDD en las condiciones del lugar.

2.4.3.1 *Estudio.* La investigación preliminar del subsuelo debe comenzar con una revisión de los datos existentes, como pueden ser obtenidos a partir de los informes publicados para el suelo (por ejemplo, de Conservación de Suelos Informe del Servicio, Servicio Geológico de EE.UU., el Ejército de EE.UU., Cuerpo de Ingenieros, informes, etc.) o los registros de proyectos anteriores de construcción. En particular, deben ser examinados los datos cerca de tuberías o cruces de cable por el río, o construcción de los cimientos del puente. Los resultados de este estudio se utilizarán para definir inicialmente la ruta recomendada de perfil de penetración.

2.4.3.2 *Prueba de perforaciones.* Los datos específicos de sitio deben obtenerse para caracterizar completamente y verificar las condiciones que se crearan por medio de la trayectoria de perforación propuesta. Consulte la Guía D420, D1586 Método de prueba, Método de prueba D1587, Método de prueba D2113 y D4220 Práctica. La recolección de datos debe estar dirigido a identificación de materiales de la tierra en el sitio y en explorar la estratificación del subsuelo (incluyendo la identificación de la frontera entre la roca y otros estratos, presencia de guijarros o cantos rodados y otras anomalías, tales como tocones viejos y relleno de escombros). La ubicación, profundidad y el número de perforaciones deben determinarse por el ingeniero, basado en el estudio preliminar, anticipando los futuros cambios en las condiciones del sitio (meandros del río, escurrimientos, etc.), y las modificaciones de las condiciones del suelo durante la construcción. Estos sondeos deberán estar situados a una distancia lateral suficiente (a ambos lados) de la trayectoria de perforación propuesto para evitar perforaciones en el orificio de prueba, y los agujeros deben ser selladas con lechada para evitar vías de fuga potenciales de fluido de perforación durante el instalación real. Tras la finalización de la ruta detallada diseño (Sección 2.7), pueden ser deseables perforaciones de prueba adicionales en puntos críticos, tales como curvas.

NOTA 2: En áreas ambientalmente sensibles, pueden existir posibles restricciones en la ubicación o el número de perforaciones de prueba.

2.4.3.3 Además de probar perforaciones, las pruebas de cono dinámico o el desarrollo de técnicas no intrusivas como el radar penetrante de tierra o sonar pueden ser utilizados para identificar la estratificación y zonas con anomalías. Tales técnicas de sondeo pueden aplicarse en la proximidad de condiciones conocidas determinadas por una perforación para obtener una calibración adecuada y, luego, extenderse hacia zonas relativamente cercanas a intervalos para identificar irregularidades entre perforaciones. Si es necesario, deben realizarse perforaciones adicionales en puntos intermedios de interés (4,5).

2.4.3.4 *Análisis de Suelos* (3, 6,7) El estudio geotécnico debe evaluar varios parámetros, incluyendo la clasificación de suelos (Consulte Métodos de Ensayo D4318 y D422). Fuerza y propiedades de deformación (Consulte Métodos de Ensayo D1586, D2166, D2435, D2850, D4186, D4767). Comportamiento del nivel freático (Consulte la sección Método de Prueba D5084). Aunque las pruebas de evaluación en campo *in situ* deberán incluirse, la investigación geotécnica debe hacer hincapié en las pruebas de laboratorio, para obtener resultados cuantitativos más precisos y significativos. Si se encuentra por un terreno rocoso, los sondeos deberán penetrar lo suficiente como para verificar si es o no roca madre. Para el análisis de suelo deben seguirse los métodos enumerados en la Sección 2.2. En general, los siguientes datos específicos deben obtenerse de las perforaciones:

2.4.3.4.1 Clasificación estándar de los suelos (consulte la prueba D4318 Método).

2.4.3.4.2 Curvas de gradación de los suelos granulares, como se describe en Método de prueba D422.

2.4.3.4.3 Valores de prueba de penetración estándar, tal como se describe en la prueba D1586 Método.

2.4.3.4.4 Muestras con núcleo de roca con denominación de calidad de la roca (RQD) y el porcentaje de recuperación.

2.4.3.4.5 Resistencia a la compresión no confinada, como se describe en Prueba D2166 Método.

2.4.3.4.6 Dureza de Mohs de muestras de rocas.

2.4.3.4.7 Posible contaminación (residuos peligrosos).

2.4.3.4.8 El agua subterránea ubicación, el tipo y comportamiento y

2.4.3.4.9 Resistividad o mineralógicas componentes eléctricos.

2.4.3.5 Para el cruce de ríos, los resultados del estudio preliminar y sitios de pruebas específicas deben combinarse de manera integral con el informe de las condiciones geotécnicas del subsuelo debajo del fondo del río, más el potencial de la corriente de meandros y el lavado de sedimentos. Los resultados deben, entonces, ser considerados por el propietario, el ingeniero y los posibles contratistas con respecto a la compatibilidad con el estado del arte de la dirección tecnología de perforación para completar de manera rentable la tarea. Si es necesario, la ubicación de cruce puede ser alterado a lugares de paso más favorables. En este caso, muchas de las investigaciones en superficie y subsuperficiales podrían necesitar ser repetidas para la nueva propuesta de ubicación de cruce y trayectoria de perforación.

2.4.3.6 *Viabilidad* Las condiciones de suelo son un factor importante que afecta la viabilidad y el costo de utilización de maxi-HDD en una determinada área geográfica. El Cuadro 1 indica la idoneidad de Perforación Horizontal Direccional en función de las características generales de las condiciones del suelo en la zona y las profundidades de interés (4,6).

La categoría "generalmente conveniente" requiere de contratistas con experiencia o personal informado, utilizando el equipo adecuado. Tales contratistas se supone deben tener mínimo un año de experiencia en campo y completar aproximadamente 30 000 pies (10 km) de construcción en proyectos relacionados. El tamaño y el tipo de máquinas consideradas apropiadas para instalaciones particulares están en función de la longitud de perforación, diámetro final del agujero, y condiciones del suelo. Se encuentran disponibles varios tipos cabezas de perforación, motores de lodo, escariadores y la capacidad de fluidos de perforación para las variabilidades en las condiciones del terreno. Las condiciones en que "pueden producirse dificultades" pueden requerir modificaciones de los procedimientos de rutina o equipo, como el uso de cabezales de perforación de propósito especial o fluidos de perforación optimizados. Algunos casos supondrán "problemas sustanciales" y pueden no ser económicamente viables para perforación direccional, utilizando la tecnología actual. La presencia de gravas hace que se produzca potencialmente un aumento en los problemas, cantos rodados, guijarros o con transiciones de no litificado de material en roca sólida. En tales casos, deben considerarse otros lugares de perforación o alternativas de construcción, a menos

que se encuentren circunstancias especiales que dicten la necesidad de perforación direccional en la ubicación actual, incluso a los altos costos asociados con las técnicas especiales de perforación en roca, etc.

Cuadro 1. Conveniencia y condiciones de suelo para la Perforación Horizontal Direccional

Condiciones de suelo	Generalmente conveniente	Pueden ocurrir dificultades	Problemas sustanciales
Arcillas blandas a muy blandas, limos, y depósitos orgánicos		X	
Limos y arcillas de media a muy duras	X		
Arcillas duras y lutitas consolidados	X		
Arenas sueltas o muy sueltas encima o bajo el nivel freático (no más de un 30% de peso de grava)		X	
Arenas muy sueltas a muy densas (30 a 50% peso de grava)		X	
Arenas muy sueltas a muy densas (50 a 85% peso de grava)			X
Arena muy suelta a muy densa			X
Suelos con partículas adoquinadas o empedradas y obstrucciones			X
Rocas en capa, tiza y suelos cementados	X		
Roca consolidada y no consolidada		X	

## **2.5. Consideraciones de seguridad y medio ambiente**

**2.5.1. Consideraciones generales** El personal puede resultar lesionado por las operaciones de las máquinas mecánicas e hidráulicas directamente relacionadas con la operación de perforación o de *shock* en líneas de electricidad o tuberías enterradas. Además, la escala de operaciones maxi-HDD puede implicar equipo adicional y accesorios necesarios para la elevación y manipulación de grandes taladros, varillas, cabezas de perforación, escariadores, etc., así como la tubería de producto o conducto. Deben seguirse las precauciones adicionales relacionadas con un auxiliar y un equipo específico, pero está más allá del alcance de esta norma. El personal no esencial y los transeúntes no deberán estar en la zona inmediata de los equipos de maxi-HDD. Deben colocar barreras y advertencias a un mínimo de 30 pies (10 m) desde el borde del equipo o asociados al HDD. Las medidas de seguridad deben ser seguidas por todo el personal y en ambos extremos de la trayectoria de perforación. El contacto involuntario con líneas de energía eléctrica, gas natural y petróleo pueden resultar en riesgos para el personal o de contaminación. Si es posible, debe ser de ayuda durante la construcción cualquier corte de la tubería en la proximidad del orificio. En general, la posibilidad de la lesión o el impacto ambiental causado por el daño por trabajar o alimentando instalaciones subterráneas o tuberías durante las operaciones de perforaciones iniciales o retroensanchamiento se reducen si se siguen adecuadamente las regulaciones y los procedimientos para la prevención de daños, tal como se señala en la Sección 2.6.

**2.5.2. Ropa de trabajo-precaución:** La ropa suelta o joyas no deben ser usados, ya que pueden engancharse en el movimiento de las partes mecánicas. Gafas de seguridad o gafas de OSHA o ambos, y cascos aprobados OSHA deben ser usados en todo momento. Deben ser usados por todo el personal zapatos de trabajo y guantes de protección.

**2.5.3. Prácticas de seguridad en máquinas** Los contratistas deben cumplir con todo aplicable OSHA, estatales y locales, y prácticas aceptadas por la industria. Todo el personal en las inmediaciones del equipo de perforación o en el extremo opuesto de la perforación debe ser adecuadamente entrenado y educados sobre los riesgos potenciales asociados con el

equipo de maxi-HDD. Para los riesgos eléctricos, consulte OSHA 3075. El personal debe ser informado de los procedimientos de seguridad, equipos de seguridad y precauciones adecuadas. En la industria se encuentran cursos y seminarios, incluyendo capacitación proporcionada por los proveedores de los equipos.

2.5.3.1 El funcionamiento del equipo de perforación requiere rotación, avance o extracción de las barras de perforación. La operación del equipo de perforación se lleva a cabo normalmente utilizando cadenas de transmisión, sistemas de engranajes, y prensas que pueden potencialmente conducir a lesiones al personal por los componentes mecánicos móviles. Todos los escudos de seguridad o de protección deben montarse correctamente. El equipo debe inspeccionarse al iniciar cada día de trabajo para verificar el funcionamiento correcto.

2.5.3.2 *fluido hidráulico*. Las líneas de aceite hidráulico que impulsan el equipo de perforación operan bajo presiones de varios miles de psi (cientos de bares). Las mangueras y conectores deben estar correctamente sujetas para evitar fugas.

2.5.3.2.1 *Precaución*. Si se sospecha de una fuga, debe comprobarse mediante el uso de un pedazo de cartón u otro objeto, pero no las manos o cualquier otra parte del cuerpo. El fluido hidráulico de alta presión puede penetrar la piel, quemaduras o envenenamiento de la sangre. Antes desconectar las líneas hidráulicas, la presión del sistema debe ser disminuido.

2.5.3.3 *Fluido de escariado*. Las presiones de fluido de perforación pueden variar dependiendo del diseño del equipo y la preferencia del operador; son posibles presiones de varios miles de psi (cientos de bares). Las mangueras y conexiones deben ser sujetadas adecuadamente para evitar fugas.

2.5.3.3.1 *Precaución*. Si se sospecha que hay fugas estas deben ser revisadas, usando un pedazo de cartón u otro objeto. Evite el uso de manos o cualquier otra parte del cuerpo para verificar si hay una fuga. Antes que las barras de perforación individuales sean insertadas o retiradas de la cadena perforación, debe verificarse que la presión del fluido de perforación sea detenida y permite que disminuya; de otro modo, la alta presión del fluido podría escapar a chorro de la articulación y causar lesiones al personal. El manómetro de presión de fluido de perforación debe ser comprobado para verificar que la presión ha sido disminuida antes de desanclar cualquier varilla.

NOTA 3: Si la presión no disminuye en un intervalo corto de tiempo después de ser apagado, las aberturas de chorro de fluido en la cabeza de perforación pueden estar obstruidos. Entonces se debe tener un especial cuidado cuando se desancla la varilla. Puede ser necesario extraer la cadena de perforación o exponer la cabeza del taladro para limpiar los orificios de chorro antes de continuar la operación. Para evitar lesiones de la cabeza de perforación y los fluidos de perforación, todo el personal debe mantener una distancia segura de la salida punto de la perforación como las superficies de la cabeza de perforación. La presión debe ser apagada tan pronto como la cabeza de perforación sale.

**2.5.4. Efectos de la construcción en sitio.** Se supone que las investigaciones preliminares en el sitio incluyeron los análisis para verificar la estabilidad de taludes, carreteras u otras características importantes para ser atravesado. Es necesario garantizar que la operación de maxi-HDD no tendrá un impacto negativo en el sitio sobre la terminación. En muchos casos, será adecuado utilizar lechada para sellar el orificio de la trayectoria de perforación final o las porciones de extremo del agujero siguiente la instalación de la tubería para evitar el flujo futuro o contaminación ambiental. Especialmente, las zonas sensibles incluyen zonas designadas por ley, tales como humedales, naturaleza y canales escénicos, o sitios de disposición contaminados o de desecho. Si el agujero pasará a través o en las proximidades de un área contaminada, deben seguirse procedimientos especiales para la eliminación y monitoreo de los depósitos, de acuerdo con las regulaciones ya sean federales, estatales o locales que correspondan.

**2.5.4.1 Fluido de perforación.** El fluido aditivo más común para la perforación es bentonita, una arcilla de origen natural. Cuando se añade agua, el líquido resultante proporciona propiedades deseadas, incluyendo viscosidad, baja densidad y lubricidad. El material de bentonita utilizado debe ser certificado por *National Sanitation Foundation* (NSF). La eliminación debe ser de acuerdo con las leyes y reglamentos locales. La mezcla de agua-bentonita no es un material peligroso a menos que sea mezclado con contaminantes tóxicos. Los residuos de material se tratan, generalmente, como depósitos típicos de excavación y pueden ser eliminados por medios similares a otros desechos. Si es de interés eliminar otro tipo de aditivo peligroso puede ser necesario eliminar los residuos sólidos del agua y

transportarlos a un sitio de deposición y tratar el agua para cumplir las regulaciones de eliminación.

2.5.4.2 Los pozos de acceso que pueden estar presentes tanto en extremos de la perforación con receptáculos convenientes para recoger el fluido de perforación utilizado. Si no está presente para el acceso de servicios públicos, deberían ser proporcionados pozos pequeños en ambos extremos para servir como tales receptáculos. Dependiendo de la permeabilidad de este, los pozos pueden estar revestidos con un material o membrana apropiada. Los pozos deben vaciarse según sea necesario. Algunos sistemas maxi-HDD utilizan fluido de perforación sistemas de recirculación para reducir el volumen de desechos. Si la investigación geotécnica reveló la existencia de condiciones del suelo que conducen a la fuga de fluido, tal como por medio de fracturas preformadas en los alrededores de la masa permeable de arcilla o tierra, esta condición debe ser anticipada y representada en la operación de la perforación.

## **2.6. Reglamentos y prevención de daños**

**2.6.1. Consideraciones generales.** El propietario de la tubería propuesta debe obtener los permisos de perforación necesarios y es responsable de la obtención de las aprobaciones federales, estatales o jurisdicciones locales u otros organismos que pueden ser afectados por el trabajo. Las investigaciones preliminares (Sección 2.4) deben identificar lugares y caminos apropiados, incluso separaciones seguras de otras instalaciones tales como energía eléctrica, gas natural o líneas de petróleo. Si las restricciones para un orificio particular de la maxi-HDD, son tales como para estar en las proximidades de las instalaciones conocidas, los propietarios afectados deben ser contactados y deben seguirse procedimientos estrictos para su ubicación. Si una maxi-HDD interconecta puntos bajo la jurisdicción de varios Estados o cuerpos de gobierno, entonces los reglamentos de todas las partes deben ser considerados,

incluidos los permisos pertinentes. Pueden existir restricciones especiales, incluyendo las regulaciones de restauración, en el medio ambiente de las áreas de hábitat sensibles.

**2.6.2. Plan de medio ambiente, salud y seguridad.** Cuando se requiere, cada contratista que trabajará en el proyecto debe presentar un plan de Medio Ambiente, Salud y Seguridad. Algunos items por considerar son las responsabilidades del plan, la presentación de informes, formación de empleado, las hojas MSDS para los materiales que se utilizan, teléfono de emergencia, números de la policía, los bomberos, y asistencia médica, prevención de incendios, saneamiento e industrial higiene.

**2.6.3. Estudio de impacto ambiental y arqueológico.** La mayoría de proyectos con maxi-HDD requerirán la contratación de diversos permisos ambientales. Cuando un plan de permiso ambiental deba ser elaborado, debe incluirse una lista de permisos requeridos (por ejemplo, USAE, USEPA), el tiempo necesario para preparar los permisos, y una fecha estimada de expedición. Los puntos al considerar son materiales sólidos y peligrosos y residuos gestión, los humedales, los cementerios, el uso del suelo, la contaminación del aire, ruido, el suministro de agua y descarga, control de tráfico y el río y transporte ferroviario.

**2.6.4. Vías navegables (ver ANSI / EIA / TIA-590).** El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USAE) regula las actividades relacionadas con cuerpos interestatales de agua, incluidas las marismas y afluentes, así como las aguas dentro del estado que podría afectar el comercio interestatal o extranjero. La organización es responsable de los trabajos que afectan dichos cursos de agua, incluyendo las cabeceras de agua dulce en arroyos, humedales, pantanos y lagos. El Distrito Regional Ingeniero de la USAE asesorará a los solicitantes de los tipos de permisos requeridos para este tipo de proyectos propuestos. Además, un estado o, agencia de revisión ambiental local, o ambos, y permiso puede ser necesario.

**2.6.5. Cruces de trenes (ver ANSI / EIA / TIA-590).** Debe consultarse al jefe de máquinas del ferrocarril para los métodos aprobados de cruzar la línea de ferrocarril. Para la pista, el propietario de la vía debe ser consultado. Los ferrocarriles, normalmente, requieren tubos en los cruces para evitar derrumbes o daños en caso de rotura de tuberías (En el momento de la redacción de esta norma, el comité de Ingeniería de Asociación América (AREA) está estudiando el uso de HDD para cruzar sin entubar y entubado de ferrocarriles, tanto para gasoductos plástico y acero.)

## **2.7. Trayectoria de perforación maquetación y diseño**

**2.7.1. Consideraciones generales.** Para proyectos maxi-HDD, tales como el cruce de ríos, la trayectoria de perforación debe ser diseñada y especificada por el ingeniero que representa el propietario antes del proceso de licitación con el contratista. Sobre la base de la superficie preliminar y las investigaciones del subsuelo, se seleccionará el camino para colocar el tubo dentro de un terreno estable y aislado de la actividad del río para la vida de diseño de la línea de servicio. El suelo a través del cual será atravesado por la ruta debe ser compatible con la tecnología maxi-HDD. En general, para los proyectos de maxi-HDD, el camino diseñado se encuentra dentro de un plano vertical. Si es necesario, es posible una curva lateral, consistente con las capacidades del equipo y la tubería de producto. La ruta debe ser claramente designada en un informe integrado que resume los resultados de la superficie y las investigaciones del subsuelo, y debe ser utilizado para la fijación de precios, la planificación y ejecución de la operación.

**2.7.2. Restricciones de la dirección y las barras taladro.** La ruta planificada debe ser compatible con la capacidad de dirección de la sarta de perforación y el radio de curvatura permisible de las barras de perforación de acero sobre la base de las correspondientes tensiones de flexión en las varillas de acero y articulaciones. Aunque algunas condiciones del suelo inhibirán maniobras agudas de dirección, las limitaciones de ruta, a

menudo, se basan en consideraciones de resistencia a la fatiga de las varillas. Una varilla dada puede ser capaz de soportar un único ciclo de curvado correspondiente a una radio de curvatura relativamente fuerte, pero la rotación de la varilla durante los resultados de la operación de perforación en los ciclos de flexión puede, eventualmente, causar la rotura por fatiga acumulada. El diámetro de la varilla de perforación es un parámetro importante que afecta a su rigidez, la capacidad de dirección, y los radios de curvatura permisible. Una guía conservadora de la industria indica el radio mínimo de curvatura debe ser aproximadamente:

$$(R_{rod})_{min} = 1200D_{rod} \quad (1)$$

Donde:

$(R_{rod})_{min}$  = Radio de curvatura media recomendada para la barra de perforación en pulgadas (mm), y

$D_{rod}$  = Diámetro nominal de la barra de perforación, pulgadas (mm).

Esto aplica para curvaturas horizontal (en plano) o en vertical (perfil).

**2.7.3. El camino propuesto.** Debe evitar curvas innecesarias. Tales trayectorias pueden ser difíciles de seguir y pueden dar lugar a sobrevirajes, curvas excesivas, resultando en un mayor esfuerzo en las barras de perforación y mayores fuerzas de tracción requerida durante la instalación de la tubería. El radio de curvatura local de la ruta de acceso en cualquier momento puede estimarse por medio de:

$$R = \frac{\Delta S}{\Delta \varphi} \quad (2)$$

Donde:

R = radio local de curvatura a lo largo de segmento de trayecto, en pies (m),

$\Delta S$  = Distancia a lo largo del trayecto, en pies (m) y

$\Delta \varphi$  = Cambio de dirección angular, radianes.

Nota 4: El ángulo en radianes es igual que el ángulo en grados x 0,0175.

(un radián equivale a 57,3°.)

Por lo tanto, si se selecciona  $\Delta S$  para ser igual a 30 pies (10 m) (por ejemplo, una longitud de la varilla para algunas máquinas maxi-HDD) un cambio de 0,1 rad (6°) corresponde a un radio de curvatura de 300 pies (100 m).

**2.7.4. Trayectoria perfil de ruta de excavación (plano vertical).** Un cruce obstáculo típico, tal como el representado por un río, se ilustra en la Figura 5.

2.7.4.1 Los siguientes parámetros deben especificarse en la definición de la trayectoria de perforación:

2.7.4.1.1 Punto de entrada de perforación (salida de la tubería),

2.7.4.1.2 Punto de salida de perforación (entrada de tubo),

2.7.4.1.3 Ángulo entrada de perforación (salida de la tubería),

2.7.4.1.4 Ángulo salida de perforación (entrada de la tubería),

2.7.4.1.5 Profundidad del camino, (por ejemplo, la profundidad de la cubierta de la tubería bajo el fondo del río),

2.7.4.1.6 Curvaturas del camino.

2.7.4.2 *Diámetro de entrada (salida de tubería).* El punto de entrada al agujero debe ser especificado con una precisión coherente con la ruta de tubería, requisitos del equipo, y las investigaciones topográficas preliminares. Los ángulos de entrada de la perforación deben estar en el rango de 8 a 20° (0,15 a 0,35 rad) de la superficie del suelo, preferiblemente de 12 a 15 grados (0,20 a 0,25 rad) de la superficie del suelo. Estos ángulos son compatibles con las capacidades del equipo típicos.

2.7.4.3 *Diámetro de salida (Entrada de la tubería).* El punto de salida de la excavación también debe especificarse con una precisión consistente con la longitud del tubo e investigaciones topográficas. Los ángulos de salida de la perforación deben ser relativamente superficiales, preferiblemente menos de 10° (0,15 rad). Un ángulo poco pronunciado facilitará

la inserción del tubo en el orificio, mientras se mantiene el radio de curvatura mínimo requerido. Los ángulos relativamente pronunciados requerirán una mayor elevación del tubo para mantener el radio de curvatura necesario.

2.7.4.4 *Ruta de Perfil.* El camino propuesto debe establecer, de manera óptima, un plano vertical que incluye la entrada diámetro y puntos de salida. Los arcos de la trayectoria de perforación y las secciones rectas (es decir, después de lograr la profundidad deseada) deben ser definidos, incluyendo los radios de curvatura y los puntos aproximados de tangencia de la curva y segmentos tanto las barras de perforación de acero (Eq 1) y la tubería PE o conducto (Sección 2.8). Cabe señalar que incluso los radios de curvatura más grandes (Curvaturas inferiores) reducirán aún más la flexión lateral, por cargas sobre las barras de tubo de perforación a medida que atraviesan la ruta, ayudando así a evitar aumentos adicionales de los esfuerzos de tracción asociada con sus efectos de rigidez. Normalmente, la ruta debe garantizar una profundidad mínima de la cubierta de 15 pies (5 m) por debajo del fondo del río como proyecta sobre la vida de diseño de la tubería, incluyendo los márgenes de la socavación (3,5). Esto supera efectos de flotabilidad y ayudar a superar la tendencia a que el taladro cabeza se eleve hacia la superficie libre, lo cual complica el funcionamiento de la dirección.

NOTA 5: La asociación de contratistas de Perforación Direccional (DCCA) recomienda una profundidad mínima de 20 pies por debajo del fondo del río.

2.7.4.4.1 *Radio promedio de curvatura.* El radio medio de curvatura para un segmento de trazado (es decir, AB o CD en la Figura 5.1) alcanzando hacia o desde una profundidad requerida para pasar por debajo de un obstáculo, puede estimarse a partir de la salida de la perforación o ángulo de entrada, respectivamente, y la profundidad de la perforación:

$$R_{avg} = \frac{2H}{\theta^2} \quad (3)$$

Donde:

$R_{avg}$  = Radio promedio de curvatura a lo largo del segmento del trayecto, en pies (m),

$\theta$  = Ángulo de entrada o salida a la superficie, radianes y

H = Profundidad de la perforación bajo la superficie, pies (m).

Requiere La distancia horizontal correspondiente para lograr la profundidad o la subida a la superficie pueden ser estimados por:

$$L = \frac{2H}{\theta} \quad (4)$$

Donde:

L= distancia de transición horizontal

Debe tenerse en cuenta de que las desviaciones de un radio uniforme resultará en radios localmente más pequeños.

2.7.4.4.2 La trayectoria resultante determinará las tensiones a ser ejercidas sobre el tubo durante la vida de instalación y servicio. Por ello, el diseño de la tubería producto debe ser analizado a partir sobre la ruta seleccionada final, siguiendo el diseño de tuberías y procedimientos de selección que figuran en la Sección 2.8.

## **2.8. Diseño y consideraciones de selección de la tubería**

### **2.8.1. *Directrices generales***

2.8.1.1 Las aplicaciones Maxi-HDD requieren típicamente un análisis detallado de la tubería o conducto en relación con su intención de aplicación. Dadas las grandes cargas de tracción y potencialmente esperados a alta presión externa, debe realizarse un análisis cuidadoso de la tubería PE, sujeto a la geometría de la ruta, a verificar o determinar un (o espesor de pared de la tubería) DR apropiado. El análisis debe tener en cuenta tanto las fuerzas de instalación que ocurre durante la extracción y el largo plazo operativo de cargas.

2.8.1.2 *Tubería PE.* Son adecuados tubos de cualquier tipo de polietileno de alta densidad (HDPE) o polietileno de densidad media (MDPE) para la perforación direccional. Las especificaciones de tuberías de PE incluyen especificaciones D2447, D2513, D3035, y F714. Si tal tubería es proporcionada en segmentos cortos, las unidades individuales deben ser conectadas mediante una técnica de fusión de tope de acuerdo con la Práctica F2620. Esto permitirá que la fuerza inherente de la tubería PE se mantenga durante el proceso de colocación y cuando sean sometidas a otras tensiones operativas. Las tuberías de diámetro pequeño, de longitud continua pueden ser proporcionadas en carretes. La Tabla X1.1 da valores de módulo y resistencia para HDPE presión nominal típica y resinas MDPE.

2.8.1.3 *Aplicaciones para "Cable Conduit".* Para la aplicación en cables conduit, incluyendo la energía eléctrica y telecomunicaciones, la tubería de diámetro pequeño puede ser suministrada en un carrete continuo, incluyendo la línea de tracción interna o el propio cable, como preinstalado por el fabricante. Además, puede proporcionarse la tubería con la superficie interior PRELUBRICADA. Tales características serán de acuerdo con lo especificado por el propietario o ingeniero. Los requisitos para aplicaciones de telecomunicaciones, incluyendo Tubos de HDPE con diversos perfiles de la superficie interna, incluyendo pared lisa o acanalada se especifican en TR-NWT-000356.

## **2.8.2. Cargas en la tubería**

2.8.2.1 *Cargas operacionales y de instalación.* La tubería será sujeta a cargas durante su operación a largo plazo y durante el proceso de instalación. Es responsabilidad del propietario (o contratista del dueño o ingeniero) determinar el diseño y selección de la tubería para servir la función prevista y resistir las condiciones operativas en el direccionamiento de perforación de sección, así como en otras secciones a lo largo de la línea de tubería. Estas prácticas se ocupan, principalmente, con las cargas impuestas durante el proceso de perforación direccional y cargas de tierra y de agua subterránea durante el funcionamiento (post-instalación).

2.8.2.2 *Cargas de presión Internas (Operacional).* Es responsabilidad del propietario (o contratista del dueño o ingeniero) determinar el diámetro nominal y espesor de pared

apropiado para la aplicación prevista. Por ejemplo, si la tubería será utilizada para el flujo a presión de líquidos o gases, es necesario determinar el diámetro nominal basado en los requisitos de capacidad de flujo y el espesor mínimo de la pared (o DR) para resistir las correspondientes tensiones circunferenciales en un plazo largo base. Las Especificaciones D2513, D3035, o F714 pueden utilizarse para determinar una estimación inicial de la correspondiente de relación máxima de dimensiones (DR) para tubería de PE.

2.8.2.3 *Cargas Externas (Operacional) de hidráulica y tierra.* La tubería será sometida a la presión externa hidrostática debido a la altura de agua o fluido de perforación (o suspensión) por encima de la profundidad máxima de colocación en relación con el punto de entrada o salida, y mucha carga viva y muerta por medio de la transferencia de deformación de la tierra alrededor de la perforación. Si la deformación es mínima (tal como en roca) o no se deforma la tubería, la única carga aplicada a la tubería es la presión externa hidrostática. Cuando la carga de tierra llega a la tubería, pueden ser anticipados la reducción de carga geostático (arqueadas). Las reducciones pueden ser significativos cuando el suelo en sitio es normal o más consolidada. Por otro lado, bajo suelos consolidados como depósitos fluviales, la carga de tierra en el tubo puede ser igual a la carga de prisma (ajustado por flotación en el caso de un cruce de río). La presión externa aplicada al tubo es igual a la tensión total, es decir, es la suma de la presión efectiva la tierra, la reducción de arqueo, y la presión hidrostática. En algunos casos, la presión del lodo de la lechada compensará la presión de la tierra. Como la carga aplicada a tierra es direccional con el tubo perforado depende de la profundidad de la cubierta, diámetro del pozo de sondeo, propiedades de barro de lodos, taladrado, extracción y de técnicas en las propiedades del suelo en sitio, entre otras cosas, debe ser consultado un ingeniero geotécnico. Ver X2.2 para cálculos de carga de tierra en discusión. La presión puede ser de carga viva transmitida a la tubería direccional superficial de perforación. Para aplicaciones superficiales, es probable de que el tubo se someta a presiones de la misma carga viva y tierra como un tubo enterrado.

2.8.2.3.1 *Presión externa neta.* La presión neta externa,  $P_{neta}$ , es la presión diferencial entre el interior y exterior de la tubería. La carga operativa externa aplicada a la tubería puede disminuir o ser totalmente compensada por la presión interna que ocurre dentro de la tubería. Del mismo modo, la carga externa puede aumentar con la aparición de la presión negativa (vacío) dentro de la tubería. La presión externa de red puede variar en diferentes momentos

en la vida de la tubería. Por ejemplo, durante presurizado de flujo, la presión externa neta puede ser cero, pero durante una parada, o antes del servicio, una considerable presión externa puede ser aplicada. El análisis debe ser de todo el potencial cargas externos, eventos internos de presurización o de vacío, y de la duración de su ocurrencia, de modo que la red de presión externa y su duración se determina para cada ciclo de la vida útil de la tubería.

2.8.2.4 *Resistencia de la tubería a cargas externas.* La tubería debe ser de espesor suficiente (o la relación de DR) para soportar la presión externa neta sin colapsar o desviarse indebidamente durante cada ciclo de la vida operativa de la tubería. (El efecto de las cargas hidrostáticas externas aplicadas durante la fase de instalación se tratan en 2.8.2.8.2).

NOTA 6: La fórmula general de Spangler Iowa no es aplicable para la tubería direccional en perforaciones como el barro en suspensión (a menos que ya haya cimentado) sobre la configuración se desarrolla solo la consistencia de una arcilla blanda que no proporcionará soporte lateral significativa para la tubería.

2.8.2.4.1 *Deflexión de Tubería (Ovalidad).* La deflexión reduce la resistencia de la tubería a presión externa de colapso. Cargas de tierra, flexión longitudinal (curvatura trayectoria de perforación) y fuerzas de flotabilidad durante la instalación producirán deflexión en la tubería. Las fórmulas para calcular la deflexión de carga de la tierra, la flotabilidad deflexión y la deflexión inducida por curvatura, junto con los límites admisible de deflexión se dan en el Apéndice X2. Cuando la trayectoria de curvatura de perforación se limita a las directrices dadas en la Nota 7 y la DR es de 21 o menos, la ovalidad por la flexión longitudinal generalmente puede ser ignorada. Llenar el tubo con agua durante la operación de colocación reducirá la fuerza de flotación (ver 2.8.2.6) y eliminar, en gran medida, el posible colapso a corto plazo. La presión externa efectiva sería entonces igual a la que corresponde a la diferencia de presión externa real debido a la cabeza de perforación de lodo, menos la presión interna por el agua dentro de la tubería.

2.8.2.4.2 *Colapso sin restricciones.* La siguiente versión de La ecuación de Levy puede utilizarse para determinar la presión externa permitida para tubería de perforado direccional:

$$P_{ua} = \frac{3E}{(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{DR-1} \right)^3 \frac{f_o}{N} \quad (5)$$

Donde:

$P_{ua}$  = Presión externa de colapso admisible, psi (kPa),

$E$  = Módulo aparente (corregido con tiempo), psi (kPa), para el grado de material usado para elaborar la tubería y tiempo y temperatura de interés,

$\mu$  = Razón de Poisson (Carga a largo plazo = 0,45, a corto plazo =0,35)

DR = Razón de dimensión (OD/t)

$f_o$  = Factor de compensación por ovalidad (ver Figura 2), y

$N$  = Factor de seguridad, generalmente 2,0 o mayor.

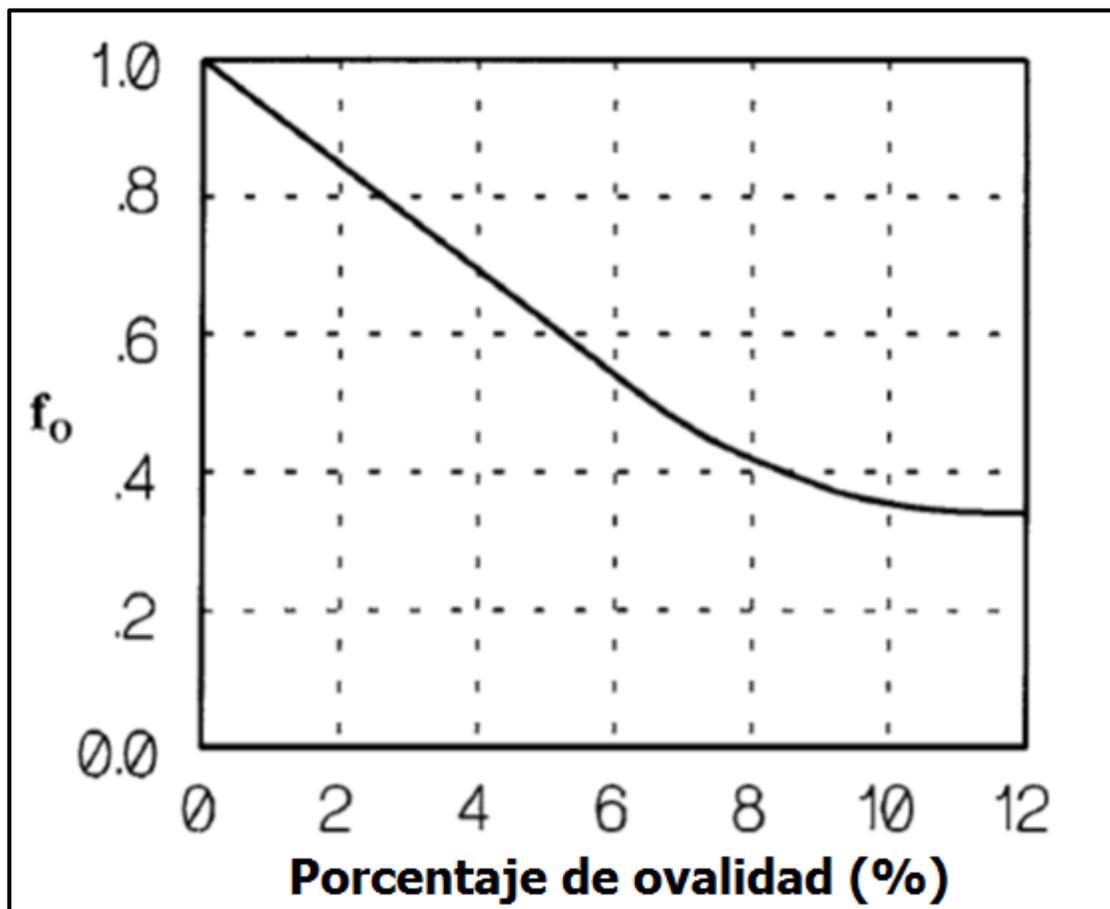


Figura 6. Factor de compensación de ovalidad.

Para el diseño, la presión de colapso permisible,  $P_{ua}$ , debe ser igual o superior a la presión efectiva neta,  $P_{net}$ . El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son una función de la

duración de la carga esperada. Los valores de módulo se dan en la Tabla X1.1. Si el factor de seguridad en la ecuación de Levy se establece igual a uno, la ecuación da la presión de colapso crítico (pandeo). La Tabla X1.3 da la presión de colapso crítico para diferentes DR de Tuberías de HDPE. Para fines de diseño, la presión de colapso crítico debe reducirse por un factor de seguridad y por la compensación de ovalidad para obtener una tensión admisible,  $P_{ua}$ . Cuando se utiliza la Tabla X1.3 para la determinación de la resistencia del tubo al pandeo durante el halado, se requiere una reducción adicional para tensiones de tracción. En general, si el valor DR resultante es menor que la determinada por el criterio de selección iniciales basados en las consideraciones de presión interna, el valor más bajo requerido debe utilizarse como el correspondiente a un tubo más grueso y más fuerte.

2.8.2.4.3 Para una tubería que será apoyado por el mortero de relleno, la presión permisible aumenta el colapso externo (se ve reforzada) por un factor de aproximadamente 4. En consecuencia, la presión permisible obtenida de la ecuación de Levy, la ecuación 5, puede aumentarse por un factor de 4. Sin embargo, la mejora no será aplicable a la tubería sin apoyo hasta que la lechada sea plenamente efectiva. Puede suponer un período de una semana conservadoramente.

2.8.2.5 *Esfuerzo axial de flexión.* Los radios de curvatura para segmentos de la ruta perforada, como se indica en la Figura 5, debe ser lo suficientemente grande como para asegurar un esfuerzo mínimo de flexión y deformaciones dentro de la tubería o conducto. El mínimo radio recomendado de curvatura puede ser proporcionado por el fabricante, y corresponde al siguiente nivel pico axial de deformación:

$$\varepsilon_a = \frac{D}{2R} \quad (6)$$

Donde:

$\varepsilon_a$  = Deformación axial pico, pulg./pulg. (mm/mm),

D = Diámetro externo de la tubería, pulg. (mm), y

R = Radio local de curvatura, pulg. (mm).

El esfuerzo axial de flexión puede ser calculada por:

$$\sigma_a = E_a \varepsilon_a \quad (7)$$

Donde:

$\sigma_a$  = Esfuerzo axial pico, psi (kPa),

$E_a$  = Módulo de elasticidad aparente, psi (kPa) (see Table X 1.1).

NOTA 7: Algunos fabricantes de tubos de PE recomiendan una relación de curvatura de diámetro de aproximadamente 40 o 50 a 1 durante halado para minimizar el efecto de ovalización, por cargas de tracción.

Ver X2.5 para calcular la ovalización inducida por la curvatura a flexión.

2.8.2.5.1 La tubería PE en general, las barras de perforación relativamente rígidas requerirán considerablemente radios más grandes de curvatura que la tubería PE flexible. Para pasar debajo de un obstáculo importante, tal como un río, los radios de trayectoria resultante son típicamente, al menos, un orden de magnitud mayor que el mínimo recomendado para el tubo de plástico. Las deformaciones correspondientes de flexión y tensiones son, por lo tanto, generalmente, no de gran importancia. Sin embargo, la curvatura necesaria del tubo para entrar o salir del agujero de perforación puede ser más severa y debe ser controlado, externamente, para evitar deformaciones o tensiones excesivas en estas áreas.

2.8.2.6 *Fuerza de halado.* La operación de halado de tuberías se ilustra en la Figura 5, que muestra la geometría de la trayectoria, incluyendo las curvas de profundidad, de entrada y salida, y un posible segmento intermedio directamente debajo del río o un obstáculo para ser cruzado. La fuerza de tracción requerida en el extremo delantero de la tubería producto variará durante la operación y, en general, menor que el experimentado en el equipo de perforación, por la carga adicional en el equilibrio de la sarta de perforación todavía dentro del agujero de perforación y por a cualquier operación de escariado simultánea. La fuerzas de tracción sobre la tubería resultante de las fuerzas fraccionadas de arrastre, actuando sobre los lados de la tubería, por el peso o las fuerzas de flotabilidad medida que se tira a lo largo de los hoyos, amplificaciones de fuerza por tirar de la tubería alrededor de las curvas, y la resistencia

según la rigidez de la tubería. Las fuerzas resultantes dependerán si la tubería está vacía o deliberadamente cargadas (por ejemplo, llena de lastre) para reducir la flotabilidad. Para los efectos de estimar la fuerza máxima en la tubería producto, la carga se calcula a los 4 puntos de transición, A, B, C, D muestra en la Figura 1. La mayor carga en la tubería sería típicamente en el punto D. Las cargas correspondientes pueden ser estimadas por las ecuaciones siguientes:

$$T_A = \exp(v_a \alpha)(v_a w_a (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)) \quad (8)$$

$$T_B = \exp(v_a \alpha)(T_a + v_b |w_b| L_2 + w_b H - v_a w_a L_2 \exp(v_a \alpha)) \quad (9)$$

$$T_C = T_B + v_b |w_b| L_3 - \exp(v_b \alpha)(v_a w_a L_3 \exp(v_a \alpha)) \quad (10)$$

$$T_D = \exp(v_b \beta)(T_C + v_b |w_b| L_4 - w_b H - \exp(v_b \alpha)(v_a w_a L_4 \exp(v_a \alpha))) \quad (11)$$

Donde:

TA = Fuerza de halado en la tubería en el punto A, Lbf (N),

TB = Fuerza de halado en la tubería en el punto B, Lbf (N),

TC = Fuerza de halado en la tubería en el punto C, Lbf (N),

TD = Fuerza de halado en la tubería en el punto D, Lbf (N),

L1 = Largo adicional requerido por la tubería para manejo y contracción térmica, ft (m),

L2 = Distancia horizontal para lograr la profundidad deseada, fy (m),

L3 = distancia transversal adicional a la profundidad deseada, ft (m),

L4 = distancia horizontal para levantar a la superficie, ft (m),

H = profundidad de la perforación desde la superficie del suelo, ft (m),

Exp (X) = ex, donde e= logaritmo natural base (e = 2,71828),

$v_a$  = coeficiente de fricción aplicable a la superficie antes de que la tubería entre a la perforación.

$v_b$  = coeficiente de fricción aplicable dentro de la superficie antes que la tubería entre a la perforación o después (húmedo) de que la tubería salga.

$w_a$  = peso de la tubería vacía, lbf/ft (N/m),

$w_b$  = fuerza boyante neta en la tubería dentro de la perforación, lbf/ft (N/m),

$\alpha$  = ángulo de la perforación a la entrada de la tubería (o HDD salida, al lado opuesto del escariador) rad, y

$\beta$  = ángulo de la perforación a la salida de la tubería (o HDD entrada, al mismo lado del escariador) rad.

Los factores exponenciales corresponden al efecto cabrestante, lo que refleja el aumento de la presión de apoyo causada por el tubo tirado contra la superficie interior de la curva.

NOTA 8: Aunque el valor real de L1 puede ser considerado aproximadamente 100 pies (30 m) para permitir el manejo en ambos extremos de la perforación, incluyendo la posible contracción térmica, se recomienda que sea utilizado un mayor valor de L1 (por ejemplo, 200 a 250 pies (60 a 75 m)) en la ecuación 8 a tener en cuenta la longitud de la trayectoria real a lo largo del arco. En algunos casos, L3 puede ser igual a cero.

NOTA 9: Eq 8-11 Se basa en la suposición de que el pozo de sondeo está abierto sin colapsos, curvatura gradual (por ejemplo, no hay quiebres a escuadra desde correcciones de dirección), la remoción de los recortes es casi completa, una baja viscosidad de suspensión está presente, y la circulación de fluido se mantiene por medio del orificio. La fuerza de retroceso calculada, TD, típicamente será menor que la fuerza real de retroceso experimentado durante la instalación. Cuanto más calcen cerca del orificio las condiciones anteriores, la fuerza de retroceso real (15, 16) será más cerca al valor calculado. Deberá ser aplicado el criterio ingenieril cuando las condiciones de perforado se desvían de las condiciones descritas anteriormente.

2.8.2.6.1 Si la longitud del tubo adicional (para acomodar posteriormente elástico, viscoelástico, o contracciones térmicas) es tirado a través del agujero de perforación mediante el uso de una fuerza de tracción aplicada en una dirección horizontal en el lado de equipo de perforación, lo que resulta en una curva adicional de ángulo  $\beta$  en la superficie, puede haber un

mayor aumento de la fuerza de tracción TD. La fuerza total correspondería a la de multiplicar el valor de TD, tal como es calculo por la ecuación 11, por el factor adicional  $\exp(v\beta)$ . Además, dependiendo de la magnitud de la fuerza total y el radio de curvatura local en este punto, la presión de apoyo de la pared lateral correspondiente en el interior de la curva puede causar colapso de la tubería o conducto. Este procedimiento por lo tanto, debe evitarse, en lugar de tirar una longitud adicional del tubo en una dirección a lo largo del ángulo de salida de la tubería (entrada taladro).

*2.8.2.6.2 Rigidez de la tubería.* Las ecuaciones en 2.8.2.6 no hacen cuenta de forma explícita de la resistencia debido a la rigidez del tubo en curvas a lo largo de la trayectoria de perforación. Este efecto se reduce, suficientemente, para grandes radios y mayor distancia dentro del taladro, pero aún pueden representar una contribución significativa. Por lo tanto, la ecuación 8-11 y deben ser considerados los cálculos asociados principalmente como estimaciones para los fines de la investigación de la viabilidad global de la instalación y proporcionar una comprensión del efecto de los otros parámetros. Los procedimientos operativos (Sección 2.9) incluyen métodos para limitar la fuerza real de halado aplicada a la tubería para proporcionar confianza en la integridad de la tubería instalada.

*2.8.2.6.3 Coeficiente de Fricción.* El coeficiente de fricción depende de las características de las superficies de apoyo entre sí, la presencia de cualquier lubricación, y si hay un movimiento relativo entre las superficies. El grado de fricción inmediatamente antes de deslizamiento es generalmente mayor que el nivel durante el posterior deslizamiento. Aunque las interrupciones breves son necesarias en el proceso de colocación durante la extracción de la brocavarillas durante la operación de retroceso, es importante intentar completar la operación sin interrupciones extensas, que puede permitir que la perforación colapse o que la tubería sea incrustada en el suelo circundante. El valor para  $v_b$  representa el valor lubricado para el tubo en el orificio de la perforación rodeado mediante suspensión fluida y barro suponiendo un mínimo de interrupciones. Se recomienda que el tubo externo para la perforación sea apoyado tal que proporcione un valor tan bajo de coeficiente de fricción como sea posible.

NOTA 10: Los valores sugeridos de diseño para los coeficientes de fricción  $v_a$  y  $v_b$  son 0,5 y 0,3, respectivamente. Cuando se coloca la tubería en los rodillos,  $v_a$  es típicamente considerado igual a 0,1.

2.8.2.6.4 *Tubería Múltiple*. Si más de una tubería (es decir, un haz de tubos de diámetro pequeño) se tira simultáneamente en la perforación, resultarán mayores cargas generales debido a un mayor peso o la flotabilidad de la combinación, así como un coeficiente de fricción  $v_b$  efectivo y amplificado dentro del agujero. El grado de amplificación dependerá de la relación entre la tubería y los diámetros de los agujeros, reduciéndolo al mínimo para una mayor distancia dentro del pozo de sondeo.

2.8.2.6.5 *Peso Efectivo y Fuerzas de flotabilidad* El peso de la tubería vacía o conducto puede ser obtenido a partir del fabricante, o puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$w_a = \pi D^2 \frac{(DR-1)}{DR^2} \rho_w \gamma_a \quad (12)$$

Donde:

$w_a$  = Peso de la tubería vacía, lbf/in. (N/mm),

$\gamma_a$  = gravedad específica del material de la tubería (por ejemplo, 0,955 para PE),

$\rho_w$  = densidad del agua, lbf/in<sup>3</sup>. (N/mm<sup>3</sup>) y

D = diámetro externo de la tubería, in. (mm).

Nota 11: la densidad del agua es  $3,61 \times 10^{-2}$  lbf/in<sup>3</sup>. ( $9,80 \times 10^{-6}$  N/mm<sup>3</sup>)

La fuerza neta (hacia arriba) de empuje sobre el tubo vacío rodeado por un fluido de perforación o suspensión de lodo puede calcularse por:

$$w_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_w \gamma_b - w_a \quad (13)$$

$$w_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_w \left( \gamma_b - \frac{4\gamma_a(DR-1)}{DR^2} \right) \quad (14)$$

Donde  $\gamma_b$  es igual a la gravedad específica de la lechada cementicia

Si el tubo se llena con agua o fluido para servir como lastre, la fuerza de flotación se reduce y se da mediante:

$$w_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_w (\gamma_b - \gamma_c \left(1 - \frac{2}{DR}\right)^2) - w_a \quad (15)$$

$$w_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_w \left( \gamma_b - \gamma_c \left(1 - \frac{2}{DR}\right)^2 - \frac{4\gamma_a(DR-1)}{DR^2} \right) \quad (16)$$

Donde  $\gamma_c$  es la gravedad específica del fluido de lastre.

Si la tubería se llena con agua, entonces  $\gamma_c = 1$ ; si la tubería se llena con el fluido de bentonita (lo cual se da si esta termina abierta, el agarre de tracción es usado dado que permite al fluido de perforación o lechada entrar a la tubería) entonces  $\gamma_c = \gamma_b$  y la forma se convierte en:

$$w_b = \pi D^2 \rho_w \left( \gamma_b - \gamma_c \right) - \frac{DR-1}{DR^2} \quad (16)$$

Para tuberías PE, estos procedimientos resultan típicamente en una menor fuerza de halado requerida a la calculada con la ecuación 8-11.

2.8.2.6.6 *Presión hidrocínética*. Existe un gradiente de presión durante la operación de halado de tubería correspondiente, el cual es necesario para verter el fluido de perforación del agujero, hacia el área de entrada de la tubería. Los golpes adicionales de presión son posibles por tasas de tracción no uniformes (2,3). El flujo del fluido de perforación a lo largo de la longitud de la tubería da como resultado en una fuerza de arrastre que puede estimarse, considerando un equilibrio de las fuerzas que actúan sobre el anillo de líquido en el orificio por la presión hidrocínética y las fuerzas de cizallamiento laterales que actúan sobre el tubo y paredes de la perforación:

$$\Delta T = \Delta P \frac{\pi}{8} (D_{hole}^2 - D^2) \quad (18)$$

Donde:

$\Delta T$  = Fuerza de halado incremental, lbf (N).

$\Delta P$  = Presión hidroneumática, psi (kPa  $\times 10^{-3}$ ), y

$D_{hole}$  = Diámetro de escariador, in. (mm).

Nota 13:  $\Delta P$  es estimado para ser 10 psi (70 kPa) (2,7).

El término  $\Delta T$  puede añadirse a las fuerzas de tracción calculadas por la ecuación 8-11 para obtener la fuerza de tracción total en cada punto correspondiente de la instalación. Esto se muestra explícitamente en la ecuación 19.

NOTA 14: Para un haz de tubos, el  $D^2$  término de la ecuación 18 se sustituye por una suma equivalente a las cantidades correspondientes (diámetros cuadrados) para los tubos individuales.

2.8.2.7 *Esfuerzos axiales en tracción.* El esfuerzo promedio axial que actúa en la sección transversal de la tubería en el punto A, B, C, o D, incluyendo el incremento de la presión hidrocínética, está dada por:

$$\sigma_i = (T_i + \Delta T) \frac{1}{\pi D^2} \left( \frac{DR^2}{DR-1} \right) \quad (19)$$

Donde:

$T_i = T_A, T_B, T_C,$  o  $T_D,$  lbf (N), y

$\sigma_i =$  Esfuerzo correspondiente, psi ( $\text{kPa} \times 10^{-3}$ ).

El mayor esfuerzo axial promedio ocurrirá al tirar la cabeza. Sin embargo, dependiendo de la curvatura de la trayectoria de perforación, el pico de estrés a la tracción no puede producirse en el cabezal de tracción, pero sí puede producirse en una curva. En la curva, la tensión máxima a la tracción, por la flexión se produce en las fibras exteriores de la tubería. Para cada curva, la máxima tensión de tracción es igual a la suma de las tensiones de flexión, como se aprecia en la ecuación 7, por la curvatura y la tensión axial promedio en ese punto, según la tracción. La tensión de tracción máxima para cada curva debe ser determinada y comparada con el promedio axial de tensión en el cabezal de tracción para determinar la tensión máxima a la tracción,  $\sigma_p$ , que ocurre en el tubo:

$$\sigma_{pi} = \sigma_i + \sigma_{ai} \quad (20)$$

Donde:

$\sigma_{pi}$  = Esfuerzo de tensión máximo al punto i-th (donde i= A, B, C, o D), psi (kPa),

$\sigma_i$  = Esfuerzo de tensión axial promedio en el punto i-th (donde i= A, B, C, o D), psi (kPa),

$\sigma_{ai}$  = Esfuerzo de la fibra externa (eq 7) en el punto i-th (donde i= A, B, C, o D), psi (kPa).

8.2.7.1 *Esfuerzo a tracción permitido* El esfuerzo pico de tensión,  $\sigma_p$ , debe compararse con el esfuerzo de tracción admisible en la temperatura de instalación prevista. Por lo tanto, se requiere que:

$$\sigma_p \leq SPS \quad (21)$$

Donde SPS es igual a al esfuerzo de tensión admisible, psi (kPa  $\times 10^{-3}$ ) a la temperatura de la instalación prevista. Bajo carga continua, el polietileno sufre una deformación de fluencia. Por lo tanto, los valores de esfuerzo de tracción admisibles se dan a lo largo del tiempo y dependen de la temperatura. Ver Tabla X1.1 para valores típicos de MSF. El intervalo para la instalación depende de la longitud y la tasa de retirada de la tubería. Las tasas de halado son del orden de varios pies por minuto, dependiendo de las condiciones del suelo. Si se prevé que el proceso de perforación hacia atrás será lento y difícil (véase la Sección 2.9), se recomienda que una operación de preescariado separado sea usado para permitir un retroceso posterior rápido de tuberías y un intervalo más corto para fuerzas de tracción de la instalación para ser aplicada.

2.8.2.7.2 Si es necesario, la presión sobre el tubo de PE o conducto se puede reducir aumentando el grosor de la pared del tubo (es decir, menor valor SDR) o, posiblemente, reduciendo la fuerza de flotación neta llenando el tubo con el lastre de fluido (como se describe en 2.8.2.7.1).

2.8.2.8 *Esfuerzo de torsión.* El esfuerzo de torsión es eliminado o minimizado mediante el uso de un pivote en el extremo delantero de la tubería.

Sección 2.9 proporciona información para la selección de un giro adecuado.

2.8.2.9 *Cargas combinadas durante la instalación.* Los cálculos permiten una selección preliminar de la tubería DR consistente con las características de la aplicación, instalación y la ruta prevista. Es necesario, sin embargo, considerar, finalmente, en la instalación general las tensiones, causadas a la combinación de cargas las cuales están siempre presentes simultáneamente. Si los esfuerzos combinados no están dentro del margen de diseño global

deseada, puede ser necesario seleccionar un tubo de pared más gruesa o modificar la instalación parámetros para aliviar las tensiones resultantes.

2.8.2.9.1 *Reducción de la fuerza de colapso en la tubería PE.* Para el PE, la presencia de una carga de tracción axial tendrá una tendencia a reducir la resistencia a corto plazo de que la tubería colapse bajo una presión externa, según se estimó de otra manera de la ecuación 5. Además, el incremento de la presión hidrocínética en el extremo delantero de la tubería también aumenta la presión hidrostática externa durante este período. La ecuación modificada para tener en cuenta estos efectos es:

$$P_{pba} = \frac{2E}{(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{DR-1} \right) \frac{f_o f_R}{N} \quad (22)$$

Donde  $f_R$  es el factor de reducción de la fuerza de tensión, dada por:

$$f_R = \sqrt{5,57 - (r + 1,09)^2} - 1,09 \quad (23)$$

Y

$$r = \frac{\sigma_i}{2(SPS)} \quad (24)$$

$\sigma_i$ = Esfuerzo axial promedio de halado de la ecuación 19, psi (kPa), y

SPS= Esfuerzo de halado de seguridad, psi (kPa).

La presión de colapso permitida,  $P_{pba}$ , debe ser igual o exceder la suma de la presión neta efectiva durante el halado y la presión hidrocínética:

$$P_{pba} \geq P_{eff} + \Delta P \quad (25)$$

Donde

$P_{eff}$ = Presión neta efectiva que actúa en la tubería durante el halado, psi (kPa), y

$\Delta P$ = Presión hidrocínética, psi (kPa).

NOTA 15: El valor del módulo utilizado en la ecuación 22 y en el cálculo de la deflexión para determinar la ovalidad para su uso en la ecuación 22 durante halado debe ser seleccionado para que coincida con el intervalo del halado.

2.8.2.9.2 El término presión externa efectiva neta,  $P_{eff}$ , en la ecuación 25 corresponde a la cabeza externa de fluido de perforación o lodo, reducido por la presión interna, por cualquier fluido utilizado como lastre. Para el caso de una garra de tracción de composición abierta que permite el fluido de perforación servir como lastre (véase 2.8.2.6.5), la presión efectiva externa neta,  $P_{eff}$ , incluyendo la presión hidrocínética, es insignificante y la posibilidad de un colapso según la presión exterior durante la etapa de instalación se elimina esencialmente.

2.8.2.9.3 *Efectos térmicos.* Los efectos potenciales debido a la expansión térmica pueden ser minimizados al permitir que el tubo llegue a un equilibrio de temperatura con el suelo antes de cortar el tubo para longitud para completar la instalación.

2.8.2.10 *Cargas combinadas durante la Operación.* En general, es responsabilidad del propietario o contratista del propietario o ingeniero asegurar que el diseño será compatible con la operación a largo plazo de la tubería, incluyendo secciones de distancia que se coloca para la operación de perforación, así como secciones en las proximidades del cruce, tanto en la superficie y pasando por debajo del obstáculo.

2.8.2.10.1 *Tensión Térmica.* El esfuerzo de tensión térmica debido a los diferenciales de temperatura existentes durante el proceso de colocación pueden ser considerados pequeños, como se discute en 2.8.2.10. Sin embargo, es posible efectos térmicos durante el funcionamiento a largo plazo, según la expansión o contracción en la superficie, incluso en secciones del cruce perforado, no son específicos a la HDD proceso y deben ser considerados por el propietario como para líneas de tuberías no perforadas, en combinación con las otras contribuciones de estrés.

## **2.9. Aplicación**

**2.9.1. La magnitud de la operación típica y complejidad de los equipos** y sistemas de control, maxi-HDD requieren un equipo altamente capacitado. Ver el manual de perforación mini-direccional horizontal. Está más allá del alcance de esta guía proporcionar procedimientos operativos para los distintos equipos. Dicha capacitación, generalmente, es proporcionada por el fabricante. Los contratistas deben estar obligados a demostrar evidencia de una formación adecuada para sus trabajadores, incluyendo la escuela y campo de experiencia para el personal primarios. Los siguientes artículos representan algunas de las cuestiones relacionadas con el proceso de aplicación para la colocación de la tubería o conducto.

2.9.1.1 *Tamaño de la máquina y Capacidad.* El tamaño y la capacidad del equipo de perforación deben ser compatibles con el empuje y torque de torsión requerido para realizar la perforación, escariado, y el tubo de operaciones de halado. Es difícil estimar las fuerzas del equipo de perforación asociado a la operación de escariado, que puede ser significativamente mayor que la que se aplica directamente a la tubería en sí durante el halado (estimado por las fórmulas en 2.8.2.4), cuando ambas operaciones se realizan simultáneamente en particular. Las fuerzas estimadas aplicadas a la tubería pueden considerarse un requisito de equipo mínimo.

2.9.1.2 *Unidad del taladro de posicionamiento.* La Unidad de equipo de perforación está posicionado consistente con la discusión en la Sección 2.7, el agujero de la ruta deseada y la profundidad de la tubería. El anclaje adecuado es, especialmente, importante para suelos blandos o arenosos.

2.9.1.3 *Perforación y tubos de perforación.* Las operaciones de la HDD comienzan con el orificio piloto inicial. Las diferentes condiciones del terreno requerirán diferentes cabezas tipo de perforación para la operación de perforación piloto. Las varillas de perforación deben ser tan fuertes como la capacidad del equipo. La perforación de ruta prevista también debe ser compatible con las capacidades de la varilla de perforación respecto del esfuerzo de fatiga acumulado (Sección 2.7).

Un cuidado apropiado y buen manejo de las barras de perforación son importantes para evitar roturas durante el taladrado o escariado. Los hilos de la barra deben ser atendidos y debidamente recubiertos (engrasados) cuando se insertan en la sarta de perforación. Se debe aplicar un torque adecuado inicialmente a las barras de perforación a la entrada del orificio para evitar posibles aflojamientos de las varillas y la pérdida de conexión en el suelo.

**2.9.1.4 Tubería de lavado.** Para muchas operaciones maxi-HDD, una tubería de lavado se inserta sobre la sarta de perforación con forme el taladro avanza, debe apoyarse el agujero y reducir el torque. Esta tubería de acero podrá retirarse durante la operación retroensanchamiento. Si no se requiere escariado, la tubería de lavado puede dejarse en su lugar y se utiliza como una carcasa en la que se pueden colocar un grupo de tubos de diámetro pequeño para una operación de tracción independiente más tarde.

**2.9.1.5 Uso del fluido de perforación.** Los fluidos de perforación tienen un rol crítico en las operaciones de maxi-HDD. Los fluidos son el poder del motor de lodo en la parte delantera de la sarta de perforación que perfora el agujero piloto. El fluido también proporciona lubricación durante la perforación piloto, escariado, y las operaciones de halado para reducir el torque y el empuje requerido o cargas de halado. Además, el fluido de perforación estabiliza el agujero perforado, refresca la cabeza de perforación (y circuitos internos), y elimina esquejes y sedimento. Los trabajadores deben estar capacitados en el uso adecuado de los fluidos de perforación y los tipos apropiados para diferentes condiciones de terreno. Tenga en cuenta de que presiones excesivas de fluido de perforación o volúmenes pueden resultar en problemas mayores de eliminación en lugares de superficie no deseados cuando los fluidos penetran por medio de fisuras.

## **2.9.2. Seguimiento y localización**

**2.9.2.1 Ubicación Intervalo.** Para mantener la perforación actual a lo largo de la ruta prevista, el orificio piloto debe ser cuidadosamente seguido y confirmado a lo largo de la ruta establecida, al menos, una vez cada 30 ft (10 m) intervalo (por ejemplo, cada vez que se adiciona una barra de perforación). Para caminos con curvas horizontales o verticales, o en áreas críticas incluyendo las inmediaciones de otros obstáculos, se recomiendan intervalos más

pequeños, por ejemplo, 15 pies (5 m). En las zonas con bolsillos de adoquines u otros obstáculos que pueden desviar la cabeza de perforación, deben realizarse mediciones cada vez que se sospeche el contacto con tales obstáculos. Si la cabeza del taladro va mal dirigida esta debe ser corregida tan pronto como sea posible.

**2.9.2.2 Planos de taller (por construir).** Debe presentarse al propietario un registro de la trayectoria actual de perforación a construir, incluyendo vistas de planta y perfil y vertical, y desviaciones horizontales, indicando la relación con el camino previsto, debe ser añadida cualquier información obtenida durante la perforación inicial respecto de las características del suelo, etc. La experiencia adquirida durante la excavación inicial puede ser utilizada para proporcionar una guía en la operación del retroensanchamiento, así como para las operaciones posteriores en el área del proyecto. También, debe incluirse información adicional, como de dirección o de corrección de comandos, el uso de fluido de perforación, y el tipo de cabeza de perforación que se utiliza. En cuanto a la escariado y operaciones halado, la velocidad de la introducción del tubo, duración, tipo y el tamaño de escariadores (cortadores o compactadores), tamaño de perforación definitiva, uso fluido de perforación, y fuerzas de halado requerido deberían ser registradas.

**2.9.3. Escariado.** En algunas aplicaciones maxi-HDD, la operación de retroensanchamiento para aumentar el tamaño del agujero puede no ser necesaria (por ejemplo, cuando es un pequeño tubo es el que va a ser recogido en el agujero de taladro inicial o, posiblemente, un haz de tubos de diámetro pequeño serán tirados por la tubería de lavado restante en un procedimiento separado después de la finalización de la operación de HDD). Sin embargo, una operación de retroensanchamiento se realiza típicamente para producir un agujero de tamaño suficientemente grande para instalar fácilmente el tubo(s) o conducto. Se requieren cortadores apropiados y compactadores compatibles con las condiciones del suelo, incluyendo el uso apropiado del fluido de perforación. En algunos casos, pueden ser operaciones necesarias varios escariados (es decir, preescariados). En general, el preescariado no es requerido para la colocación de tubo de 20 pulg. (500 mm) o menos de diámetro, el escariado y el tubo de retroceso pueden realizarse de forma simultánea. Las operaciones de preescariado permiten agujeros relativamente grandes para ser creados en etapas, lo que reduce el torque requerido y cargas de empuje en la máquina. Para instalaciones difíciles se

prevé una alta carga de tracción, una operación de preescariado ayuda a garantizar que no se supere la capacidad de la máquina por las fuerzas combinadas por el aumento del diámetro del agujero y el halado de la tubería. La operación de retroceso también puede ser entonces realizada a un ritmo más rápido, reduciendo el tiempo en que la tubería está bajo carga axial. Además, el pre-escariado reduce la posibilidad de huecos, agitación de la superficie o asentamientos, incluyendo la aparición de fluidos imprevistos en la perforación. El incremento en el diámetro de la perforación deben ser restringido a aproximadamente 10 pulg. (250 mm) o menos durante una sola pasada. El diámetro final del agujero es típicamente 50% mayor que el diámetro exterior de la tubería (o haz de tubos) para proporcionar espacio libre para las gasas de tubería, para que dejen fluir la carga, y reducir la cargas requeridas durante la operación de retiro de tuberías. Durante pre-excavado, deben estar disponibles las barras de perforación taladro piloto de salida que están conectados a un pivote en la parte trasera de la escariador y ser halado en el agujero para mantener la trayectoria.

2.9.3.1 *Inyección.* Se ha especificado que la lechada para llenar el anillo del orificio que rodea el tubo(s), puede ser bombeado durante la operación de retroceso, que actúa como fluido de perforación. Sin embargo, si en la retirada se encuentra con alguna dificultad, la lechada puede ser configurada. Debería considerarse la posibilidad de colocar la lechada por medio de una tubería de tirado durante halado. El requisito que se haya establecido en la formulación de la lechada previamente por el propietario y el responsable técnico mediante los estudios superficiales y subsuperficiales preliminares y planificación de rutas, por consideraciones ambientales, o para aumentar la resistencia al colapso a largo plazo de la tubería o proporcionar fuerza adicional o protección mecánica. La lechada requiere una formulación adecuada compatible con la configuración de tiempo de fraguado deseada; se requieren bombas de fluido apropiadas para manejar la mezcla más gruesa de fluido. En casos puede que solo puede ser necesaria para conectar la entrada y salida de penetración puntos, posiblemente utilizando un cemento-bentonita mezcla.

**2.9.4. Sujetando la tubería.** Si no se suministra una longitud continúa en un carrete, se supone que el tubo(s) se han fusionado y probado antes de la terminación de la operación de perforación para evitar demoras innecesarias en completar la instalación. La

excavación y el agujero escariado pueden tender a cerrarse después de un tiempo prolongado o por un colapso inhibiendo significativamente o evitando la inserción de la tubería.

2.9.4.1 Los procedimientos de agarre seguro deben ser utilizados por la distancia de la operación y cargas relativamente elevadas de halado generados. No son recomendados los de tipo cesta o solo las gasas internos. El método de sujeción seleccionado debe permitir esencialmente la calificación de la tracción total de la tubería por desarrollar. Los tipos apropiados pueden incluir una fijación interna / externa o atornillado, o un adaptador de tubería de PE fundido con un ojo para tirar incorporado. En este último caso, una sección de diámetro más pequeño del adaptador puede servir como un enlace de ruptura para proteger la sección principal de la tubería (ver 2.9.4.3). En general, el extremo de la tubería debe ser tapado o sellado para evitar la contaminación durante el halado. Sin embargo, si desea permitirse que la suspensión de lodo sirva como lastre (véase 2.8.2.5), se debe utilizar un método de agarre que permite que el fluido entre en la tubería. Pueden ser jaladas varias tuberías simultáneamente, pero la posición de las empuñaduras debe estar escalonados, si es necesario, para evitar un único gran bulto.

2.9.4.2 *Rótula*. Se requiere una rótula entre el escariador o compactador anterior a la tubería para evitar la transmisión de cargas de torsión a la tubería. La contribución de la rótula debe ser algo mayor que el más bajo de la capacidad de la fuerza de tracción el equipo de perforación o las fortalezas totales del haz de tubos por instalar, pero no excesivamente grande. Las ineficiencias en rótulas excesivamente grandes pueden dar lugar a una importante velocidad transmitida a las barras de perforación.

2.9.4.3 *Enlace de ruptura*. En general, las fuerzas de halado registradas como se indica en el equipo de perforación excederá las tensiones experimentados por el tubo o conducto en la mayor parte del proceso de la retirada. La limitación de estas cargas a la resistencia permitida del tubo será generalmente demasiado conservadora. Es recomendable que se proporcionen enlaces de ruptura entre la pieza giratoria principal y la empuñadura (s) en el tubo(s), debe asegurarse de que las tuberías se instalan dentro de los niveles carga permitida. Los enlaces de ruptura requerirán la remoción del tubo(s) en el extremo de entrada, o posiblemente abandono. Tras una determinación del problema, y una solución apropiada, puede intentarse de nuevo, posiblemente requiriendo una nueva trayectoria de perforación.

2.9.4.3.1 Cada contribución de enlace de ruptura debe estar dentro de la carga de tensión segura, también llamada la carga de tracción permisible de su tubería correspondiente. Ver Tabla X1.1.

2.9.4.3.2 Aunque menos deseable, un solo enlace de ruptura puede ser utilizado para un haz de tubos. Las cargas seguras correspondientes de trabajo para las tuberías individuales en el paquete son añadidas para determinar la carga máxima de seguridad total y la contribución correspondiente del enlace de ruptura. Si se utiliza una rótula de ruptura como un enlace de ruptura, y no está diseñado específicamente para una exposición directa con el suelo, este material debe limpiarse bien después de cada aplicación. El uso de la rótula de ruptura no elimina la necesidad de la pieza giratoria principal que se describe en 2.9.4.2.

2.9.5 *Manejo de la tubería.* Debe tener un extremo cuidado en la manipulación de la tubería para asegurarse de que no está sujeto a curvas excesivamente cerradas que pueden causar una torcedura u otros daños a la tubería. La sección 2.8 proporciona directrices apropiadas, incluyendo la discusión de los efectos combinados de cargas de flexión y la tensión en la tubería. Las áreas particulares de preocupaciones típicamente incluidas la entrada de tubería o puntos de salida. Es importante reducir al mínimo la flexión de la tubería a medida que entra el taladro, de acuerdo con 2.7.3, 2.7.4.4 y 2.8.2.7, y para asegurar una baja fricción en la parte del tubo fuera del agujero. Esto puede lograrse con el uso de equipo de elevación adecuado y el rodillo para reducir fricción. Por la carga potencialmente alta a la tracción a la salida de la tubería, es especialmente importante evitar curvas cerradas en este punto.

## **2.10. Inspección y limpieza de sitios**

**2.10.1. Finalización e inspección.** Es necesario minimizar cualquier tensión o deformación restantes en la tubería después de la instalación, por las fuerzas de tracción impuesta y el potencial de expansión o contracción térmica. Por lo tanto, el tubo debe ser capaz de alcanzar el equilibrio mecánico y térmico con su entorno antes de cortar el tubo en cualquiera fin. Un corte prematuro del tubo puede permitir que los extremos se encojan de

nuevo en el agujero. El tubo puede cortarse después de que ha verificado que no ha habido un movimiento insignificante en el tubo de extremo de entrada y una carga despreciable de tensión residual en el equipo de perforación. Si se le fue permitido entrar en el tubo a cualquier suspensión fluida para funcionar como lastre (véase 2.8.2.6), el fluido debe ser purgado y el tubo bien lavado y limpiado.

2.10.1.1 *Integridad.* Algunas tuberías, como para gas o transporte de líquido, pueden requerir pasar una prueba de presión hidrostática o de fugas, antes o después del halado o ambos, según lo especificado por el propietario. Para las tuberías utilizadas como vías para cables, la integridad de la ruta deberá ser verificada halando los "pigs" (calibrador tipo "paso no pasa") por medio de la tubería pre instalada del empalme o terminación.

2.10.1.2 *Inspección visual.* La tubería que sale del agujero de excavación no debe mostrar signos de cedencia o de formación de cuellos. La superficie de la tubería debe ser inspeccionada por rasguños. Con un exceso del 10% en rasguños en el espesor de la pared debe evaluarse en cuanto a si la tubería es adecuada no para servicio de presión.

2.10.1.3 *trayectoria de perforación.* Los planos a construir deben ser presentados al representante del propietario para indicar que el tubo se colocó en la ubicación adecuada y la profundidad, o dentro de límites aceptables. El mantenimiento de una profundidad mínima adecuada de la cubierta debajo del fondo del río es crítico, incluyendo el margen para tener en cuenta el escurrimiento, para evitar la exposición o daños posteriores. Grabar la ubicación exacta ayudará a evitar daños durante cualquier actividad futura de construcción en la zona. Además, deben ser registrados y proporcionados los registros de fuerzas de halado en la plataforma de perforación, contribución de enlaces de ruptura, velocidad de instalación, diámetro definitivo del agujero, el rejuntado de la información, etc.

**2.10.2. Limpieza.** Después de la inspección y aprobación por parte del propietario o su representante, la superficie debe ser restaurado a su condición original. El sitio debe estar limpio de equipos, herramientas y residuos. Todo fluido de perforación debe limpiarse del sitio o sus proximidades y ser adecuadamente eliminados, de conformidad con la Sección 2.6.

## APÉNDICES

(Información no obligatoria)

### X1. PROPIEDADES DEL MATERIAL DE POLIETILENO

X1.1 *Propiedades de los materiales polietileno* Valores típicos para el módulo de elasticidad aparente y la resistencia a la tracción en 73° F (23 °C) durante densidad media (PE 2406) y de alta densidad resinas de polietileno (PE3408) se presentan en la Tabla X1.1. Consulte con el fabricante para aplicaciones específicas.

TABLA X1.1. Módulo aparente de elasticidad y esfuerzo de halado seguro a 73 °F

	Módulo aparente típico de			Esfuerzo típico seguro de	
Duración	HDPE	MDPE	Duración	HDPE	MDPE
Corto plazo	110 000 psi (800 MPa)	87 000 psi (600 MPa)	30 min	1300 psi (9.0 MPa)	1000 psi (6.9 MPa)
10 h	57 500 psi (400 MPa)	43 500 psi (300 MPa)	60 min	1200 psi (8.3 MPa)	900 psi (6.2 MPa)
100 h	51 200 psi (350 MPa)	36 200 psi (250 MPa)	12 h	1150 psi (7.9 MPa)	850 psi (5.9 MPa)
50 años	28 200 psi (200 MPa)	21 700 psi (150 MPa)	24 h	1100 psi (7.6 MPa)	800 psi (5.5 MPa)

X2. CARGAS DE POSINSTALACIÓN y deflexiones para tuberías de perforado direccional horizontal

X2.1 Carga admisible de tracción La carga de tracción segura para un tubo es igual a su permisible carga de tracción ATL, que puede calcularse a partir de la tensión de tracción segura SPS, como sigue:

$$ATL = (SPS)\pi D^2 \left( \frac{1}{DR} - \frac{1}{DR^2} \right) \quad (X2.1)$$

Donde:

D = diámetro externo de la tubería, in. (mm),

SPS = Esfuerzo de halado seguro, psi (kPa), y

DR = Dimensión del radio de la tubería (diámetro externo menos el espesor de pared).

Para tuberías de gas, ver práctica F1804 para determinar ATL.

X2.2 *Cálculo Presión Tierra* La carga del suelo sobre tubo perforado de forma direccional es esencialmente dependiente de la profundidad de cubierta, diámetro de la perforación, las propiedades del lodo de recubrimiento, y las propiedades *in situ*. Las presiones de tierra y cargas vivas de carga se transfieren al tubo a través de la deformación de la tierra alrededor de la perforación. Como se produce la deformación, se forma una cavidad de restos de suelo suspendida por encima de la perforación. Esta cavidad se llena por desprendimiento del suelo que se encuentra por encima de ella. El proceso hace que el suelo se abulte, es decir, la densidad de del suelo desprendido es menor que la densidad del suelo sin perturbar. El proceso de desprendimiento continúa hasta que se llegue a un equilibrio donde la rigidez del suelo desprendido es suficiente para resistir más desprendimiento de la tierra por encima. Este estado de aumento de volumen resultados en arqueo de carga alrededor de la tubería (es decir, la carga de la tierra aplicada a la tubería es menor que el estrés geostático (o prisma carga). Hay una falta de ecuaciones publicadas para el cálculo de cargas de tierra en tubos direccionales. Sin embargo, las ecuaciones han sido publicadas para el cálculo de las cargas sobre la tubería alzadas con gato hidráulico. Aunque la aplicabilidad de estas ecuaciones para perforación direccional aún no se ha confirmado, es probable aplicarlas cuando la tubería PE es instalada en una suspensión de lodo. El procedimiento de hinca de tubería normal es similar al proceso de perforado direccional sobre corte del agujero, pero el corte descendiente es típicamente menos de 10% del diámetro de la tubería con el tubo levantado, mientras que con

tubos perforados direccionales el sobrecorte puede ser 50%. Las ecuaciones para el cálculo de las cargas que se producen en hincas de tubería debido al proceso de aumento de volumen, están dadas por O'Rourke *et al.* El método de Stein considera que el proceso de arqueado es similar a la zanja de arqueamiento. Sólo el método de Stein dada a continuación como método de O'Rourke, implica extensos cálculos y típicamente resulta en menor carga que el método de Stein. El crédito por arco solo debe considerarse donde la profundidad de la cubierta es suficiente para desarrollar arqueado (por lo general superior a cinco diámetros de tubería), cargas dinámicas tales como las cargas de tráfico o de ferrocarril son insignificantes, el suelo tiene suficiente fricción interna para transmitir arco, según lo confirmado por un ingeniero geotecnista.

X2.2.1 El uso de la ecuación de Terzaghi, tal como figura en la ecuación dada en X2.2. Tenga en cuenta de que el ángulo de fricción, se ha reducido en la ecuación de Terzaghi por 50%.

$$P_{EV} = \frac{k\gamma H}{144 \frac{in^2}{ft^2}} \quad (X2.2)$$

$$K = \frac{1 - \exp(-2 \frac{KH}{B} \tan(\frac{\delta}{2}))}{2 \frac{KH}{B} \tan^2 \frac{\delta}{2}} \quad (X2.3)$$

[Para unidades métricas, el factor de conversión  $144 \frac{in^2}{ft^2}$  debe ser disminuido]

Donde:

$P_E$  = presión externa del suelo, psi (kPa),

$Y$  = peso del suelo, pcf (kN/m<sup>3</sup>),

$H$  = profundidad de cubierta, ft (m),

$B$  = ancho de "silo", ft (m),

$\delta$  = ángulo fricción contra las paredes, grados (para Perforación Horizontal, suponga

$\delta = \varphi$ , y  $\varphi$  = al ángulo interno de fricción, en grados.), y

$K$  = Coeficiente de Presión del suelo dado por:

$$K = \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (X2.4)$$

El ancho del silo debe ser estimado en base a la aplicación. Varía entre el diámetro de la tubería y el diámetro de la perforación. Un enfoque conservador es suponer el ancho igual al diámetro del silo de la perforación. (Si se utiliza el peso efectivo del suelo la presión del agua subterránea se debe agregar de nuevo en la ecuación X2.2 para obtener la presión externa total que actúa sobre la tubería. El peso efectivo del suelo es el peso unitario seco del suelo para el suelo por encima del nivel de las aguas subterráneas; es el peso unitario saturado menos el peso de agua para el suelo debajo del nivel de las aguas subterráneas).

X2.3 *Deflexión de la de tierra* la carga de tierra generalmente aplicada en la corona de la tubería con una reacción invertida. Como la lechada no proporciona soporte lateral, hay poca presión en la línea de aceleración para restringir la deflexión vertical. La resistencia primaria a la deformación se proporciona por la rigidez de la tubería. Considerando que, las cargas reales de suelo ocurrirán durante buena parte de la mitad superior e inferior de la tubería, da dos fórmulas de anillos de deflexión de carga uniforme sobre la mitad superior de una tubería en el apéndice del texto. Una fórmula supone la inversión del tubo se apoya sobre una base rígida, plana, mientras que la otra asume la carga de reacción invertido es uniforme alrededor de la parte inferior medio de la tubería. Ni siquiera el caso se ajusta exactamente a lo que ocurre con el tubo perforado direccional, pero el promedio de las dos fórmulas puede acercarse.

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0.0125 P_E}{\frac{E}{12(DR-1)^3}} \quad (X2.5)$$

Donde:

- D= diámetro de la tubería, in. (mm),
- $\Delta$  = anillo de deformación, in. (mm),
- $P_E$ = presión de la tierra, psi (kPa),
- DR= dimensión del radio de la tubería, y
- E = módulo de elasticidad, psi (kPa).

X2.4 *Flexión boyante* Se produce una diferencia de presión externa entre la corona y el tubo invertido cuando se sumerge en la lechada por la diferencia en la presión de la cabeza por medio de la lechada de la tubería. La diferencia de presión aplica una fuerza que desvía el

inversor hacia arriba, hacia la corona, creando así ovalidad. La desviación está dada por la ecuación X2.6. Esto puede ser convertido a porcentaje de deflexión, multiplicándolo por 100.

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0,1169 \gamma_w \left(\frac{D}{2}\right)^4}{EI} \quad (X2.6)$$

Donde:

$\Delta$  = Deflexión del anillo, in. (m),

D = Diámetro de la tubería. (m),

$\gamma_w$  = Peso del fluido en la perforación. Lbs/in.<sup>3</sup> (para convertir el fluido del peso de Lbs/ft<sup>3</sup> a Lbs/in.<sup>3</sup> divídalo entre 1 728)(kN/m<sup>3</sup>),

E = Módulos de elasticidad, psi (kPa), y

I = momento de inercia de la pared de la tubería sección transversal (t<sup>3</sup>/12), in.<sup>4</sup>/in. (m<sup>4</sup>/m).

Flexión X2.5 Reissner Efecto longitudinal de una tubería induce ovalidad. Para tubos arraigadas este ovalidad es generalmente ignorado, ya que está orientada transversal a la deflexión de carga tierra. En un tubo perforado direccional ovalidad es aditivo a la carga de la tierra deflexión. Para DR 21 o tubos inferiores, cuando el radio de curvatura es mayor que o igual a 40 diámetros de tubería, la ovalidad es insignificante. Ovalidad en términos de porcentaje de desviación puede ser calculado a partir de la ecuación de Reissner:

$$\frac{\Delta y}{D} = \left(\frac{2}{3}\right) z + \left(\frac{71}{135}\right) z^2 \quad (X2.7)$$

$$z = \frac{\frac{3}{2}(1-\mu^2)(D-t)^4}{16t^2R^2} \quad (X2.8)$$

Donde:

$\mu$  = razón de Poisson,

D = OD de la tubería, in. (mm),

t = espesor de pared de la tubería, in. (mm),

R = radio de curvatura, in. (mm), y

$\frac{\Delta y}{D}$  = deflexión en in./in. (mm/mm) (convertir en porcentaje multiplicando por 100)

**X2.6 Límites de la deflexión** El límite de la deflexión (en porcentaje) se determina por la estabilidad geométrica de la tubería desviada, la capacidad hidráulica, y la deformación que

se produce en la pared del tubo. Se ha observado que para el PE, la tasa de presión en la tubería, sometido sólo a la presión del suelo, no hay un límite superior desde un punto de vista práctico para la deformación unitaria de flexión. Por lo tanto, para tubos sin presión o conductos de deflexión de la HDD a largo plazo es 7,5% del diámetro. Cuando se somete a la presión interna además de la presión del suelo, la deformación por flexión localizada resultante de deflexión se combina con el esfuerzo de tracción causado por la presión interna para producir una tracción superior localizada fibra-estrés. Sin embargo, a medida que aumenta la presión interna las tuberías vuelve a redondear y la deformación por flexión se reduce. A altas presiones, la deformación por flexión se reduce y el anillo de esfuerzo de tracción se enfoca únicamente en la presión interna. Para método de cálculo. Este hecho, junto con la ductilidad del PE permite al diseñador ignorar el efecto combinado de la presión y la deflexión. En lugar de un cálculo exacto basado en la deformación unitaria permisible, el diseñador puede usar los valores de diseño de deflexión de la HDD a largo plazo para la tubería de presión que se muestran en la Tabla X2.1.

X2.6.1 Diseño de las deflexiones son para su uso en la selección de DR y para el control de calidad en campo. Deflexiones medidas en campo que excedan la deflexión de diseño no necesariamente indican inestabilidad o sobre-tensado de la tubería. En este caso, un análisis ingenieril de tales tuberías deben realizarse antes de la aceptación.

TABLA X2.1 Valores de diseño seguro a corto plazo enterrado presurizado de tubería de polietileno

DR o SDR	Límite de deflexión como % del diámetro
21	7,5
17	6
15,5	6
13,5	6
11	5
9	4
7,3	3

X3.1 *Presión crítica de pandeo* Tabla X3.1 da la presión de colapso crítico para tubos de HDPE. Los valores no contienen un factor de seguridad ni ninguna compensación por ovalidad o fuerza de tracción. Ver 2.9.2.3.1 para la discusión.

TABLA X3.1. Presión crítica de colapso sin restricciones HDPE tubería A, B, C a 73 °F

NOTE 1: La Tabla no incluye compensación por ovalidad o factor de compensación.

Vida de servicio	7.3	9	11	13.5	15.5	17	21
Corto plazo	1003, 2316, 2045	490, 1131, 999	251, 579, 512	128, 297, 262	82, 190, 168	61, 141, 125	31, 72, 64
100 h	488, 1126, 995	238, 550, 486	122, 282, 249	62, 144, 127	40, 92, 82	30, 69, 61	15, 35, 31
50 años	283, 653, 577	138, 319, 282	71, 163, 144	36, 84, 74	23, 54, 47	17, 40, 35	9, 20, 18

<sup>A</sup>La tensión axial durante el halado reduce el esfuerzo de colapso

<sup>B</sup>Totalmente vacío es 14,7 psi, 34 ft agua, 30 in. Hg

<sup>C</sup>Múltiplos de temperatura recalificado

$$\frac{60^{\circ} F (16^{\circ} C)}{1,08}$$

$$\frac{73,4^{\circ} F (23^{\circ} C)}{1,00}$$

$$\frac{100^{\circ} F (38^{\circ} C)}{0,78}$$

$$\frac{120^{\circ} F (49^{\circ} C)}{0,63}$$

## **CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DE NORMAS**

En este capítulo se adaptarán algunas secciones de la norma ASTM F1962-11 que aplican únicamente para instituciones o procedimientos de los Estados Unidos. Cabe destacar que los cambios fueron realizados a criterio propio. Las secciones fueron corregidas para que el lector pueda aplicarlas en nuestro país, sin tener el inconveniente de investigar por su cuenta.

Este capítulo se encuentra dividido según las propuestas de modificación y organizado en secciones tomadas del capítulo 2. Traducción de norma ASTM F1962-11. Con el fin de lograr un rápido acceso a la información, se mostrará la referencia de la norma original en el fragmento traducido en el cual se realizaron los cambios. De esta forma, el lector se familiarizará con las transformaciones y a la vez ampliará su conocimiento del tema. Además, encontrará algunos documentos, por ejemplo, normas de seguridad y regulaciones sobre máquinas de trabajo, indispensables para su aplicabilidad los cuales son referenciados en los anexos.

### **3.1. Cambios, adaptación y discusión**

A continuación se presentan las secciones que contienen las adaptaciones realizadas, señalando en que parte del capítulo 2 se encuentran. Luego se muestran la modificación, sustitución o eliminación de los criterios de la norma con su respectiva justificación.

### ***3.1.1. Inspección topográfica***

La sección “Inspección Topográfica” se encuentra en el apartado 2.4.2.1 del capítulo 2 Traducción de norma ASTM F1962-11. Esta sección contiene los aspectos a considerar sobre la inspección topográfica antes de ejecutar los trabajos. Es fundamental para la escogencia la ruta por donde se va a colocar la tubería.

La modificación propuesta es la siguiente:

“La información de la inspección debe estar relacionada con las características topográficas en las proximidades del cruce propuesto. La información topográfica existente está disponible en la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica (DGM).”

Esta propuesta señala una institución en nuestro país en donde se encuentra dicha información.

En Costa Rica existen varios entes donde se pueden conseguir los planos geológicos, los cuales se encuentran, en estas instituciones, según el lugar que vaya a ser intervenido. Por ejemplo Prodes (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, UCR) cuenta con una base de mapas geológicos. Es indispensable hacer uso de ellos para garantizar el buen funcionamiento del proceso constructivo.

Para ejemplificar la necesidad de obtener dichos mapas, en el proyecto que se ha mencionado en este trabajo como referencia de instalación de tuberías de polietileno de alta densidad en un tramo de la carretera San Ramón – Palmares, se encontraron resultados reveladores. Dado que, el perfil geotécnico realizado por la firma especializada halló cinco diferentes tipos de suelo, incluyendo zonas blandas, zonas muy compactas e inclusive sectores de roca, lo cual evidencia la importancia de la obtención de mapas preferiblemente a mayor escala de los lugares a intervenir pues ayudará en los estudios preliminares, ya que las técnicas de perforación tienen que adaptarse a cada tipo de suelo.

### 3.1.2. Eliminación del fluido de perforación

La sección "Fluido de perforación eliminación" se encuentra en el apartado 2.4.2.1 del capítulo 2 Traducción de norma ASTM F1962-11. En ella se aborda el manejo de los fluidos de perforación en caso de que sean tanto desechados como reutilizados.

En Costa Rica las regulaciones de los desechos para el cuidado ambiental contemplan el manejo de algunas sustancias como la bentonita. Esta arcilla es una de las más usadas en la Perforación Horizontal Direccional. Por tal motivo, se ha realizado en la sección señalada el siguiente cambio considerando las disposiciones de SETENA:

"Los minerales más comunes son bentonita, (es una arcilla de la familia esmestita) barita (una forma inerte de sulfato de bario), soda cáustica (Na OH), sales variadas primordialmente cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl.) y cloruro de potasio (KCL) y numerosos polímeros orgánicos. Estos productos químicos pueden reaccionar al mezclarse con otros productos.

Los lodos de perforación se deberán tratar adecuadamente en los tanques de tratamiento de lodo a fin de que sean de nuevo reciclado a la línea de circulación de lodos.

Previa a su disposición final se deberán presentar los análisis químicos del producto final líquido proveniente de los lodos, a fin de que se autorice, por parte de las instituciones competentes Costa Rica, su disposición final."

Las disposiciones anteriores fueron obtenidas de: "*Estudio de Impacto Ambiental para la Ubicación de una Perforación Exploratoria, Plataforma Caribe de Costa Rica, Expediente Administrativo N° 619-98 SETENA*".

El cambio se justifica debido a que SETENA es la instancia oficial de control ambiental por lo tanto, vigila los procesos de colocación de tuberías que utilizan sustancias como la bentonita. Las disposiciones de esta institución son acatadas por los proyectos que utilicen este tipo de sustancias.

### **3.1.3. Estudio**

La sección "Estudio" se encuentra en el apartado 2.4.3.1 del capítulo 2 Traducción de norma ASTM F1962-11. Una de las etapas más importantes es la investigación de obstáculos encontrados en el subsuelo, por lo cual es necesario la ubicación de los mismos con el cual poder guiarse para la investigación. Más adelante se profundizará sobre la importancia de los estudios preliminares, por ahora se muestra el cambio propuesto para a la norma. El cambio a esta sección se debe leer así:

"La investigación preliminar del subsuelo debe comenzar con una revisión de los datos existentes, como pueden ser obtenida a partir de los informes publicados para el suelo por instancias como el Lanamme (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales), DGM, Prodis; así como el ICE (Instituto Costarricense de Electricidad, MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes) y AYA (Acueductos y Alcantarillados)."

La importancia de este cambio radica en que se debe tener conocimiento de posibles tuberías que pasen a través de la ruta trazada para la perforación. Por tal razón, es fundamental consultar las instancias encargadas de colocación de las mismas en Costa Rica.

### **3.1.4. Ropa de trabajo**

La sección "Ropa de trabajo" se encuentra en el apartado 2.5.2 del capítulo 2 Traducción de norma ASTM F1962-11. Se debe tener en cuenta que para el procedimiento de la HDD son utilizadas muchas herramientas alto riesgo, por lo cual se debe acatar las disposiciones generales de seguridad de la norma ASTM f-1962, no así el reglamento OSHA, ya que no es aplicable al contexto costarricense, en su lugar conviene seguir los reglamentos de nuestro país.

En nuestro país rige el Reglamento General de Seguridad e Higiene. El cambio sugerido sería el siguiente:

“La ropa suelta o joyas no deben ser usados, ya que pueden engancharse en el movimiento de las partes mecánicas. En todo momento deben ser usados por el personal gafas de seguridad, cascos aprobados, zapatos de trabajo y guantes de protección. Se deben acatar las regulaciones del Reglamento de Seguridad en Construcciones, Decreto N ° 25235 – MTSS, Artículos 4, 154-176. (Ver Anexo 4) así como el Reglamento de Salud e Higiene.”

Asimismo, una boleta de inspección es de gran ayuda pues con ella se verifica el estado de los trabajadores y la seguridad del espacio donde se esté aplicando el método. Se puede encontrar un ejemplo de boleta de inspección en el Anexo 5.

### **3.1.5. Prácticas de seguridad en máquinas**

La sección “Práctica de seguridad en máquinas” se encuentra en el apartado 2.5.3 del capítulo 2. Traducción de norma ASTM F1962-11. Se debe hacer una revisión de las disposiciones detalladas sobre el la seguridad de la maquinaria así como el uso que le den los trabajadores de este equipo. La siguiente intervención en la norma fue sugerida para adicionarle un reglamento que la haga aplicable en nuestro país:

“El funcionamiento del equipo de perforación requiere rotación, avance o extracción de las barras de perforación. La operación del equipo de perforación se lleva a cabo normalmente utilizando cadenas de transmisión, sistemas de engranajes, y prensas que pueden potencialmente conducir a lesiones al personal debido a los componentes mecánicos móviles. Todas las barreras de seguridad o de protección deben montarse correctamente. El equipo se debe inspeccionar al inicio de cada día de trabajo para verificar su funcionamiento correcto. Se deben acatar las regulaciones del Reglamento General de Seguridad e higiene del Trabajo. Decreto N1-TSS artículo 4. Publicado en La Gaceta, 1996-06-27, núm. 122, págs. 1-8 (ver Anexo 4).”

Esta adición es viable, puesto que complementa la norma ASTM f-1962 y la hace aplicable para el entorno costarricense, ya que contiene disposiciones locales detalladas sobre el manejo seguro de maquinaria similar a la Perforadora Direccional Horizontal.

### **3.1.6. Consideraciones generales**

La sección "Condiciones Generales" se encuentra en el apartado 2.6.1 del capítulo 2. Traducción de norma ASTM F1962-11. Estas consideraciones generales abordan los permisos necesarios para la construcción, así como los responsables de velar por el cumplimiento de ellos. Se debe omitir las aprobaciones federales, estatales o jurisdicciones dado que en Costa Rica no aplican, por lo tanto el cambio sería el siguiente:

"El propietario de la propuesta de la instalación de la tubería es responsable de debe obtener los permisos necesarios de perforación. Las investigaciones preliminares (sección 2.4) deben identificar lugares y caminos apropiados, incluso separaciones seguras de otras instalaciones tales como energía eléctrica, gas natural, o líneas de petróleo. Si las restricciones para un orificio particular de la maxi-HDD, son tales como para estar en las proximidades de las instalaciones conocidas, los propietarios afectados deben ser contactados y se deben seguir procedimientos estrictos para su ubicación. Pueden existir restricciones especiales, incluyendo las regulaciones de restauración, en el medio ambiente de las áreas de hábitat sensibles."

Algunas de las entidades a las cuales se les debe pedir permisos en son: Municipalidades, según el cantón donde intervenga la construcción; SETENA, si se compromete el medio ambiente; o el MOPT, si se va a hacer algún tipo de rompimiento en carreteras, aceras u otros.

### **3.1.7. Estudio de impacto ambiental y arqueológico**

La sección "Estudio de impacto ambiental y arqueológico" se encuentra en el apartado 2.6.3 del capítulo 2 Traducción de norma ASTM F1962-11. En Costa Rica el ente regulador de los impactos que generen daño al ambiente es SETENA por lo tanto el cambio realizado es el siguiente: El cambio realizado es el siguiente:

"La mayoría de proyectos con maxi-HDD requerirán la contratación de diversos permisos ambientales. Cuando un plan de permiso ambiental deba ser elaborado, se debe incluir una lista de permisos requeridos (por ejemplo, SETENA), el tiempo necesario para preparar los permisos, y una fecha estimada de expedición. Los puntos a considerar son materiales sólidos y peligrosos y residuos gestión, los humedales, los cementerios, el uso del suelo, la contaminación del aire, ruido, el suministro de agua y descarga, control de tráfico y el río y transporte ferroviario."

Se eliminaron los entes regulatorios existentes de los Estados Unidos que en nuestro país no tienen aplicabilidad. Más bien, en nuestro país SETENA es el que tiene injerencia en la colocación de tuberías, dado que en algunos casos se puede comprometer la riqueza natural del suelo y subsuelo.

### **3.1.8. Cruces de trenes**

La sección "Cruces de trenes" se encuentra en el apartado 2.6.5 del capítulo 2. Traducción de norma ASTM F1962-11. El ente encargado de autorizar el rompimiento por colocación de tuberías en caso de que estas se encuentren justo donde se deban hacer los trabajos de construcción es Incofer (El Instituto Costarricense de Ferrocarriles). Considerando esto, el cambio es el siguiente:

"Se debe consultar Incofer para aprobar el cruce la tubería bajo la línea de ferrocarril. Los ferrocarriles normalmente requieren tubos en los cruces para evitar derrumbes o

daños en caso de rotura de tuberías. (Al momento de la redacción de la norma original ASTM f-1962, un tren del comité de Ingeniería de Asociación América (AREA) está estudiando el uso de HDD para cruzar sin entubar y entubado de ferrocarriles, tanto para gasoductos plástico y acero.)”

El Instituto Costarricense de Ferrocarriles, creado por la Ley N° 7001, del 19 de setiembre de 1985, es una institución pública, con autonomía administrativa, personalidad jurídica y patrimonio propio. Esta institución se rige por las disposiciones establecidas en dicha ley y sus reglamentos, así como en las leyes que la complementen.

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE EQUIPO Y RECOMENDACIONES**

Este capítulo responde al interés de mostrar al lector el equipo que constituye la Perforación Horizontal Direccional. Se presentan las partes de la máquina de perforación, así como el equipo adicional necesario para colocar la tubería.

Algunos de los equipos que se reseñan son partes de la máquina de perforación. Estas partes señalan el cuidado y mantenimiento de las mismas. De este modo, si el lector tiene interés en adquirir dichos equipos, debe tener en cuenta los cuidados indispensables. Por medio de la lectura de este capítulo, se pondrá al tanto de estos aspectos.

En cuanto al equipo adicional que se debe tener además de la perforadora, este resulta de uso común en la colocación de tuberías. Puesto que, es también necesario en la metodología tradicional de apertura de zanjas.

A continuación, se indica el equipo más común en la colocación de tuberías, el equipo especializado que se necesitará en dicho proceso e incluso las partes de la máquina perforadora.

### **4.1. Retroexcavadora**

La retroexcavadora es una máquina con fuerza hidráulica que se utiliza para realizar excavaciones en terrenos bajo el nivel de superficie. Se utiliza habitualmente en obras que requieren movimiento de tierras, así como para realizar rampas en solares o para abrir surcos. Los surcos pueden estar destinados al pasaje de tuberías, cables, drenajes, etc. Sin olvidar que sirven para preparar los sitios donde se asientan los cimientos de los edificios.

El funcionamiento de la máquina se resume en que hunde sobre el terreno una cuchara con la que arranca los materiales que arrastra y luego los deposita en su interior. Una diferencia notable de la retroexcavadora con respecto a la excavadora frontal es que incide sobre el

terreno excavando de arriba hacia abajo. Esta máquina, es utilizada para trabajar el movimiento de tierras a nivel inferior al plano de apoyo, o un poco superior a éste.

Por otra parte, dentro de las características físicas, se puede mencionar el chasis. Esta parte de la máquina puede estar montada sobre neumáticos. En este caso, están provistas de gatos hidráulicos para fijar la máquina al suelo.

Por último, cabe señalar que en el método constructivo de la Perforación direccional la retroexcavadora juega un papel muy importante en lo que respecta a abrir ventanas de inspección. Las pegadas entre tuberías cuando se tratan de tramos muy largos se deben hacer bajo tierra para que la tubería sea continua, es por esto que en los puntos de salida se hacen unas ventanas de inspección para alinear la tubería que sale con la que va a entrar y seguir el proceso.



Figura 7. Retroexcavador

Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com)

#### **4.2. Montacargas, bobcat o similar**

Estos equipos son utilizados para la carga y transporte de la tubería que se va a instalar. También se utilizan para alinear la tubería en las máquinas de termofusión.

Este tipo de maquinaria es muy necesaria ya que en ciertas ocasiones las tuberías son muy pesadas. Por lo que, intentar manipularlas de manera manual ralentiza el trabajo, sin mencionar que pone en peligro a los trabajadores.



Figura 8. Montacargas tipo Bobcat

Fuente: [www.cat.com](http://www.cat.com)

#### **4.3. Máquina de corte, presión y termofusión en tubos de polietileno**

El principio de la fusión por calor o termofusión consiste en calentar dos superficies a una temperatura determinada y después fusionarlas mediante la aplicación de presión. Dicha presión hace que fluyan los materiales fundidos, se mezclen y se fusionen. Cuando se calienta el tubo de polietileno, la estructura molecular cambia de un estado cristalino a un estado amorfo. Cuando se aplica presión de fusión, las moléculas de los extremos del tubo se mezclan. Mientras se enfría la unión, las moléculas vuelven a su forma cristalina, las interfaces originales desaparecen y, finalmente, los dos tubos se convierten en un tubo homogéneo. El área de la unión adquiere más resistencia que el tubo mismo, ya sea en condiciones de tensión o de presión.

Las operaciones principales son:

- Sujeción: Se sujetan con firmeza las piezas del tubo, alineadas axialmente, para permitir que se lleven a cabo las otras operaciones.
- Cortadora: Los extremos de los tubos deben estar recortados de manera que las superficies estén limpias, paralelas y parejas, y se ubiquen de manera perpendicular a la línea central de los tubos.
- Alineación: Los extremos de los tubos deben estar alineados entre sí para evitar un mal acoplamiento o errores de espesor en las paredes del tubo.
- Calentamiento: En los dos extremos de los tubos, debe formarse un patrón de fundición que penetre en el interior de éstos.
- Unión: Las plantillas de fundición deben unirse con una fuerza determinada. La fuerza debe ser constante alrededor de la zona de la interfaz.
- Sujeción: Se debe inmovilizar la unión fundida con una fuerza determinada hasta que se enfríe.
- Inspección: Se deberá examinar visualmente la circunferencia de la unión para asegurarse de que cumpla con los estándares establecidos por la empresa, el cliente, la industria y con las leyes federales, estatales o municipales.

Nota: Cada equipo tiene su modo de empleo, ya sea por temperatura, presión y duración en la máquina por tubo dependiendo del diámetro y material.



Figura 9. Máquina de Termofusión TracStar™ 28

La máquina de termo fusión varía su temperatura y su presión; así que es deber del operador saber cuáles son los parámetros a ajustar para la máquina dependiendo del diámetro y tipo de tubería. Otro parámetro que el operador debe especificar es el tiempo en el cual debe estar la tubería expuesta a la máquina de termofusión.

#### ***4.3.1. Cómo calcular la presión y tiempo de aplanchado:***

Existe una aplicación para celular desarrollada por la casa matriz de las termofusionadoras marca McElroy llamado McCalc<sup>®</sup> que vamos a utilizar para obtener ese dato. Como ejemplo se muestra el modelo TracStar<sup>™</sup> 28 (ver figura 8), cabe recalcar que los valores de presión interfacial y presión de arrastre son recomendados por el fabricante de la tubería de Polietileno de Alta Densidad. En nuestro caso, la primera es de 75 psi (517,11 kPa) y la presión de arrastre es de 30 psi (206,84 kPa), pues se trata de una tubería de 8 pulgadas (203,2 mm) y SDR 41:

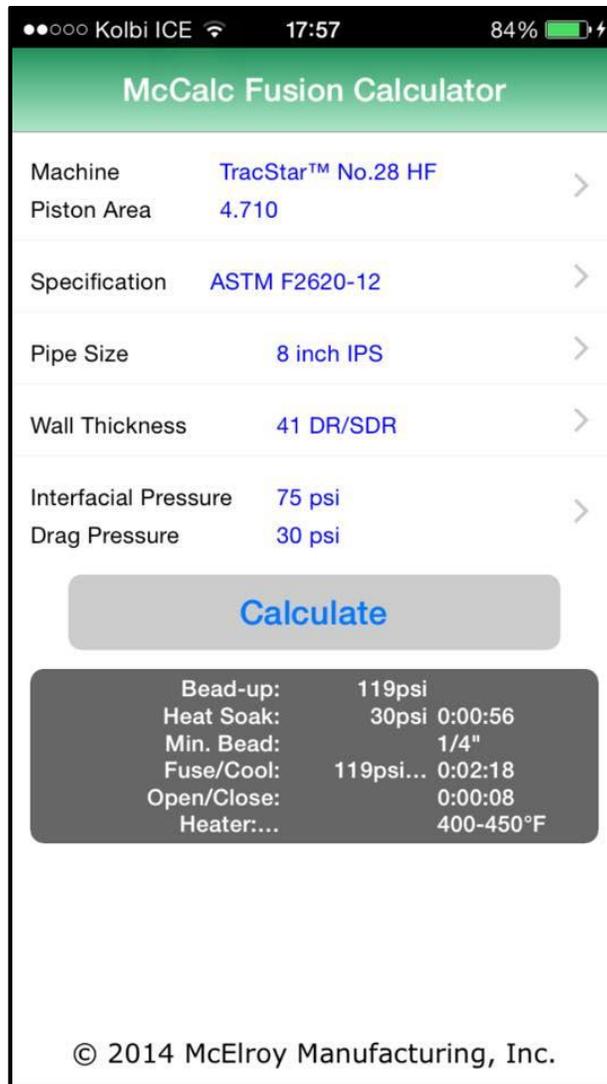


Figura 10. Ejemplo cálculos aplicación McCalc.

Fuente: McCalc Fusion Calculator, 2015

Como se puede observar en la figura 9. El tiempo de fusión es de 2 minutos con 18 segundos con 8 milésimas de segundo entre sus aperturas (inmediato) y un calor de fusión de 400 -450 °F (204,4 – 232,22 °C).

### 4.3.2. Algoritmo detrás de la aplicación

Ejemplo:

Utilizando el modelo TracStar™ 28 (ver figura 8) y las variables que a continuación se describen se determinará la presión manométrica

Tamaño de la tubería = 8" IPS (203,2 mm)

OD de la tubería = 8.625 (219 mm)

DR de la tubería = 11 (279,4 mm)

IFP = 75 PSI (217,1 kPa)

Presión de arrastre = 30 PSI (206,84 kpa)

Donde:

OD: Diámetro externo

T: Grosor de pared

PI: 3.1416

DR: Dimensión del radio

IFP: Presión interfacial recomendada por el fabricante

TEPA: Área total efectiva del pistón

DRAG: Fuerza requerida para mover la tubería

Cuadro 2. Área efectiva del pistón

Modelo	Fuerza alta Estandar (mm <sup>2</sup> )	Fuerza media Velocidad alta (cm <sup>2</sup> )	Fuerza baja velocidad extra rápida
No.28	3039	NA	1067
No.412	7600	3900	2026
No.618	7600	3900	2026
Trac 500 II	NA	3900	NA
No.824	19000	9900	6100
No.1236	19000	9900	6100
Trac 900	NA	9900	NA
No.1648	20300	9100	NA
No.2065	20300	NA	NA

Fuente: [www.Macerloy.com](http://www.Macerloy.com)

Paso 1. Cálculo de grosor de pared:

Para determinar el grosor de pared se va a usar el ejemplo antes descrito:

$$T = \frac{OD}{DR} \quad (1)$$

Ahora, usando el ejemplo y el valor de T se va a encontrar el grosor de pared

$$T = \frac{55,64}{70,96} = 0.784 \quad (2)$$

Paso 2. Área total efectiva del pistón

Utilizando el cuadro 2:

TEPA = 30,39 (Usando como ejemplo el modelo No.28)

Paso 3. Cálculo de la presión de arrastre

$$\frac{(OD-T) \times T \times PI \times IFP}{TEPA} + DRAG \quad (3)$$

Paso 4. Fórmula completa

Ahora usando la información y las fórmulas descritas se encontrará la presión manométrica

$$\frac{(219-0.784) \times 0.784 \times 3.1416 \times 217,1}{3039} + 206,84 = 245,34 \text{ kPa} \quad (4)$$

### ***4.3.3. Máquina de electro-fusión***

La termofusión es un método de simple y rápido uso para unir tubos de polietileno y sus accesorios. La superficie de las partes que se van a acoplar se calientan a temperatura de fusión y se unen al presionarlas con acción mecánica o hidráulica, de acuerdo al tamaño de la tubería. Para este procedimiento no son necesarios elementos de sujeción como gazas o cemento solvente para tubería.

La máquina termofusionadora es apropiada para la unión de tuberías de la misma relación OD, con diámetros desde 32 mm hasta 630 mm. La técnica que se efectúa con esta máquina produce una unión permanente y eficaz, y es económica.

Las superficies que se vayan a soldar deben comprimirse contra el termoelemento con una fuerza que es proporcional al diámetro de la tubería y esta fuerza debe disminuirse luego hasta un valor determinado de presión. Este procedimiento se realiza con el objeto de que las caras absorban el calor necesario para la polifusión. Esta disminución provoca que se forme un cordón regular alrededor de la circunferencia, dicho cordón está relacionado directamente con el espesor del tubo.

Para lograr una correcta soldadura por termofusión deben considerarse los siguientes factores:

- Calor de fusión
- Presión de fusión adecuada
- Velocidad de fusión
- Presión de enfriamiento
- Temperatura del termoelemento correcta
- Temperatura adecuada del ambiente
- Uso de tiempos de calentamiento y enfriamiento adecuados
- Alineación correcta
- Evitar el contacto con suciedad, aceites y residuos



Figura 11. Equipo de electro-fusión

Fuente: Maquinasaristegui.com

#### **4.4. Equipo de localización**

El seguimiento de la cabeza de perforación es crucial en el éxito de cualquier perforación. (Ver figura 13). Este equipo requiere que el operador camine sobre la punta del cabezal de perforación con el receptor para determinar la profundidad y posición del mismo.

El equipo de localización se compone de dos elementos principales, el receptor y el transmisor. El transmisor va en el interior del cabezal y funciona con baterías. Sirve para emitir una señal radial que es captada por el receptor. El receptor procesa la señal y los separa en tres conjuntos de datos ángulo, giro y profundidad. Los tres se describen a continuación.

- **Ángulo:**

El ángulo es la inclinación del cabezal de perforación y se puede expresar en grados o como un porcentaje de inclinación, esta diferencia de manifestarlo depende del localizador en uso. El ángulo, como porcentaje de inclinación, se utiliza con mayor frecuencia en el sitio de trabajo. Si el ángulo es cero, significa que el cabezal está totalmente nivelado. Un ángulo positivo quiere decir que va hacia arriba.



Figura 12. Equipo de localización

- Giro:

El giro es la posición rotatoria de la broca de dirección. Los cambios de dirección se efectúan empujándolo sin girar. La posición rotatoria de la broca determina la dirección en que se moverá el cabezal.

Propiamente, el giro se lee como se si fuera un reloj, dado que según hacia donde apunte el operador de la máquina así se marca la dirección en la que avanza la perforadora. A las 12 horas es hacia arriba, a las seis es hacia abajo, a las 3 es hacia la derecha y a las 9 es a la izquierda.

## Steering Corrections

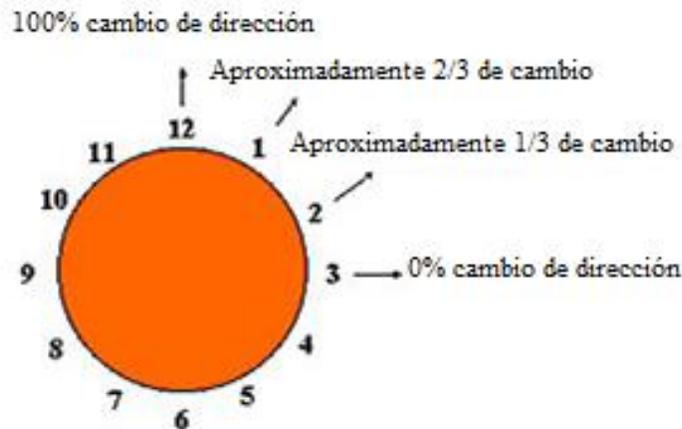


Figura 13. Diagrama de giro.

Fuente: Vermeer©

- Profundidad:

El receptor convierte la señal del transmisor para mostrar la profundidad. Dependiendo del fabricante, la profundidad aparece en pulgadas o pies y pulgadas. Un detalle importante es que la mayoría de los localizadores también pueden programarse para mostrar este dato en el sistema métrico.

- Interferencia

Se puede generar una interferencia activa debido a cualquier dispositivo que emita una señal o que genere su propio campo magnético o una pasiva si se genera una distorsión bloquee o absorba la señal.

Los efectos posibles de una interferencia pasiva son: la profundidad parece ser mayor de lo que realmente es, puede bloquear toda la información y la posición del cabezal de perforación puede ser incorrecta.

Algunos ejemplos de interferencia pasiva son: cercas metálicas, varillas de acero en el concreto, vehículos perforación, metal enterrado, agua salada.

- **Calibración:**

Algunos sistemas de localización deben ser calibrados antes de perforar. De no hacerse, se obtienen lecturas de profundidad incorrecta y, por consiguiente, una mala instalación del producto y problemas con la separación de líneas de servicios.

#### **4.5.Sistemas de mezclas**

Los sistemas de mezcla de fluidos de perforación mezclan los fluidos con el agua de complemento y luego envían esos fluidos a la perforadora horizontal dirigible. La mayoría de los sistemas de mezcla entregan fluido de perforación a la bomba de alta presión incorporada en la Perforación Horizontal misma.

Ahora bien, un buen fluido de buena calidad de líquido de perforación es esencial para los componentes de la bomba de líquidos y para obtener una perforación exitosa. En la operación del sistema de mezcla de fluidos de perforación se deben tener presente algunas recomendaciones como las siguientes.

Se debe asegurar que el sistema de mezcla de fluido esté conectado a la máquina y que todas las válvulas estén abiertas. Este generalmente incluye válvulas ubicadas entre el tanque y la bomba centrífuga y la válvula ubicada a la salida del sistema de mezcla.

También, utilizar una fuente de agua limpia. Esto ayudará a que se dé una mezcla adecuada de los aditivos de fluido de perforación y evitará el daño prematuro en la bomba de alta presión incorporada. Siempre hay que pasar el agua a través de un tamiz para remover sólidos y desechos.

Otra recomendación obedece al máximo beneficio de los fluidos de perforación. En ese sentido, para alcanzar ese máximo beneficio, los niveles de pH del agua de complemento deben corroborarse utilizando tiras de prueba de pH. EL nivel deseable de pH es de 8,5 a 9,5. Por lo general, el pH del agua es bajo (ácido). Pero se puede aumentar el nivel de pH del agua

adicionando carbonato de sodio. Sin embargo, si se utiliza un aditivo de fluido de perforación que ya contiene carbonato de sodio (por lo general, aditivo de bentonita), puede no ser necesario tratar previamente el agua de complemento con carbonato de sodio.

Se debe recordar que cuando se alcanza un nivel de pH demasiado alto en el agua de complemento puede disminuir la efectividad de la bentonita. Asimismo, se debe utilizar aditivos de fluido de perforación de alta calidad. Todas las bentonitas contienen arena, pero con algunas marcas se obtienen mejores resultados y rendimiento. Por lo general, se acepta bentonita Wyoming pues tiene las mejores propiedades para las aplicaciones HDD.

Se recomienda utilizar conjuntos de prueba de contenido con frecuencia para verificar el contenido de arena de los fluidos de perforación ya mezclados. Estos contenidos se pueden obtener o adquirir fácilmente. Sin embargo, es deseable tener un contenido de arena de un 2% o menos. Un contenido de arena mayor acelerará el desgaste de las bombas de presión.

De igual manera, se debe conducir una investigación de suelos para garantizar que los aditivos de fluido utilizados sean compatibles con las condiciones de suelo. El uso de aditivos incorrecto provoca una pérdida de tiempo y dinero. Del mismo modo, se debe seleccionar adecuadamente la manguera, ya que el uso de una manguera no plegable del tamaño adecuado es esencial para mantener un flujo ininterrumpido del fluido de perforación a la máquina.

Por otra parte, todos los sistemas de fluido de perforación tienen un filtro en línea. Se debe asegurar que este filtro sea limpiado con frecuencia. Un filtro bloqueado con bentonita o polímeros no disueltos restringirá el flujo de la máquina.

Otro de los aspectos en los que se debe asegurar es el de tener suficiente flujo entre el sistema de mezcla y la máquina de perforación de dirección controlada. Para hacer esto, se debe comprobar que el motor del sistema de mezcla esté en funcionamiento y que la bomba de suministro esté entregando la presión adecuada a la bomba de presión incorporada.

Además de aplicar todos estos consejos, se debe recordar que la bomba de alta presión incorporada no está diseñada para succionar fluido de perforación del sistema de mezcla. Todo lo contrario, es el sistema de mezcla el que debe entregar una fuente abundante de fluido a la bomba incorporada.

- Orden de la mezcla:

La mezcla siempre debe hacerse en el orden descendente que se encuentra a continuación:

-Carbonato de sodio

-Aditivos de bentonita

-Aditivos de polímeros

-Detergentes concentrados

Al mezclar los fluidos se debe dar los tiempos suficientes para que los aditivos del fluido de perforación reaccionen, esto con el fin de que rindan por completo. Los nuevos sistemas de mezcla Venturi tienen una combinación de bomba/motor grande; mezclan los aditivos de forma rápida. En los sistemas de mezcla actuales, se agregan bentonitas en polvo a través de la tolva de mezcla.

Los aditivos líquidos y los polímeros cristalizadores se agregan directamente al agua de complemento de los tanques. Ahora bien, este proceso depende de las características del sistema de mezcla, existe la posibilidad de que al agregar estos polímeros a través de la tolva, se bloquee el sistema Venturi.

El método de mezcla ideal para lograr el mayor beneficio de los aditivos polímeros es hidratar previamente el polímero agregando una cantidad de este a un cubo y revolverlo mientras se le agrega agua. Luego, la solución previamente hidratada puede agregarse directo a la tolva de mezcla. Este método reduce tanto la descomposición prematura de los aditivos de polímero, como la posibilidad de bloquear el Venturi. Por otra lado, siempre antes de iniciar la perforación, se debe revisar la consistencia del fluido. Las colusiones de polímero deben mezclarse en forma consistente. Las soluciones de bentonita no deben tener grumos de bentonita sin mezclar.

En conclusión, si se ponen en práctica estos consejos, se mejorará la productividad global de la operación, se extenderá la vida útil de la bomba incorporada y entrará un fluido de perforación de calidad a la perforación.

#### 4.6. Perforadora Horizontal Direccional

La máquina de Perforación Horizontal Dirigida es una plataforma de perforación que puede contar con llantas tipo oruga, ejes normales o ser completamente fija. Es accionada por presión hidráulica, además, está diseñada con tecnología avanzada que le proporciona una estructura simple y conveniente. Asimismo, la excavación de la perforadora tiene un funcionamiento estable, alta eficiencia y baja temperatura de aceite.

El componente principal junto con la bomba de lodo. En cuanto a la máquina principal, algunas están equipadas con llantas tipo oruga de caucho, las cuales son sólidas y anti-desgaste. Gracias a sus llantas tipo oruga, se puede trabajar en el área urbana. También, permite que sea movida hasta un remolque por sí misma. Esto asegura que el equipo de perforación pueda moverse con facilidad en el sitio de perforación, además, logra trabajar dentro de cualquier ángulo de perforación posible.



Figura 14. Perforadora Horizontal Direccional FDP-32

Fuente: [www.hhdrillrig.com](http://www.hhdrillrig.com), 2015

#### **4.6.1. Características físicas de máquina de perforación HDD**

El motor de la máquina de perforación HDD funciona por medio de diésel. Relacionado a eso y a su gran rendimiento, se afirma que tiene bajos niveles de emisiones; otro beneficio de este diseño es la reducción del ruido, estas ventajas la convierten en una maquinaria ideal para el trabajo urbano.

Por su parte, la bomba de lodo es accionada por la presión hidráulica y es de transmisión manual. El volumen de lodo se puede ajustar de acuerdo con diferentes condiciones geológicas y técnicas de perforación.

Dado los diversos tipos de la torre de perforación direccional horizontal, el equipo de perforación HDD FDP-32 taladro se toma como un ejemplo.

Cuadro 3. Características del modelo FDP-32 máquina de Perforación Horizontal direccional

Potencia del motor	145kW marca Weichai Deutz
Fuerza alimentación / fuerza de arrastre	330/330kN
Par nominal de Rotación	1300nm
Velocidad de rotación del eje	0-48, 0-96r/min
Tiempo Alimentación	3300 min
Diámetro del orificio direccional	φ130 (165) mm
Angulo de Perforación	0-20
La presión del sistema hidráulico	20Mpa
Velocidad de desplazamiento	2-2.6 km/h
Dimensiones de Máquina (L x W x H)	5820 × 2250 × 2400mm
Peso	8400kg

#### 4.7. Cabezales de perforación

Existen varios tipos de cabezales y brocas de perforación en el mercado, por ejemplo cabezas tipo espátula (para suelos blandos), martillo (para roca), entre otros. El estilo a utilizar dependerá fundamentalmente de las condiciones del suelo que espera encontrar. (ver figura 13)



Figura 15. Cabeza de perforación tipo espátula.

Fuente: [www.Vermeer.com](http://www.Vermeer.com)

Las cabezas de Perforación Direccional se componen de un cuerpo de dirección y una cabeza de perforación. El cuerpo direccional está equipado con la barra de señal y la placa de cabeza de perforación que está hecha de acero.

Este tipo de cabezal de perforación se utiliza en el primer procedimiento de trabajo de la tubería de perforación. Hay que tomar en consideración que la rectitud de los agujeros piloto depende de la precisión de las señales, la fuerza y la resistencia al desgaste de la cabeza de la placa de perforación.

Entre las características sobresalientes, se puede mencionar que la capacidad de transmisión de datos de este tipo de cabeza de perforación direccional permite que su barra genere señales sin interferencia. Además, esta cabeza puede ayudar a reducir horas de trabajo así como los

costos de trabajo pues evita daños relacionados a acumulación de fluido y aumento de presión en la tubería ocasionando daños materiales.

Es imperativo utilizar buenas técnicas de operación para preservar la vida útil del cabezal. La práctica conocida como "acuña" (método que utiliza el cabezal como palanca apoyándolo contra el suelo consolidado o roca para realizar maniobras de viraje) puede dañar el cabezal y sus componentes electrónicos.

- Características.

EL cabezal de perforación tiene orificios en su estructura. A través de ellos, se bombeará el fluido de perforación para lubricar la perforación. Así, se creará un agregado que fluya y que enfríe el transmisor.

Sin olvidar que los cabezales también tienen ventanas alrededor de la carcasa del transmisor para permitir que su señal llegue a la superficie, esto supone un importante detalle para conocer fielmente la información recibida.

-Carga Lateral: el estilo de cabezal más conocido es el de una sola pieza y de carga lateral. Como su nombre lo indica, su principal cualidad es poseer una tapa removible al costado del cabezal que da acceso a la carcasa del transmisor.

-Carga posterior: Los cabezales de tres piezas de carga posterior se compone de tres partes y el transmisor de carga se ubica en por atrás de los cabezales. Asimismo, el frente de la sección estructural tiene rosca, de modo que esta pueda ser conectada. En cuanto a la sección frontal, esta puede alojar una punta chata para cortar y guiar.

Algunas veces, las brocas diseñadas para cortar formaciones geológicas de mayor dureza están unidas directamente a la sección estructural en vez de tener la configuración de sección frontal y punta chata. El extremo posterior de la sección estructural también tiene rosca. Esto permite que la parte posterior del cabezal se adose a la estructura después de cargado el transmisor.

Al utilizar cabezales de perforación de carga posterior, se debe asegurar que el transmisor este alineado con la broca. Esto se puede lograr soltando una serie de torillos de ajuste y girando el transmisor hasta que la posición de 12:00 horas del transmisor se alinee con la posición de

las 12:00 horas de la broca de corte. Recuerde que el sub-montaje frontal debe estar apretado antes de efectuar esta operación.

Otras cualidades de este tipo de cabezal son que se puede utilizar con un sistema de localización con transmisor por cable o los sistemas regulares o de vida útil extendida, también es muy útil en condiciones donde el calor representa un problema. Asimismo, el diseño de carga posterior hace posible espaciar de forma pareja los pasos de agua a través de la carcasa del transmisor, es decir, le otorga excelentes características de enfriamiento.

Finalmente, para la aplicación en alcantarillado, por lo general se prefiere el cabezal de tres piezas debido a que la carcasa del transmisor es ranurada, por lo que va paralela a la parte externa del cabezal. Se aumenta, de esta manera, la exactitud del ángulo.

- Montaje

Antes de adosar el cabezal a la máquina, puede ser necesario calibrar el localizador mientras el cabezal y su transmisor están en el suelo. Asimismo, al poner el transmisor en la carcasa del cabezal de perforación, ponga cinta eléctrica o anillos en "o"(O Ring) alrededor de cada extremo del transmisor para ayudarlo a amortiguar cualquier golpe que éste reciba durante la perforación piloto. Tome en cuenta que existen aislantes de transmisor. Estos aislantes se utilizan para proteger el transmisor al perforar en roca.

Ahora bien, para adosar el cabezal de perforación, se debe asegurar que la primera barra se encuentre levemente hacia delante de la cremallera y que el motor esté apagado. No sujete la herramienta con las manos para conectar el conjunto de cabezal aprovechando la rotación de la máquina.

Por otra parte, las herramientas que tengan conexiones roscadas con acople directo deben apretarse utilizando las mordazas de la perforadora. Jamás utilice una llave de tubo o tenazas para conectar los accesorios de la máquina. Si se activa la rotación de las barras y la llave lo golpea, esto le podría causar heridas graves o la muerte.

## 4.8. Brocas

La broca de perforación o broca de corte tiene la forma de una punta chata o "pico de pato". Debido a su forma, el cabezal se puede guiar cuando la broca se encuentre en diferentes posiciones.

Las brocas son utilizadas para el ensamblaje tanto de la cabeza de perforación como para el escariador. Ambos deben ir unidos a las barras de perforación por medio de la broca giratoria.

- Corrección de dirección

Las correcciones de dirección se efectúan la broca sin girar. El giro depende de la posición horizontal de la broca cuando enfrente el objetivo. Cuando el operador lo apunta en dirección de las 6:00 horas (ver Fig. 14) y aplica empuje durante la perforación, el ángulo del cabezal disminuirá. Ahora bien, si se gira un cuarto de vuelta hacia la derecha, se considera una posición de las 9:00 horas y las barras girarán hacia la izquierda.



Figura 16. Barras de perforación.

Fuente: [www.Vermeer.com](http://www.Vermeer.com)

- Cuidados de las barras de perforación

La barra de perforación es un componente vital para el proceso de perforación. A pesar de esta importancia, es frecuente que el servicio y el mantenimiento de la barra se descuiden. Por ejemplo, constantemente, la barra se ve sometida a malas técnicas de perforación que exceden el radio de curvatura de la barra. Se causa así, una falla costosa y prematura a la barra. Por

tal motivo, se afirma que la inspección, mantenimiento y cuidado diarios de la barra disminuyen el riesgo y aumenta considerablemente su vida útil. Asimismo, es vital el uso adecuado de las especificaciones, pues deben ser las adecuadas al tipo de máquina.

El buen uso implica que la barra deba ser capaz de soportar las fuerzas del torque, empuje, retroceso y curvatura a las que será sometida. También, que deba tener un diámetro capaz de manejar los flujos de fluido de perforación requeridos para la máquina en particular.

- **Lubricación del Mandril de Transmisión.**

Es importante lubricar el mandril de transmisión cada vez que se arma o desarma una sección de barra. Las roscas y los bordes deben lubricarse a todo alrededor de la espiga utilizando un compuesto lubricante para roscas aprobado, dado que la grasa y los lubricantes estándar no son capaces de soportar la presión que se produce en la junta debido al torque generado por la máquina.

Hay diferentes compuestos para roscas graduados según la temperatura ambiente. En estos casos, usar el componente adecuado permitirá que se adhiera tanto a la rosca, como a los bordes. De igual manera, el compuesto para roscas lubricará las superficies de los componentes para reducir el desgaste y la fricción. También, permitirá que las uniones de las barras se desarmen con mayor facilidad.

- **Inspección de la rosca**

La inspección de las roscas del mandril de transmisión y de las barras de perforación debe ser parte del mantenimiento preventivo diario. Hay calibradores de roscas para comprobar el desgaste excesivo de las roscas, cualquier melladura o parte afilada de las roscas debe repararse con una lima. El daño excesivo en la rosca es razón suficiente para desechar la barra de perforación.

Se debe recordar que cada barra que se coloca tiene contacto con el mandril de transmisión. Es fundamental inspeccionar las roscas del mandril de transmisión. Un mandril dañado dañará también cualquier barra que esté unida a él. Cuando se use una máquina con barras de 3 metros (10 pies) en una perforación de 122 metros (400 pies), cada uno de las 40 barras será armado 40 veces en la perforación piloto y 40 veces en la instalación, es decir, en total 80 armados y desarmados. Evitar que el mandril se encuentre dañado es la razón, por la cual debe inspeccionarse cuidadosamente y, en caso de indicios de desgaste, reemplazarse.

- Torque de montaje

Las barras de perforación poseen un torque de montaje mínimo recomendado. La vida útil la confiabilidad de las barra dependerá del torque. Cuando se logra alcanzar este torque, se garantizan dos situaciones, la primera, que ocurra la unión entre las barras; y la segunda, que ambos extremos estén en contacto. Una unión que no está bien ajustada puede hacer que el macho se rompa y/o que se abocinen las uniones entre el macho y la hembra.

Muchas máquinas HDD tienen dispositivos automáticos que limitan la presión de torque y fijan la presión ideal cuando se utiliza la mordaza frontal. En caso de que, una vez consultado el manual, se evidencie que la máquina no posee un limitador automático, debe fijarse al nivel recomendado (66% del torque total), así como observar el medidor de presión de rotación durante el montaje.

En fin, se debe tener en cuenta que sin importar la cantidad de torque aplicada durante el montaje; una rosca mellada, con partes afiladas, bordes dañados o desechos en las roscas pueden hacer que la unión no quede ajustada adecuadamente.

#### **4.9. Escariador**

El escariado se realiza con una herramienta denominada escariador, al que se le comunican dos movimientos, uno de giro sobre su eje, y otro de desplazamiento rectilíneo a lo largo de dicho eje. Antes de escariar un agujero, se debe de haber taladrado, dejando cierto espesor, el cual depende del diámetro que tenga el agujero y del material de la pieza. Una operación mecanizada que se realiza para conseguir un buen acabado superficial con ciertas tolerancias dimensionales, o bien simplemente para agrandar agujeros que han sido previamente taladrados con una broca a un diámetro un poco inferior. Esto hace referencia al proceso de "retroensanchamiento" en la segunda etapa de perforación.

El escariador es unido a las brocas de perforación la cual está unido a su vez a las barras de perforación, el mismo sigue la trayectoria ya pautada por la perforación piloto hecha por el cabezal de perforación



Figura 17. Escariador

#### **4.10. Procedimientos de montaje y desmontaje**

El uso adecuado de las técnicas de montaje y desmontaje por parte del operador son indispensables para extender la vida útil de las barras. Es decir, no el correcto uso no se limita a la inspección y lubricación. Por tal razón, nunca golpearlas ni "acuñarlas" son algunas medidas que debe asumir para su cuidado.

En el momento del montaje, el operario debe mantener la barra girando y colocar el extremo macho de la rosca, lentamente, dentro del extremo hembra de la otra barra. Luego se debe disminuir la rotación antes de que la unión se apriete. Esto evitará que se dañe el borde si la unión se ajusta de golpe.

El término "montaje forzado" significa, simplemente, que los extremos macho y hembra de la barra o mandril de transmisión son forzados a juntarse más rápidamente que lo que lo hacen roscas. Por su parte, el "desmontaje forzado" ocurre cuando la fuerza de separación es mayor que la velocidad con que se desconectan las roscas. Las roscas con partes afiladas, extremos laminados o alteraciones en general son indicios de que el montaje y desmontaje están siendo forzados.

Ahora bien, el montaje y desmontaje forzado de la unión de la barra se pueden prevenir utilizando adecuadamente el cabezal flotante (caja de engranajes). El cabezal flotante permite al operador montar y desmontar la unión sin implicar presión de empuje o retroceso a la unión.

Se debe asegurar que la barra está alineada correctamente con el mandril de transmisión y el grupo de perforación si la máquina tiene un cargador de barras automatizado. Si el alineamiento de estos componentes no es el adecuado, el cargador de barras deberá ser ajustado.

Se debe comprobar que los indicadores de alineamiento de las barras están ubicados en forma correcta durante el retroceso. La primera marca debe indicar que la unión frontal está entre la mordaza frontal y posterior.

Dependiendo de la máquina, la segunda marca debe indicar que la barra se encuentre en el centro de la mordaza trasera, donde se encuentra un espacio sin dientes para evitar que se dañen los bordes de las barras. Si el borde de la barra está a medio camino en la mordaza, asegúrese de que esté en la cavidad que no tiene dientes, de modo que la mordaza no "muerda" el borde y lo dañe.

En cuanto a los limpiadores de las barras de perforación, estos se insertan en la parte frontal de la cremallera. Están diseñados para remover el lodo y el fluido de perforación de las barras a medida que se retroceden hacia la máquina. Asimismo, permiten que el operador vea el vástago y sus uniones, y ayuda a prevenir la acumulación de desechos en la máquina o en la caja de barras. Dado lo anterior, es necesario cambiarlos cuando se desgastan.

Para finalizar esta sección, se debe considerar a la barra de perforación guía que está conectada a cabezal. Esta debe intercambiarse regularmente y ponerse al final de la caja de barra. Puesto que, la barra guía recibe más castigo que el resto del conjunto de perforación, la rotación

regular ayudará a prevenir su desgaste excesivo. La barra de perforación guía, que está conectado a cabezal, debe intercambiarse regularmente y ponerse al final de la caja de barra. La barra guía recibe más castigo que el resto del conjunto de perforación. La rotación regular ayudará a prevenir el desgaste excesivo de las barras.



Figura 18. Partes de la máquina  
Fuente: Krita Engineering Pvt. Ltd., (modificado por autor)

## **CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES Y ASPECTOS PRÁCTICOS EN EL MÉTODO CONSTRUCTIVO**

### **5.1. Importancia de los estudios preliminares**

El diseñador deberá realizar el diseño más eficiente para aplicar el sistema de la HDD y así obtener una aplicación adecuada, una de las vías para lograrlo es consultar un contratista con experiencia y un ingeniero calificado.

Se enumeran a continuación algunas consideraciones generales que pueden ayudar especialmente en lo que respecta a la ubicación del sitio para tubos de polietileno (PE):

Primero, seleccione la ruta de paso, para lograr que la distancia sea la más corta y razonable posible. Se debe tomar en cuenta los obstáculos por los cuales debe pasar la tubería. De esta manera, determinar las distancias, aunque no sean las más cortas, que sean las que tengan un menor costo. Además, se debe tener en cuenta junto con el diseño aplicado en la Norma F1962-11 las condiciones del equipo, así como los radios de giro y esfuerzos a la que se va a ver sometida la tubería.

Segundo, encuentre la ruta y sitios donde la tubería se pueda construir en una longitud continua; o al menos donde se pueda utilizar múltiples segmentos largos fundidos para la inserción. Dado que las fuerzas de arrastre aumentan cuando se tienen que hacer inserciones con radios, es por esto que tener tramos rectos y largos hace que la tubería sufra menos esfuerzos, así se evitan problemas en la construcción y colocación de la tubería.

Tercero, aunque se hayan hecho curvas compuestas, se debe tratar de utilizar una vía lo más rectilínea posible. Puesto que cuando la tubería es exigida al máximo de su capacidad en vías curvas, las barras de perforación fallan lo cual hace que se necesite invertir en nuevas. Calcular las curvas con radios menos pronunciados es esencial para el cuidado del equipo y ahorro en material.

Cuarto, evite la entrada y salida de elevaciones diferenciadas de más de 15 metros. Ambos puntos, tanto el de entrada como de salida, deben estar tan cerca como sea posible y a la misma elevación. Si a esta diferencia de altura le añadimos la presión de halado y una presión de fluido de lechada elevada, entonces, los esfuerzos en la tubería cada vez serán más críticos, lo cual en el peor de los casos ocasiona un rompimiento de la tubería y posteriormente un escape de lechada a chorro del suelo hacia la superficie provocando daños materiales.

Quinto, busque todas las estructuras y servicios públicos enterrados a menos de 10 metros de la ruta de navegación para mini-HDD y 8 metros para aplicaciones maxi-HDD. Uno de los puntos más esenciales en los estudios preliminares del sitio es la ubicación de todo obstáculo que pueda interferir con la colocación de la tubería y así se eviten daños a la propiedad y al equipo mismo.

Sexto, observe y evite las estructuras que se encuentren en el exterior, tales como líneas de energía, puesto que podría limitar la altura disponible para los equipos de construcción. Aunque el proceso de HDD ocupa muy poco espacio de trabajo frente a otros métodos, el espacio real del sitio varía según la distancia, diámetro de tubería y el tipo de suelo. Las travesías largas con tubería de gran diámetro necesitan un equipo de perforación más grande y más potente.

Séptimo, a medida que aumenta el diámetro de la tubería es mayor el volumen de fluido de perforación que debe ser bombeado. Se requieren bombas más grandes para la limpieza de lodo y equipos de almacenamiento. El equipo debe ser escogido dependiendo del tipo de tubería y la presión que deba conducir. No se puede permitir que sea utilizado un mismo equipo para cualquier tipo de colocación, ya que esto puede ocasionar daños en el ambiente y en el equipo.

Octavo, los requisitos de espacio para las plataformas maxi-HDD pueden variar desde unos 30,5 metros de ancho por 45,7 metros de largo para un cruce de hasta 70 metros de ancho y 305 metros por 91 metros de largo para un área cruce de 910 o más metros. Por tal motivo se debe inspeccionar y estudiar con meticulosidad cada tramo donde se vaya a utilizar, la perforadora, ya que el espacio es esencial. Por el lado de la tubería de la perforación, el espacio temporal debe ser suficiente para permitir la fusión y la unión del tubo portador PE en una cadena continua que comienza aproximadamente 23 metros más allá del punto de salida con un ancho de 10,5 a 15 m, este espacio depende del diámetro de la tubería. Ampliar el diámetro

de la tubería requiere equipos de construcción más grandes y pesados los cuales necesitan un mayor margen de maniobra (aunque el uso de PE lo minimiza). La ubicación de la parte inicial de la perforación piloto (salida de la tubería en el proceso de retroensanchamiento) debe ser de 15 metros de ancho por 30,5 metros de largo para la mayoría de los cruces, hasta 30,5 por 46 m para equipos necesarios en los cruces de tubería de gran diámetro.

Noveno, obtenga los planos "tal como se construyó *as built* según el curso final por donde pasaron el escariador y la tubería instalada. Las fuerzas de gravedad pueden haber causado que el escariador vaya ligeramente más profundo que el agujero piloto, y la tubería puede ser apoyada sobre el agujero escariado, esto causa un desfase en la entre la perforación escariada y la colocación final de la tubería. Los planos de la perforación final son esenciales para conocer la ubicación exacta de la tubería y evitar futuros daños a terceros.

## **5.2. Aspectos prácticos del procedimiento constructivo de Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica**

El método constructivo HDD puede tener ciertos problemas cuando se ejecuta debido a su complejidad. Muchos de los casos que se mostrarán a continuación han sido estudiados mediante situaciones reales de problemas que se han presentado en Costa Rica, narrados por personal que ha estado involucrado en trabajos de este tipo. Las condiciones del área intervenida pueden favorecer la aparición de algunas de estas situaciones, por ejemplo: suelos muy cohesivos, presencia de obstáculos bajo el terreno, espacios abiertos con cables de alta tensión, entre otros.

### ***5.2.1. Acumulación de fluido de perforación***

En Costa Rica, este inconveniente puede ocurrir si los contratistas de HDD no hacen una inversión en el equipo necesario, por ejemplo, si se trabaja con una cabeza perforadora que no cuente con un sensor de presión de fluido, puede haber una acumulación de esta arcilla debido a una precipitación de suelo localizada en la zona de excavación que puede llegar a obstruir el flujo del fluido hacia atrás (entrada de la perforadora, salida de la tubería). Esto ocasiona que el fluido, por ejemplo busque otros puntos por los cuales salir, como postes de alumbrado u otros objetos que estén enterrados cerca de la intervención.

En el peor de los casos puede suceder que al perforar bajo carreteras pavimentadas la acumulación de fluido sea tal que levante la carpeta asfáltica. Si aparece este problema, todo el paquete estructural de la carretera se afectaría severamente.

Una alternativa para evitar el problema de acumulación exagerada de fluido si no se cuenta con una cabeza con sensor de presión de fluido, es usar cabezas de perforación que no funcionen con un gran volumen de fluido de perforación. De esta forma, se evita una acumulación producida por algún derrumbe.

Si se cuenta con una cabeza con sensor de presión de fluido (no la presión de suministro de fluido, sino la presión soportada por la sarta de perforación debido a su fluido circundante) dará una señal que alerte un aumento crítico de presión en la tubería, esto puede ser causado por un derrumbe dentro de la perforación. Si se segrega bentonita hacia atrás, es decir, hacia la perforación de entrada, se puede barrer el exceso de material que haya caído y que este obstruyendo la perforación. De igual manera, se previene el acumulamiento de lechada y su posterior salida de forma súbita hacia la superficie.

### ***5.2.2. Cedencia y rompimiento de la tubería dentro de la perforación***

El cálculo de los esfuerzos en la tubería de acuerdo con el criterio de las fórmulas 5 a la 25 del capítulo 2. Traducción de norma ASTM F1962-11, específicamente en la sección 2.8. Diseño y consideraciones de selección de la tubería, asume que la tubería se encuentra rodeada por completo de lechada con bentonita en la zona circundante a la tubería. Puesto que, con esta lechada se evita de que en caso de que suceda un desprendimiento en las paredes de la perforación, la tubería no quede atrapada o inmovilizada bajo el material. Este problema puede ocasionar que se exceda el esfuerzo último axial del material y como resultado la tubería falle dentro de la perforación. Si ocurriera, puede no ser posible retirarla, depende de la distancia que haya recorrido, del grado de entramamiento y de elementos que puedan existir en la superficie, como carreteras.

Una forma de evitar que la tubería sufra este tipo de problema es tener una cabeza escariadora que cuente con un indicador de la presión con la que se está halando. Si existe una acumulación de presión en cierto tramo, puede ser una señal de colapso de las paredes de perforación. Para solucionar el inconveniente y poder continuar, se debe bombear más lechada de perforación con bentonita para disolver el área sellada por el material.

Si el problema no pudo evitarse, lo que procede es hacer una ventana de inspección en la zona de afectación. Luego se corta la tubería en mal estado, se repara el tramo mediante el procedimiento de electro-fusión utilizando el equipo y los accesorios adecuados. Finalmente se continúa con el halado de la tubería.

### ***5.2.3. Inserción de tubería que se va a colocar en tubería existente***

Si no se tiene un conocimiento preciso de la ubicación de tuberías existentes, por ejemplo tuberías de alcantarillado, la cabeza de perforación puede insertarse accidentalmente en ellas, ocasionando un daño permanente en la tubería existente e impidiendo una vez dentro de ella.

Además, se pierde la capacidad de maniobrar ya que no se puede tirar hacia atrás y cambiar la ruta de la perforación una vez hecho el túnel de perforación.

Se debe evitar este tipo de problemas, puesto que si son tuberías de agua o electricidad las que resultan afectadas podrían dar lugar a un verdadero impacto negativo en la zona. Eventualmente, se dejaría fuera de operación los servicios y se provocaría un daño severo en la infraestructura y sus alrededores. La probabilidad de que suceda este tipo de accidente, puede disminuirse al contactar a las entidades correspondientes de la zona, como la municipalidad (que es responsable de los alcantarillados pluviales), el MOPT, el AYA (responsable de los acueductos y alcantarillados sanitarios), el ICE (responsable de las redes eléctricas, telefónica y datos), entre otros. Con el fin de que se pueda contar con un conocimiento preciso de todas las tuberías existentes en el lugar.

Cabe señalar que el inventario actualizado de tuberías, particularmente en zonas urbanas, puede estar incompleto o ser del todo inexistente, por lo que accidentes como el descrito ocurren con frecuencia. Ahora bien, esta falta de información actualizada puede ser un inconveniente de importancia para aplicar esta tecnología. Es muy importante señalar que, a falta de esta información relevante, los contratistas que trabajan con HDD en nuestro país asumen en sus costos de construcción los posibles sobrecostos por daño a otras infraestructuras, por lo que la HDD se ve encarecida.

Una vez que la perforadora haya ingresado en la tubería existente, para solucionar el problema, se debe hacer una ventana de inspección para alcanzar la profundidad a la que está colocada la tubería, luego cortarla y hacer las respectivas reparaciones. Todo con el fin de dejarla en completo funcionamiento. Finalmente, se debe hacer el proceso de electro-fusión en la tubería que se está colocando y continuar con el proceso de perforación.

#### ***5.2.4. Falla de barra de perforación***

En el cruce de trayectorias de perforación, puede haber obstáculos que sean difíciles de sortear. En tal caso, puede ser necesario tomar medidas extremas, por ejemplo, si se tiene un obstáculo

que obligue a la tubería de perforación a tomar una curvatura de radio tan pequeño que fatigue las barras de perforación, se podría optar por hacerlas pasar la trayectoria originalmente trazada. Hay que tener en cuenta que las barras una vez terminado el proceso quedarán prácticamente inservibles. Esta medida aplica siempre y cuando la tubería a colocar pueda tomar dicha curvatura sin ningún problema estructural o hidráulico, lo cual debe comprobarse, antes de proceder con la perforación, mediante los cálculos respectivos realizados de acuerdo con la norma ASTM F1962 y hechos por un consultor experto en el tema.

#### ***5.2.5. Entrabamiento de la cabeza escariadora en suelo o roca***

Generalmente las fuerzas de fricción que se tienen en el suelo no son tan altas como para atrapar la cabeza escariadora, pero el escenario cambia una vez que se está impactando directamente contra un suelo rocoso. Según la dureza de la roca en el lugar, las fuerzas de fricción generadas en la cabeza escariadora son muy altas y puede suceder un entrabamiento. Si esto sucede, se debe detener la máquina de inmediato, ya que puede sobre esforzar su motor y estropear por completo el equipo. Una vez hecho esto se puede intentar hacer una ventana de inspección para ver la superficialidad de la roca e intentar resquebrajarla o removerla con equipo de excavación (por ejemplo, *backhoe*, *bobcat*, o utilizar explosivos), hasta liberar la cabeza escariadora. Si la roca es de mucha dureza y la cabeza escariadora se encuentra trabada a gran profundidad lo mejor es cortar las barras para dejar la cabeza dentro de la roca y buscar una nueva ruta de perforación.

La única manera de evitar este tipo de problemas es tener un buen trabajo de estudios preliminares geotécnicos detallados sobre la ruta. Como se ha mencionado, estos estudios advierten la presencia de roca que podría afectar la máquina, conocer lo anterior mejora la toma de decisiones, antes de hacer los trabajos de perforación, sobre la ruta y el equipo que se va a utilizar. Debe señalarse que, en las licitaciones del ICAA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados) para construcción de acueductos, no se exigen estos estudios preliminares.

## **CAPÍTULO 6. DETERMINACIÓN DE COSTOS**

### **6.1. Introducción**

El aspecto económico es importante, dado que, influye en la ganancia final del constructor. Evidentemente, se deben considerar los costos de una perforación con el método HDD también conocido como método "Topo", ya que aunque tiene sus ventajas, debe luchar contra la competencia directa la cual es el sistema tradicional de zanjeo a cielo abierto.

En este capítulo se comparará específicamente los costos entre el zanjeo tradicional y el método HDD. Para ello, se abordaron los costos de colocación obtenidos mediante las dos licitaciones para el procedimiento de la HDD y los costos de colocación mediante el zanjeo a cielo abierto con los rendimientos obtenidos con el libro *Heavy Construction Cost Data* del grupo RSmeans. Asimismo, se hace una comparación cualitativa de las características de cada uno de ellos y se referencia la duración de la aplicación de la HDD. Finalmente se analizan los resultados obtenidos de las correspondientes comparaciones.

### **6.2. Costos de colocación de tubería con la Perforación Horizontal Direccional**

Se analizaron dos licitaciones para proyectos del AyA (Acueductos y Alcantarillados) en Costa Rica. La licitación abreviada 2014LA-000043-PRI "Mejora y ampliación de Acueducto del Sur de Limón (Construcción de Pasos Elevados para el acueducto de agua potable de Limón Su Talamanca)" consistía de 7 oferentes; mientras que la licitación abreviada 2014LA-000077-PRI "Mejoras y rehabilitación de los sistemas de recolección de la GAM (alcantarillado Sanitario Niño Jesús de Praga, Desamparados)" consistía de 2 oferentes respectivamente.

### **6.2.1. Descripción de los proyectos**

La licitación número 2014LA-000043-PRI "Mejora y ampliación de Acueducto del Sur de Limón (Construcción de pasos elevados para el acueducto de agua potable de Limón sur Talamanca)" contiene en la partida llamada "Cruce bajo autopista utilizando el sistema de Perforación Horizontal (Tipo topo)" las líneas 441.051, 441.052 y 441.053, las cuales tienen las siguientes características:

Cuadro 4. Metros lineales de construcción para la partida "Cruces bajo autopista Licitación 2014LA-000043-PRI" para las líneas 441.051, 441.052 y 441.053

Líneas	Cruces bajo autopista	Metros lineales de construcción
441.051	Cruce bajo autopista utilizando el sistema de Perforación Horizontal (Tipo topo), punto 263-264	33 m
441.052	Cruce bajo autopista utilizando el sistema de Perforación Horizontal (Tipo topo), punto 357-360	36 m
441.053	Cruce bajo autopista utilizando el sistema de Perforación Horizontal (Tipo topo), punto 384	21 m

La licitación abreviada 2014LA-000077-PRI "Mejoras y rehabilitación de los sistemas de recolección de la GAM (alcantarillado Sanitario Niño Jesús de Praga, Desamparados)" contiene una sola línea con la descripción "Tubería PEAD Perforación Horizontal dirigida Tubería PEAD DR7 350 mm", la cual contiene 300 m lineales de construcción.

A continuación se muestra el desglose de costos por oferente para cada una de las líneas para la licitación 2014LA-000043-PRI:

Cuadro 5. Costos en colones de construcción de la conducción mediante HDD (Topo), para la licitación 2014LA-000043-PRI

Empresa oferente	Línea 441.051 punto 263-264	Línea 441.052 Punto 357-360	Línea 441.053 Punto 386
Empresa A	₡ 3.034.000,00	₡ 3.034.000,00	₡ 2.634.800,00
Empresa B	₡ 1.000.000,00	₡ 1.200.000,00	₡ 1.000.000,00
Empresa C	₡ 2.085.520,71	₡ 2.825.544,19	₡ 2.031.700,82
Empresa D	₡ 850.175,84	₡ 800.725,28	₡ 1.437.349,80
Empresa E	₡ 900.000,00	₡ 900.000,00	₡ 900.000,00
Empresa F	₡ 3.200.000,00	₡ 4.000.000,00	₡ 3.200.000,00
Empresa G	No especifica		
Promedio	₡ 1.844.949,43	₡ 2.126.711,58	₡ 1.867.308,44

En el cuadro 5 no se aprecia específicamente el costo de construcción por parte de la Empresa G, esto provoca un sesgo en la muestra. Los promedios de costos están dados según la totalidad de los oferentes menos la empresa G.

Cuadro 6. Costos en colones de construcción de la conducción mediante HDD (Topo), para la licitación 2014LA-000077-PRI.

Empresa oferente	Línea única de Perforación Horizontal
Empresa H	₡ 18.000.000,00
Empresa B	₡ 42.000.000,00
Promedio	₡ 30.000.000,00

Se aprecia un sesgo en la oferta de la Empresa B, esto ocurre dado que la relación entre la cantidad ofertada en la licitación 2014LA-000043-PRI y la 2014LA-000077-PRI por metro lineal es de ₡ 30.303 a ₡ 140.000 colones. El costo por metro lineal es evidentemente muy superior de la oferta licitación 2014LA-000077-PRI, lo cual puede ser ocasionado por un aumento en el precio, distribuyendo así ese sobrecosto en otros rubros, técnica muy frecuente cuando son presentados los presupuestos de obra para obtener una reserva presupuestaria al inicio de la ejecución.

El costo por construcción por metro lineal de la empresa H es de ₡ 60.000 colones. Este costo fue obtenido dividiendo su presupuesto (₡ 18.000.000,00 colones) entre la cantidad de metros lineales a ejecutar (300 m).

Para entender mejor la comparación de costos por metro lineal de cada uno de los oferentes, se presenta un cuadro con los costos de construcción por metro lineal a ejecutar de cada oferente.

Cuadro 7. Costo por metro lineal de construcción según la de cantidad de metros lineales a ejecutar.

Empresa Oferente	Cantidad a ejecutar por metro lineal			
Empresa oferente	300 m	36 m	33 m	21 m
Empresa A		Ø84.278	Ø 91.939	Ø 125.467
Empresa B		Ø 33.333	Ø 30.303	Ø 47.619
Empresa C		Ø 78.487	Ø 63.198	Ø 96.748
Empresa D		Ø 22.242	Ø 25.763	Ø 68.445
Empresa E		Ø 25.000	Ø 27.273	Ø 42.857
Empresa F		Ø 111.111	Ø 96.970	Ø 152.381
Empresa G	No especifica			
Empresa H	Ø 60.000			
Promedio	Ø 60.000	Ø 59.075	Ø 55.908	Ø 88.919

En el cuadro anterior se evidencia cómo a medida en que disminuye la cantidad de metros lineales a los cuales se les debe aplicar dicho método, su costo de operación va aumentando; y cómo entre mayor sea la cantidad de metros lineales, el costo llega un punto en el que se mantiene.

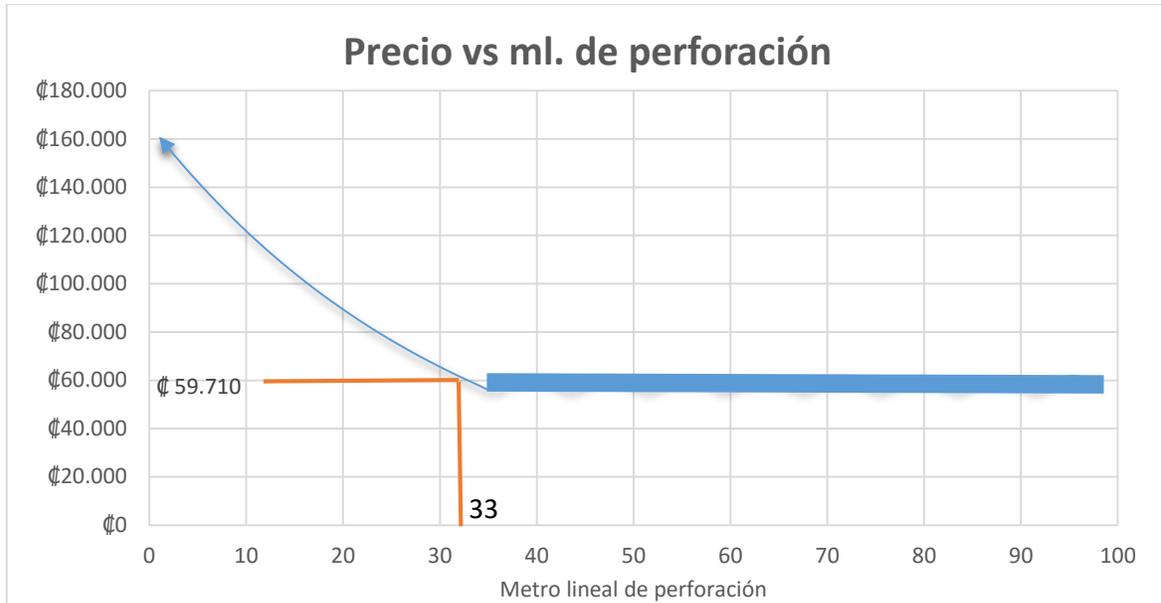


Figura 19. Precio vs ml de perforación

En la figura 17 se muestra cómo, una vez que son superados los 33 ml de construcción mediante este método, el costo fluctúa casi asintóticamente entre los  $\text{COP } 56.112$  y  $\text{COP } 67.583$  colones. Antes de eso, su costo se vuelve exponencial a tal grado que disminuir de 33 ml a tan sólo 15 ml de construcción costaría exactamente lo mismo de manera global.

Cuadro 8. Cuadrilla típica para los trabajos con Perforadora Horizontal Direccional

	Cuadrilla
Colocación de tubería	Capataz
	1 operadores de equipo
	1 Perforadora Horizontal Direccional
	2 peones
	Bobcat, minicargador CASE 455C
Colocación y pega de tubería	Plancha
	2 peones
	1 operario
	1 operador de Bobcat

### 6.3. Duración de la perforación en Costa Rica

Se observó la duración de construcción por metro lineal por parte de las empresas. Se toma como base el cronograma de trabajo de las licitaciones ya antes descritas como se muestra a continuación.

Cuadro 9. Duración de la Perforación Horizontal Direccional según las licitaciones descritas.

Duración en días			
	263-264	357-360	386
Empresa A	12	12	12
Empresa B	No encontrado		
Empresa C	No legible		
Empresa D	26	26	26
Empresa E	8	6	6
Empresa F	20	20	20
Empresa G	15	15	15
Promedio	16	16	16
Promedio por metro lineal en días	0,5	0,4	0,8
Promedio por metro lineal horas	4,9	4,4	7,5
Promedio total ml/hrs	5,6 hrs		

En el cuadro anterior se aprecia cómo el promedio obtenido es similar para cada uno de los puntos, resulta de este cálculo una duración de 5,6 horas por metro lineal de construcción.

#### **6.4. Costos de colocación de tubería por medio de método tradicional**

Se hicieron cálculos de rendimiento con sus respectivas cuadrillas basados en el libro *Heavy construction Data*, del grupo RSmeans, para poder hacer un análisis comparativo con el método tradicional de colocación de tuberías mediante zanjeo. Además, se basó en el decreto 38157-MOPT para obtener las tarifas máximas de alquiler de maquinaria. Para el costo por hora de los trabajadores necesarios en la cuadrilla, se tomó el salario mínimo de la lista de salarios del II semestre del 2014 más un porcentaje por cargas sociales.

Se obtuvieron los rendimientos de excavación según el libro *Heavy construction Data* para un excavador 1/2 C.Y.4 a 6 pies de profundidad (1.23 a 1.83 m), con una cuadrilla llamada "B-11M". El rendimiento resultante es 6,11 m<sup>3</sup> por hora. Según las observaciones en campo de la Perforación Horizontal en el proyecto San Ramón – Palmares, se considera un rendimiento de 6 ml de pega y colocación de tubería por hora y 0,22 horas por metro lineal de compactación. (No se hizo un análisis de rendimientos para la colocación y pega de la tubería, simplemente se observó en un mismo día un promedio de duración para las actividades).

A continuación se presenta un cuadro con los costos por hora de la maquinaria y del personal necesario.

Cuadro 10. Desglose de costos para cuadrilla con zanjeo tradicional

	Cuadrilla	Costo en colones por hora	Costo en colones por metro lineal
Excavación, carga y relleno	Capataz	¢2.200	¢360
	2 operadores de equipo	¢1.300	¢213
	6 choferes de vagoneta	¢7.742	¢1.266
	Dozer 410 HP, Caterpillar D9	¢79.859	¢13.057
	6 Vagonetas internacional 6x12 de 12 m	¢171.078	¢27.972
	Cargador F.E. W.M. 55 CY, Caterpillar D910	¢15.423	¢2.522
Colocación y pega de tubería	Bobcat, minicargador CASE 455C	¢18.139	¢3.023
	Plancha	¢7.367	¢1.228
	2 peones	¢2.600	¢433
	1 operario	¢1.267	¢211
	1 operador de Bobcat	¢1.267	¢211
Compactación	Compactador de zanjas, Bomag BW 650T	¢12.602	¢2.800
	2 peones	¢2.600	¢578
<b>Total</b>		<b>¢323.444</b>	<b>¢53.874</b>

Suponiendo que el costo de la suma del personal y la maquinaria es constante según la cantidad de metros lineales de construcción, se puede observar una comparación entre el método tradicional y la Perforación Horizontal Direccional:

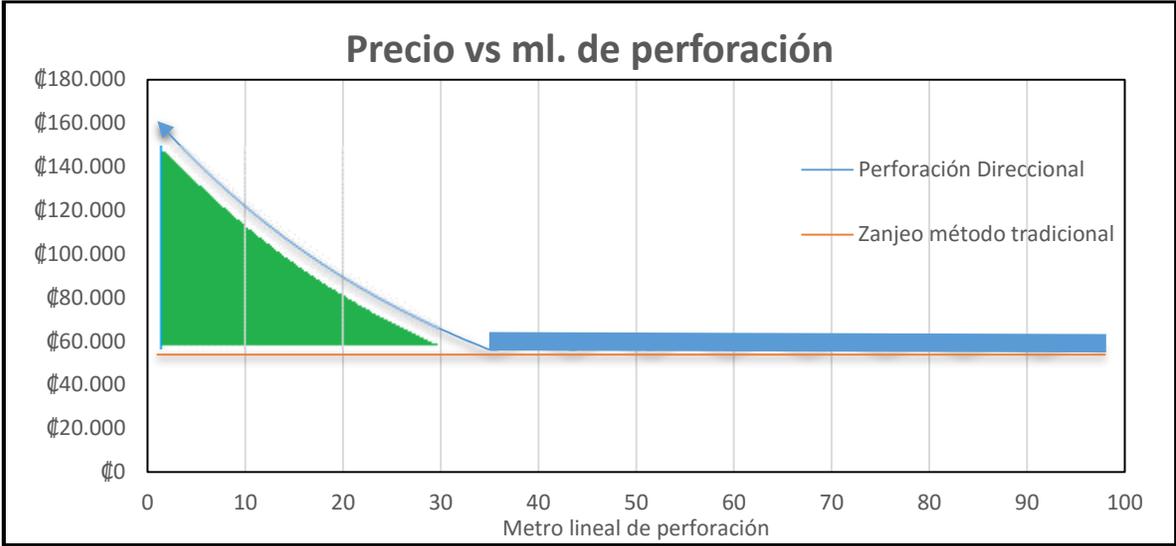


Figura 20. Comparación de precios.

En la figura 20 se observa la diferencia de precios con la que se debe tomar el criterio de selección. Esto se puede lograr haciendo un análisis de la diferencia entre las curvas en la construcción de pocos metros lineales de construcción. Además, se observa como para grandes distancias de construcción se deben tomar en cuenta otras variables ya que el costo llega a ser muy similar entre los métodos. A continuación se presenta un cuadro de las diferencias cualitativas entre los métodos, lo cual puede ayudar a la selección de la metodología a aplicar, ya sea zanjeo tradicional o HDD.

Cuadro 11. Comparación entre la metodología de zanjeo tradicional y la Perforación Horizontal Direccional.

<b>Zanjeo tradicional</b>	<b>Perforación Horizontal Direccional</b>
No requiere personal especializado, únicamente se necesita el trazo de ubicación por donde pasa la tubería.	Requiere personal especializado, dado que es un método novedoso pocas personas tienen la experiencia necesaria para el manejo de la perforadora
Después de 1.80 m de profundidad son necesarios ademes y equipo especial para sostener la tierra, se deben colocar bloques de tope para que los vehículos se detengan antes de poner en peligro los taludes, además de tener un centro de acopio de material definido y alejado de la zona de intervención	No es necesario el uso de ademes u otros ya que no se desestabiliza el terreno con su aplicación, ni se necesita buscar zonas de acopio para material ya que el mismo no es removido.
Necesita mucho espacio para la excavación y colocación de la tubería por el espacio que necesita la maquinaria.	El espacio necesario para la colocación de la tubería es mucho menor ya que se necesita menos maquinaria en la zona de ejecución.
Es necesario contar con máscaras antigás, casco y equipo especial por la peligrosidad de las bolsas de gases tóxicos que puedan escapar una vez excavado.	No se pone en riesgo la vida de las personas por gases ya que no se hace una vía de comunicación hacia el exterior, únicamente en las ventanas de inspección.
Se puede utilizar cualquier tipo de tubería que se requiera colocar, así como sus respectivas maneras de unión entre las mismas.	Para esta metodología es recomendable utilizar únicamente tubería PAD, y para su unión se debe hacer mediante termo o electro fusión.
Son necesarias escaleras u otro tipo de equipo para el acceso a la zanja, las cuales pueden resultar peligrosas.	No se tiene la necesidad de acceso al lugar de la colocación ya que se sigue vía digital por un controlador remoto.

## 6.5. Análisis de Resultados

Como se puede apreciar en la figura 20, el costo del zanjeo tradicional es muy parecido al costo de la Perforación Horizontal Direccional cuando se debe hacer una perforación mayor a 33 ml (aproximadamente). Si se requiere hacer una excavación menor a los 33 ml que no amerite intervenir en cruces de obstáculos, por ejemplo ríos, carreteras entre otros; y cuente con un gran espacio para trabajar, es preferible utilizar el método tradicional.

Dependiendo de la importancia de los obstáculos que se deban atravesar (ríos, carreteras principales, zonas de riesgo, zonas protegidas, tuberías existentes, obstáculos de gran tamaño como rocas entre otros) es muy recomendable utilizar el sistema de Perforación Horizontal, es decir, no se va a romper una calle de gran importancia con zanjeo tradicional si existe el método HDD que genera menores daños en la superficie. En otras palabras, si se deben atravesar obstáculos en una distancia muy corta de construcción, se debe evaluar el impacto que genere la destrucción del terreno para tomar una decisión sobre qué método utilizar. Pues por tal motivo, si se tiene un terreno muy obstaculizado, de difícil acceso y con campos muy estrechos para maniobrar, es preferible utilizar el sistema de Perforación Horizontal Direccional.

El área de color verde que se muestra en la figura 20 define el costo máximo que podrían tener las labores de demolición y reconstrucción de las obras existentes en la superficie del terreno donde se colocará la tubería utilizando zanjeo tradicional. Se observa que el costo del zanjeo tradicional se iguala con la Perforación Horizontal. Es decir, se puede inferir que si el costo de demolición y reposición de las obras existentes es superior al área comprendida en la sección verde (superior a 33 ml) es económicamente óptimo utilizar la Perforación Horizontal.

Los datos sugieren que se encarecen los trabajos donde existen elementos como construcciones en la superficie, entonces para zonas urbanas se debe preferir el uso de la Perforadora Horizontal Direccional, por el poco espacio con el que se cuenta y la cantidad de obstáculos, por ejemplo tuberías existentes, carreteras, aceras, casas, edificios.

A pesar de que no se hace un análisis comparativo de la duración entre los métodos, dado que no existe un estudio de rendimientos para el método HDD, se obtuvieron duraciones mediante los cronogramas de trabajo de las empresas oferentes con el fin de que el lector pueda comparar su metodología de colocación de tubería con la información aquí brindada.

Finalmente, cabe señalar que en el capítulo 7.2.1. Descripción de los proyectos, se menciona que rara vez se cuenta con información confiable de otras infraestructuras instaladas en los sectores intervenidos con la tecnología de HDD. Esto hace que exista un sobre costo al ofertar en proyectos de gobierno, que aplican los contratistas de HDD, ya que ellos deben garantizar una ganancia previendo inconvenientes por la falta de estudios preliminares. Ese sobre costo puede ser la razón del sesgo que se observa en los datos comparativos de proyectos con HDD.

## **6.6. Limitaciones**

- Dado que el análisis se realizó únicamente con la obtención de dos licitaciones de un mismo ente gubernamental, el análisis se ve afectado por el tamaño de la muestra. A pesar de que la muestra es pequeña el análisis de resultados revela una tendencia esclarecedora sobre las diferencias entre el zanqueo y la HDD.
- Una de las licitaciones consultadas trabajaba la colocación de tubería en la zona de Limón. Los trabajos que se realizan en la zona caribe de Costa Rica tienen una tendencia a ser más caros en comparación con los realizados en la GAM, dado que, se tiene un mayor costo de acarres y compras de materiales. Otro aspecto a considerar es el tema de inseguridad que presenta la zona aumentando los costos en caso que se dé algún episodio de criminalidad en la zona de trabajo. Todas estas variables no se consideran en el análisis comparativo de los métodos.
- No se consideran diferencias por tipos de suelo, por ejemplo, un suelo rocoso exige equipo especial en las dos metodologías. Esta variable puede impactar considerablemente los costos, mas no se ve reflejada en el análisis descrito.
- Los costos con los que se hizo el análisis son únicamente de construcción, dejando de lado porcentajes de utilidad, imprevistos, entre otros. Estos porcentajes pueden afectar

los costos de las metodologías así como la comparación antes descrita.

- Los proyectos consultados para la metodología HDD fueron licitados por una institución del gobierno, lo cual puede afectar las ofertas de las empresas en comparación con clientes de carácter privado.
- Los proyectos consultados cuentan con más partidas que la colocación de tubería por perforación Horizontal, es decir, cuentan con otras líneas ofertadas, por ejemplo, construcción de carreteras, pasos elevados, entre otros. Por su gran tamaño puede que los costos de construcción de las empresas no hayan sido realizados con el debido cuidado.
- La manera de garantizar la seguridad en el proyecto entre metodologías es diferente, por ejemplo, señales de aviso, vallas de seguridad, ademes de retención, entre otros. Esta variable no fue tomada en cuenta en el análisis de costos.
- Para el análisis de rendimientos en la excavación y colocación del zanjeo tradicional, no se toma en cuenta el uso de ademes u otro tipo de equipo para poder trabajar.

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. Conclusiones**

- Se logró un documento técnico el cual servirá de base para la creación de una normativa nacional en la aplicación de la Perforación Horizontal Direccional en Costa Rica. A su vez, el documento funciona como difusor de esta técnica en el mercado nacional puesto que antes no se contaba con una documentación que trataran el tema.
- La norma indica ciertos parámetros de seguridad, pero es de suma importancia que el contratista tome en cuenta mediante la experiencia, los cuidados necesarios que se deben tener a la hora de ejecutar la obra con el método de Perforación Horizontal direccional.
- Se tradujo al español la normativa ASTM F1962-11 para que tenga aplicabilidad en Costa Rica. Además, se comprobó la aplicación de las ecuaciones descritas en la norma en el SI (Sistema Internacional de medidas), dado que es de acatamiento obligatorio si se quiere utilizar en nuestro país. Se ha probado la aplicación de esta traducción, dado que es de nuestro conocimiento que ha sido tomada como base para la elaboración de la norma nacional respectiva en el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO).
- Se han añadido cambios a la norma ASTM F1962-11 para adaptarla al mercado costarricense dado que existen leyes e instituciones en nuestro país encargados de aspectos que en la normativa original se encuentra referida a instituciones y leyes estadounidenses.
- Se logró mostrar las características del equipo a utilizar en la Perforación Horizontal Direccional, el cual debe seleccionarse de acuerdo con el tipo de terreno y tubería a colocar. Con el fin de guiar a los interesados en adquirir estos equipos, se brindaron recomendaciones en su uso y mantenimiento.

- La investigación describe algunos problemas en la colocación de la tubería con el método HDD. Asimismo se brindaron, acertadamente, las respectivas soluciones así como las recomendaciones para evitar dichos problemas.
- Se concluye que los estudios preliminares son de suma importancia para el método constructivo Perforación Horizontal Direccional y por tanto una de las etapas fundamentales en la implementación del mismo. Debido a que la revisión de licitaciones efectuada hace evidente que estos estudios preliminares no se realizan en la cantidad y alcances que recomienda la normativa ASTM, el uso de la HDD queda a discreción de los concursantes, quienes se ven obligados a encarecer sus ofertas con esta tecnología pues desconocen la magnitud de los riesgos que se enfrentarán en el proyecto, por ejemplo, infraestructuras existentes, diversidad de tipos de suelo, niveles freáticos, fallas geológicas, entre otros.
- Se comparó el método tradicional de apertura de zanjas con la Perforación Horizontal Direccional. Se evidencia que dependiendo de variables como complejidad, zona de colocación y presupuesto con la que se cuenta para la colocación de tuberías bajo tierra, así debe ser la escogencia del método constructivo a aplicar.
- Se obtuvo que dependiendo de la cantidad de metros lineales de perforación y colocación de la tubería, los costos al utilizar la metodología HDD resultan similares si son colocaciones de gran longitud, no así si son longitudes cortas, ya que, en estas se debe considerar el costo de utilizar zanqueo dependiendo de la importancia de la infraestructura que esté construida sobre la trayectoria de colocación, así como el costo de demolición.
- Se concluye finalmente que existe la necesidad de investigar más a fondo la metodología HDD en nuestro país, pues hay escasez de información, por ejemplo, no se cuenta con un análisis de rendimientos ni una tabla de costos base para regular los precios de esta metodología.

## 7.2.Recomendaciones

- Se recomienda el uso de los estudios preliminares completos para el método constructivo Perforación Horizontal Direccional (HDD), y así garantizar que la aplicación sea económica y segura. Además debe contarse con un perfil geológico-geotécnico del sector donde se instalará la tubería y con un inventario de infraestructuras existentes en la proximidad del sector a intervenir. (Ver anexo 6).
- Se recomienda a las instituciones que puedan obtener más provecho de esta tecnología como el ICAA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados) y la ESPH (Empresa de Servicios Públicos de Heredia). Estas dos entidades deberían adoptar los lineamientos de la norma ASTM F1962-11 como guía de diseño y aplicación.
- Se debe investigar más a fondo el costo de implementar el método constructivo de Perforación Horizontal Direccional para dar una aproximación precisa del costo del mismo en Costa Rica. En este sentido se puede hacer con una recopilación de trabajos hechos con el método a través del tiempo en nuestro país.
- Se sugiere utilizar el equipo adecuado dependiendo de la demanda de caudal que tenga la tubería, dependiendo de su diámetro, para su colocación y así evitar gastos innecesarios de dinero por reparaciones o reposición del mismo, por ejemplo, los daños provocados por cabezales de perforación que no cuenten con indicadores de presión de fluido.
- Se aconseja investigar el uso de HDD con tuberías de otros materiales para electricidad y telefonía, o tuberías de hierro dúctil para acueductos puesto que este trabajo se ha limitado al uso de la HDD con tuberías de polietileno de alta densidad, las cuales si bien han tenido una creciente aceptación en el mercado costarricense, no son las únicas tuberías que pueden instalarse con HDD.

- Se recomienda que las instituciones relacionadas con este tipo de proyectos conozca con detalle la normativa ASTM respectiva y que brinde capacitación a sus equipos de diseño e inspección en la misma. En especial, los inspectores deben contar con un protocolo de inspección que podría orientarse por los temas desarrollados en este proyecto de graduación.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- A.P.Moser and Steven Folkman. (2008). *Buried Pipe Design*. New York City: McGraw Hill.
- Acueductos y Alcantarillados. (2014). 2014LA-000077-PRI. *Alcantarillado Sanitario Niño Jesús de Praga, Desamparados*. San José , Pavas, Costa Rica.
- Acueductos y Alcantarillados. (2014). Licitación Abreviada 2014LA-000043-PRI. *Construcción de pasos elevados para el acueducto de agua potable de Limón Sur y Talamanca*. San José, Pavas, Costa Rica.
- ASTM, N. (2011). F-1962. En *Norma ASTM* (págs. Standard Guide of: Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings).
- Breedy, I. m. (22 de marzo de 2014). Información Perforación Horizontal Direccional. (J. D. Arce, Entrevistador)
- Castro, J. C. (2007). *Perforación Horizontal Direccional, ejemplo de aplicación: Cruzamiento subfluvial*. México.
- Center, T. U. (2005). Trenchless Technology Solutions for Professional Training Sessions. *Construction Interference Cost Reduction Demonstration (CONCORD)* (pág. 186). New York City: Polytechnic University.

- Consejo de Salud Ocupacional. (s.f.). *Boleta de Inspección Condiciones de Salud Ocupacional en Construcción*. Área de Construcción, San José. Recuperado el 2015, de consalud@ice.co.cr
- Institute, P. P. (2012). En *Guidelines for Use of Mini-Horizontal Directional Drilling for Placement of High Density Polyethylene Pipe*. Plastic Pipe Institute.
- Kussmaul, C. p. (2003). *Geología de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica, 2000. Recuperado el 2015
- McElroy. (2013). *McElroy Manufacturing, Inc*. Recuperado el 2015, de [www.Mcelroy.com](http://www.Mcelroy.com)
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2015). *Tarifas para Alquileres de Maquinaria*. Decreto 38157, San José.
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (s.f.). *Reglamento de Seguridad en Construcciones*. Recuperado el 2015
- Molina. (2007). *Fundición dúctil Molina*. Recuperado el 2015, de <http://www.fundicionductilmolina.com/CFEC/tuberiadepolietileno.htm>
- MyV Costa Rica. (2014). *Estudio de suelos Ruta: San Ramón-Palmare*s. San José.
- P, M. (1993). En *Review of a calculation method for earth pressure on pipelines installed by directional drilling*. Holand: Grondmechanica Delft.
- Pipelines, W. (2012). *Going Deep HDD World Pipelines*.
- Technology, T. (2013). *Horizontal Directional Drilling* .
- Vermeer. (2012). *Fundamentos y técnicas de la Perforación Horizontal Dirigida. Fundamentos y técnicas de la Perforación Horizontal Dirigida, Costa Rica*, (pág. CD explicativo). Heredia.

**ANEXOS**

## **Anexo 1**

## **GLOSARIO**

### **Agua dura**

Es aquella que contiene un alto nivel de minerales, en particular sales de magnesio y calcio. A veces se da como límite para denominar a un agua como dura una dureza superior a 120 mgCaCO<sub>3</sub>/L.2.

### **Back Reamer (Ampliador de arrastre) Traducción según Vermeer**

Definición: Su función es ampliar el orificio de la perforación a un tamaño adecuado para la colocación del producto

### **Bentonita según definición del Polyethylene Pipe Institute**

La bentonita es una arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro, utilizada en cerámica. El nombre deriva de un yacimiento que se encuentra en Fort Benton, Estados Unidos. El tamaño de las partículas es seguramente inferior a un 0,03% al del grano medio de la caolinita.

El tipo más normal es la cálcica. La sódica se hincha cuando toma contacto con el agua. El hierro que contiene siempre le da color, aunque existe también una bentonita blanca. Este tipo dará un mejor color en reducción que en la oxidación cuando se emplea en cuerpos de porcelana. Existen diversos tipos de bentonita que varían tanto en la plasticidad como en la dureza. Existen unas pocas, como la tierra de batán, que carecen totalmente de plasticidad.

Es una arcilla muy pegajosa con un alto grado de encogimiento (los enlaces entre las capas unitarias permiten la entrada de una cantidad superior de agua que en la caolinita) y tiene tendencia a fracturarse durante la cocción y el enfriado. Por ese motivo no conviene trabajarla sola o como materia predominante de una masa. Su gran plasticidad puede servir de gran ayuda a cuerpos del tipo porcelana. También ayuda a la suspensión del barniz.

### **Bore hole (Orificio de la perforación) Traducción según Vermeer**

El orificio de perforación es elaborado por la perforación piloto en primera estancia, donde la cabeza de perforación hace un orificio inicial que luego se verá agrandado por los ampliadores de arrastre hasta alcance un diámetro suficiente para la colocación de la tubería.

### **Bore path (Trayecto de la perforación) Traducción según Vermeer**

Definición: Previamente escogido por ingenieros especialistas en geología y con estudios de suelo. Este trayecto definirá el destino final donde irá colocada la tubería.

### **DiGiTrak (Sistema de localización remoto)**

Definición: Equipo de localización manual que da seguimiento y guía a la cabeza de perforación, dando así la ruta a seguir. Se puede obtener de diferentes fabricantes.

### **Drill Heads (Cabezales de perforación) Traducción según Vermeer**

Definición: Existen varios tipos y su escogencia dependerá del suelo en la cual serán aplicadas. Son utilizadas para romper el suelo mientras rotan y segregan fluidos (como agua) para facilitar su paso en el mismo.

### **Drill Stem (Barras de perforación) Traducción según Vermeer**

Definición: Son barras generalmente de hierro con roscas en sus extremos, las cuales se ven unidas para ir abriendo paso en el suelo. La primera barra debe estar unida a la cabeza de perforación y las siguientes dan el empuje suficiente para que todas avancen mientras se va haciendo la perforación piloto.

### **Efecto de ovalidad**

Se puede definir como la forma geométrica que toma la tubería debido a la compresión de tal manera que la presión de afuera trata de comprimir las paredes de la tubería. En otras palabras se origina por el aplastamiento de una tubería por una carga de presión. Esta actúa sobre las paredes externas de la misma y es superior a su capacidad de resistencia lo cual hace que geométricamente tome forma de ovalo.

### Escala de Dureza de Mohs

Cuadro X1. Dureza de Mohs

Dureza	Mineral	Se raya con / raya a	Composición química
1	<a href="#">Talco</a>	Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	<a href="#">Yeso</a>	Se puede rayar con la uña con más dificultad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	<a href="#">Calcita</a>	Se puede rayar con una moneda de <a href="#">cobre</a>	$CaCO_3$
4	<a href="#">Fluorita</a>	Se puede rayar con un cuchillo de <a href="#">acero</a>	$CaF_2$
5	<a href="#">Apatita</a>	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-, F-)$
6	<a href="#">Ortoclasa</a>	Se puede rayar con una lija para el acero	$KAlSi_3O_8$
	<a href="#">Cuarzo</a>	Raya el vidrio	$SiO_2$

	<a href="#">Topacio</a>	Rayado por herramientas de carburo de <a href="#">wolframio</a>	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH},\text{F})_2$
	<a href="#">Corindón</a>	Rayado por herramientas de carburo de silicio	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	<a href="#">Diamante</a>	El material más duro en esta escala (rayado por otro diamante).	<a href="#">C</a>

### **Escariado del agujero piloto según definición del Polyethylene Pipe Institute**

La operación ESCARIADO consiste en utilizar una herramienta adecuada para abrir el agujero piloto a un diámetro ligeramente más grande que la tubería a colocar. El porcentaje de aumento en el tamaño depende de muchas variables, incluyendo los tipos de suelo, la estabilidad del suelo, la profundidad, el lodo de perforación, la presión hidrostática del pozo, etc. Normalmente sobre-dimensionamiento puede ser 1,2 a 1,5 veces el diámetro de la tubería a colocar. Mientras que el sobre-dimensionamiento es necesaria para la inserción, significa que la tubería insertada, tendrán que realizar empujes verticales sin soporte lateral significativo desde el suelo circundante.

Antes del halado, un escariado final se realiza normalmente utilizando el mismo tamaño del escariador como se usa cuando el tubo se retira (pase de hisopo). El pase de hisopo limpia el pozo, elimina restantes de gravas finas o terrones de arcilla y puede compactar las paredes de la perforación.

El escariador es la herramienta con la cual se realiza una operación mecanizada para conseguir un buen acabado superficial con ciertas tolerancias dimensionales, o bien simplemente para agrandar agujeros que han sido previamente taladrados con una broca a un diámetro un poco inferior.

### **Estratificación**

La estratificación supone siempre la existencia de diferentes niveles o estratos de suelo que se caracterizan por determinados elementos y que son, entonces, diferenciables del resto de los niveles a partir de ellos.

La operación de halado consiste en tirar toda la longitud de la tubería en un segmento (generalmente) a través del lodo de perforación a lo largo de la vía de agujero escariado. La adecuada manipulación de la tubería, acunado, minimización de la flexión, la inspección de la superficie, y la soldadura por fusión flexión son procedimientos que deben tener seguimiento. Lecturas de fuerza de tracción axial, inserción constante velocidad, flujo de lodo tasas circulación / salida, y el material de archivo de longitud instalado debe ser grabada. La velocidad de la retirada oscila generalmente entre 1 a 2 pies por minuto.

## **Hojas MSDS**

Material Safety Data Sheet o por su traducción al español Hoja de datos de seguridad de materiales es un documento que contiene información sobre uno o varios compuestos químicos que conforman un material en uso o desarrollo; la información abarca p/ej. el modo seguro en que se debe utilizar, el almacenaje, el manejo de recipientes, los procedimientos de emergencia e información sobre los efectos potenciales a la salud que podría tener como material peligroso.

¿Qué información exactamente debe contener una MSDS?  
Se reconoce, por uso y costumbre y por algunas normas de referencia, que debe haber al menos 9 categorías de información que tienen que estar presentes en cada MSDS. Éstas son:

Identificación química

Información sobre el fabricante

Ingredientes peligrosos

Propiedades físicas y químicas

Información sobre peligros de incendio y explosión

Información sobre su reactividad

Información sobre peligros a la salud

Precauciones para uso y manejo seguros

Control de la exposición y protección personal

## Índice RQD

Definición: (Rock Quality Designation) desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

### *Procedimiento:*

Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayores que 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m. a partir de los testigos obtenidos en la exploración.

Medida del RQD en testigos de Exploración 150

Se deben incluir los discos del núcleo ocasionados por rotura mecánica de la roca como parte del RQD.

$$RQD = \frac{\text{Sumade10}}{l_{tot}} * 100\%$$

(*Sumof10*) = Suma de la longitud de testigos superiores a 10 cm

$l_{tot}$  = Longitud total de sondeo

### *Segundo procedimiento*

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área o zona predeterminada de la operación minera.

RQD Determinado en el campo por el área de Geotecnia, en un tramo longitudinal de pared expuesta d)  $RQD = 100e^{-0.1\lambda} \times (0.1\lambda + 1)$  Priest y Hudson, 1976

Donde:  $\lambda$  = Nro. De Fisuras / Espacio (Span)

### *Tercer procedimiento*

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro cúbico ( $J_v$  = Joint Volumétric number), determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área o zona predeterminada de la operación minera.

Comprende el calculo del RQD en función del número de fisuras por metro cúbico al realizar el levantamiento litológico estructural de las paredes de la mina, este se usa para voladura:

$$RQD = 115 - (3.3) J_v$$

Donde:  $J_v$  = número de fisuras por metro cúbico

Nota: El  $J_v$  se calcula sumando el número de fisuras por metro que corten de manera independiente a cada uno de los 3 ejes de un cubo imaginario en el cuerpo rocoso materia de análisis. No se debe contar una fisura en más de un eje, por ejemplo, si una fisura corta al eje x y al eje y, la contaremos bien en el eje x o en el eje y pero no en ambos. Para tener una mayor precisión, mediremos una longitud adecuada en cada eje y luego hallaremos el número de fisuras en un solo metro, haciendo una regla de 3 simple.

Así tendremos:

$$J_v(\text{eje}) = (\# \text{ de fisuras} / \text{longitud del eje})$$
$$J_v = J_{vx} + J_{vy} + J_{vz}$$

y finalmente:

$$RQD = 115 - (3.3) J_v$$

lo que representa el porcentaje de RQD.

### *Comparativa*

Cuadro X2. Índice cualitativo calidad de la masa rocosa

RQD	Rock mass quality
<25%	muy pobre

25-50%	pobre
50-75%	regular
75-90%	bueno
90-100%	muy bueno

### **Halado según definición del Polyethylene Pipe Institute**

La operación de halado consiste en tirar toda la longitud de la tubería en un segmento (generalmente) a través del lodo de perforación a lo largo de la vía de agujero escariado. La adecuada manipulación de la tubería, acunando, minimización de la flexión, la inspección de la superficie, y la soldadura por fusión flexión son procedimientos que deben tener seguimiento. Lecturas de fuerza de tracción axial, inserción constante velocidad, flujo de lodo tasas circulación / salida, y el material de archivo de longitud instalado debe ser grabada. La velocidad de la retirada oscila generalmente entre 1 a 2 pies por minuto.

### **Lechada**

Mezcla de fluido de perforación (podría ser Bentonita), agua y tierra. La cual cumple una función de sellamiento.

### **Litificación**

Es el proceso, generalmente de compactación y cementación, por el cual los sedimentos se convierten en rocas sedimentarias.

### **Lodo de perforación según definición del Polyethylene Pipe Institute**

Por lo general, un "lodo de perforación", como fluido de arcilla bentonita se inyecta en el agujero durante corte y fresado para estabilizar el agujero y quitar cortes de suelo. El lodo de perforación se puede hacer de arcilla o polímeros. La arcilla primaria para lodo de perforación es sodio montmorillonita (bentonita). Tierra apropiada y bentonita refinada se añade al agua fresca para producir un "lodo". El barro reduce el esfuerzo de torque de perforación, y da estabilidad y apoyar al agujero. El fluido debe tener una resistencia de gel

suficiente para mantener recortes en suspensión para el transporte, para formar una torta de filtro en la pared del pozo que contiene el agua dentro del fluido de perforación, y para proporcionar lubricación entre el tubería y el pozo de sondeo en retroceso. Los fluidos de perforación están diseñados para que coincida con el suelo y el cortador. Ellos son monitoreados durante todo el proceso para asegurar que el agujero permanezca estable, las bombas no están sobrecargados de trabajo, y la circulación de fluido a lo largo del pozo es mantenido. Pérdida de la circulación podría causar un bloqueo y posiblemente sobre esfuerzo de la tubería durante el retroceso.

Los lodos de perforación son tixotrópico y así que si no tiene perturbaciones se va a poner espeso. Sin embargo, a menos que se añaden agentes cementantes, el lodo una vez espeso no es más rígido que una arcilla muy suave. El lodo de perforación ofrece poco o ningún soporte lateral para el tubo.

### **Mini-Perforación Horizontal Dirigida (Polyethylene Pipe Institute)**

La Industria distingue entre mini-HDD y HDD convencional, que es a veces referido como maxi-HDD. Plataformas Mini-HDD normalmente pueden manejar tubos de hasta a 10 "o 12" de diámetro y se utilizan principalmente para la construcción de utilidad en las zonas urbanas, mientras que HDD plataformas suelen ser capaces de manejar las tuberías tan grandes como 48 " de diámetro.

Estas máquinas tienen fuerzas de halado significativamente más grandes que van hasta varios cientos de miles de libras.

### **OSHA**

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) es una agencia del Departamento de Trabajo de Estados Unidos. Tiene su sede en Washington DC. OSHA hace cumplir las leyes sobre la seguridad y salud de trabajadores. El Secretario Auxiliar de Trabajo para Asuntos de Seguridad y Salud Ocupacional es el jefe de la agencia. La Ley de Seguridad y Salud Ocupacional de 1970 (Ley OSH) estableció OSHA.

## **Perforación Piloto según definición del Polyethylene Pipe Institute**

Escarear el agujero piloto es la clave para un proyecto de perforación direccional con éxito. Es tan importante para el HDD como la colocación del relleno para zanjas a cielo abierto. Propiamente cuadrillas entrenadas pueden hacer la diferencia entre el éxito o un ineficaz programa de perforación que sea de utilidad. Varias instituciones ofrecen programas de entrenamiento para operadores, uno de los cuales es "University of Texas at Arlington Center for Underground Infrastructure Research and Education (CUIRE)". La perforación del agujero piloto establece la trayectoria de la varilla de perforación ("trayectoria de exploración") y posteriormente la localización de la tubería de PE. Típicamente, se le da un seguimiento a la cabeza hueca electrónicamente a fin de guiar el agujero a una configuración pre-diseñado. Una de las consideraciones fundamentales en el diseño de la ruta de navegación es crear un radio de curvatura tan grande como sea posible dentro de los límites, reduciéndola así al mínimo. La Curvatura induce esfuerzos de flexión y aumenta la carga de halado debido al efecto cabrestante. El efecto es el cabrestante incremento en la resistencia de fricción cuando se tira de la tubería alrededor de una curva debido a un componente de la fuerza de tracción que actúa normal a la curvatura. Altos esfuerzos a la tracción reducen resistencia al colapso de la tubería. La ruta de navegación normalmente tiene curvatura a lo largo de su perfil vertical. Los Requisitos de curvatura dependen de la geometría del terreno (cruzando longitudinalmente, profundidad requerida para proporcionar cobertura de seguridad, puesta en escena la ubicación del sitio, etc) Pero, el grado de curvatura está limitado por el radio de curvatura de la varilla de perforación y el tubo. Más a menudo, el radio de curvatura permitido de la varilla de perforación controla la curvatura y por lo tanto esfuerzos de flexión significativos en el tubo no ocurren. El diseñador debe reducir al mínimo el número de curvas y maximizar sus radios de curvatura de la manera correcta eligiendo cuidadosamente los puntos de entrada y salida. El perforador también debe tratar de minimizar curvatura extraña debido a las ondulaciones, de frecuentes alineamientos sobrecorregidos o la alineación de las diferencias en los estratos del suelo o adoquines.

**pH**

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O]^+$  presentes en determinadas disoluciones.

La sigla significa 'potencial hidrógeno', 'potencial de hidrógeno' o 'potencial de hidrogeniones' (pondushydrogenii o potentia hydrogenii; del latín pondus, n. = peso; potentia, f. = potencia; hydrogenium, n. = hidrógeno).

### **Pilot Bore (Perforación Piloto) Traducción según Vermeer**

Definición: Determinará el recorrido para la instalación del producto. Además de las desviaciones derecha o izquierda, profundidad o cobertura mínima del suelo según las perturbaciones que tenga el terreno. Entregará al operador la información necesaria sobre las condiciones del suelo y ayudará a determinar la planificación para el ampliado y aplicación del producto.

### **Proceso de Perforación Horizontal Direccional según definición del Polyethylene Pipe Institute**

Se asume el conocimiento del proceso de perforación direccional por el lector, pero alguna revisión puede ser de valor en el establecimiento de la terminología común. En pocas palabras, el proceso HDD comienza con la perforación de un orificio horizontal (agujero piloto) pequeño, cruzando bajo el obstáculo (por ejemplo, una carretera) con una cadena continua de varillas de perforación de acero. Cuando la cabeza del perforador y la varilla emergen en el lado opuesto de la travesía, un cortador especial, llamado "Escariador Hacia Atrás", es unido y halado hacia atrás a través del agujero piloto. Los taladros de escariador el agujero piloto de modo que el tubo se puede ser halado a través. Generalmente el tubo es halado desde el lado opuesto de la máquina perforadora.

### **Polietileno**

Definición: Es un producto plástico, incoloro, traslúcido, termoplástico, graso al tacto y blando en pequeños espesores, siempre flexible, inodoro, no tóxico, que se descompone a una temperatura alrededor de los 300°C y menos denso que el agua.

Las características del polietileno varían según el procedimiento empleado para su producción. Se obtiene por la polimerización del gas ETILENO,  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ , producto resultante del craqueo de la nafta del petróleo.

Inicialmente se consiguió a base de someter el Etileno a altas presiones entre 1000 y 1500 atmósferas, y temperaturas entre 80 y 300°C, resultando el polietileno denominado de alta presión o Baja Densidad (PEBD, PE32 ó s/CEN PE40).

Últimamente se ha profundizado en la investigación adicionando determinados polímeros, lo cual ha permitido obtener polietilenos de características físicas y mecánicas más elevadas, denominándose el producto Polietileno de 3ª generación (PE100).

### **Pull Back (Extracción) Traducción según Vermeer**

Definición: Con el ampliador de arrastre se hace una perforación la cual obtenga un tamaño adecuado para la colocación de la tubería. El objetivo es mezclar los cortes con el fluido de perforación para crear un agregado que será desplazado por los costados para ser descargado fuera del recorrido de la perforación y dejar lugar para el producto.

### **Sarta de perforación**

Consiste en el conjunto de la cabeza perforadora más las barras de perforación. Juntos hacen la perforación piloto inicial que marca la dirección por donde se va a colocar la tubería.



## **Anexo 2**

## Mapas geológicos

Tal como se indicó en la sección "2.4.3 Investigación del Subsuelo" en la norma traducida ASTM F1962, cualquier trabajo de HDD debe ser precedido por una investigación de las características del subsuelo, cuyo nivel de detalle dependerá de la magnitud, complejidad e importancia de la instalación de tubería a realizar. Una primera referencia que puede considerarse es la información de mapas geológicos regionales o nacionales. A manera de ejemplo, se presentan las dos figuras siguientes con mapas informativos a nivel nacional, que muestran la gran diversidad de suelos que se presenta en Costa Rica. Esta alta variedad de suelos ocurre también en tramos de instalación relativamente pequeños, por lo que el diseño y construcción del proyecto debe considerar cada escenario, con distintos parámetros geotécnicos:

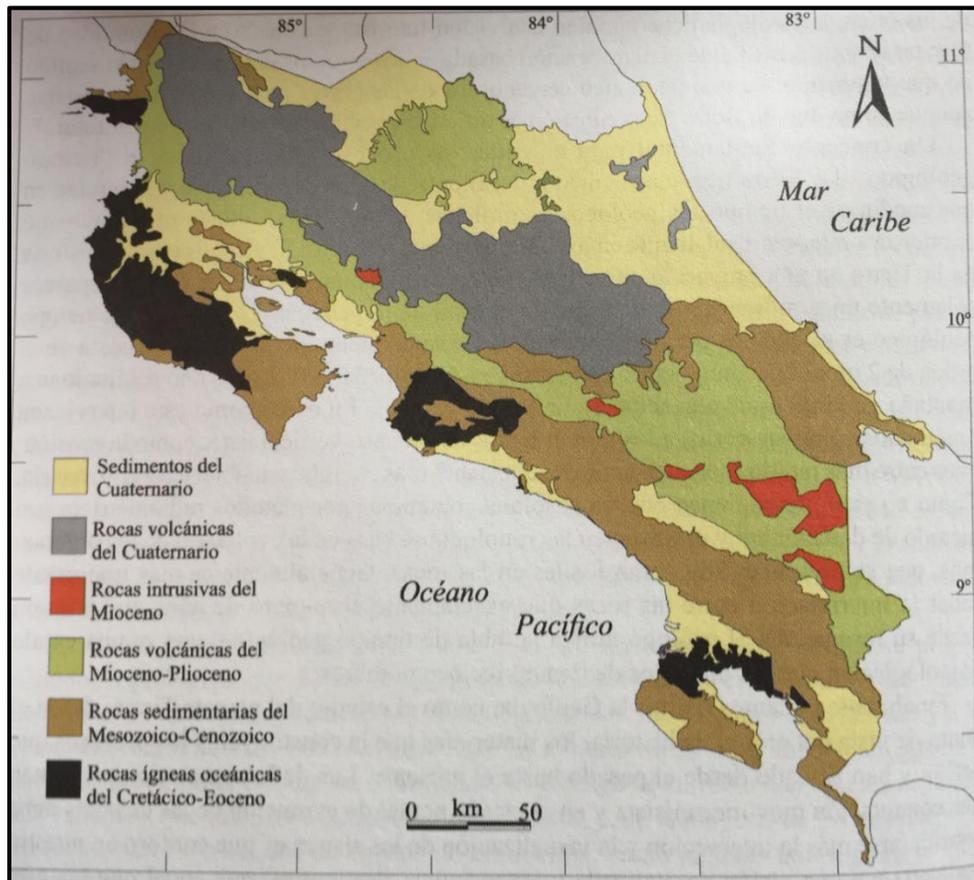


Figura 7. Mapa Geológico generalizado de Costa Rica. Hecho con base en Tournon & Alvarado (1995).

Fuente: Libro "Geología de Costa Rica" página 12, 2003.

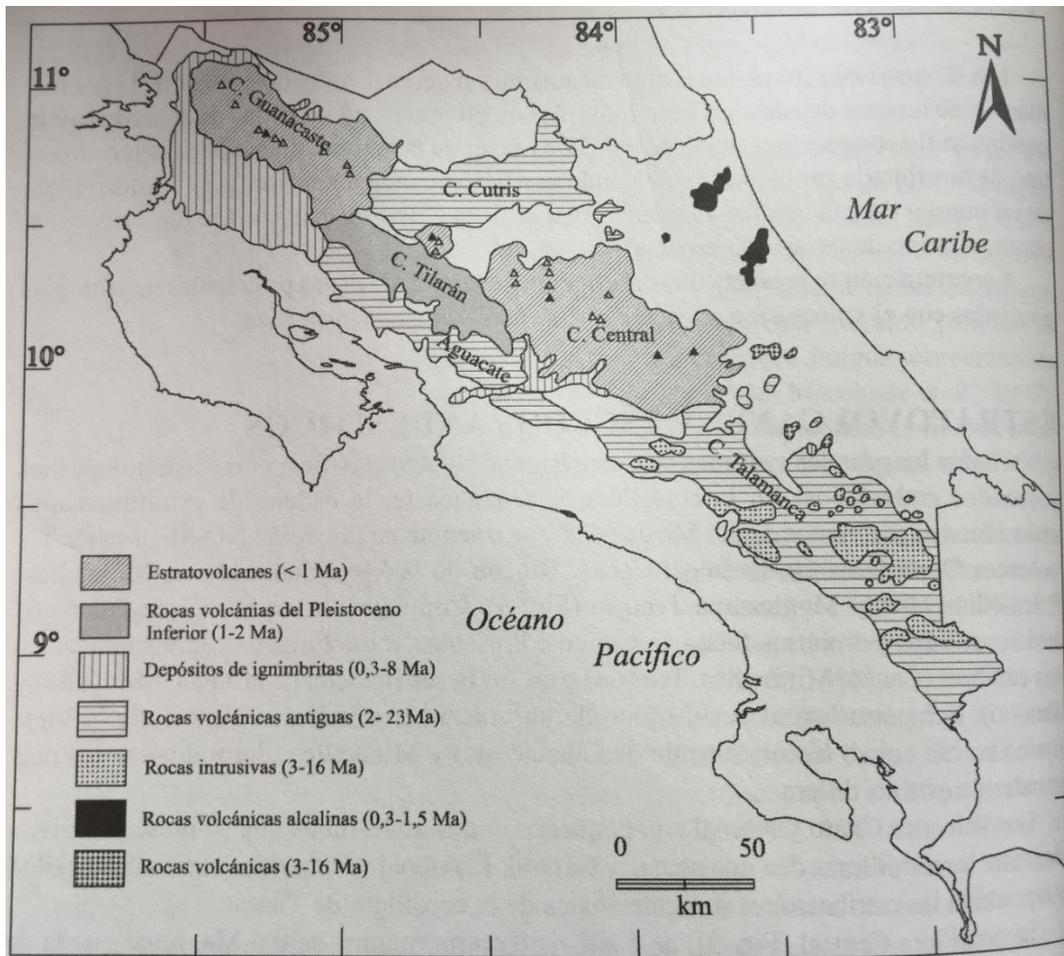


Figura 8. Mapa Geológico simplificado de las rocas ígneas (últimos 23 millones de años en Costa Rica (simplificado Tournon & Alvarado, 1997).

Fuente: Libro "Geología de Costa Rica" página 140, 2003.

### **Anexo 3**

## **Anexo 4**

## **Anexo 5**

## **Anexo 6**

Nota: Se debe contar con estudios preliminares para hacer uso de esta lista de verificación para la Perforadora Direccional Horizontal.

## LISTA DE VERIFICACIÓN PARA INSPECCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRECCIONAL

Nombre del proyecto: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_

Fecha y hora: \_\_\_\_\_

Empresa Constructora: \_\_\_\_\_

Concepto	Cumple		Observaciones
	SÍ	NO	
<b>EQUIPO DE TRABAJO</b>			
Los trabajadores llevan zapatos cerrados, lentes y casco.			
Los encargados de la fusión de la tubería utilizan guantes.			
Los encargados de la fusión de la tubería utilizan la gabacha antiquemaduras.			
El encargado de la localización remota utiliza su radio comunicador.			
<b>PERFORACIÓN</b>			
Se está utilizando la Perforadora necesaria especificada en los estudios preliminares.			
La perforación sigue la ruta indicada en los estudios preliminares.			
La perforación cumple con la profundidad de excavación indicada en los estudios preliminares.			

Los ángulos de entrada y salida son los indicados en los estudios preliminares.			
La perforadora utiliza el cabezal necesario especificado en los estudios preliminares.			
Se utiliza Bentonita en lugares especificados en los estudios preliminares.			
Los puntos de entrada y salida son los indicados en los estudios preliminares.			
Se cuenta con planos de taller (a construir).			
La tubería que sale del agujero cuenta con un porcentaje mayor al 10% de rasguños.			
La tubería que sale del agujero muestra signos de cedencia o formación de cuellos			
<b>MATERIALES</b>			
La tubería es de polietileno de alta densidad.			
La tubería cumple el diámetro indicado en los estudios preliminares.			
La pega de tuberías está hecha en trectos largos.			
<b>TERMOFUSIÓN</b>			
La termofusionadora es la indicada en los estudios preliminares.			
Se utiliza la temperatura indicada en los estudios preliminares.			

Se utiliza la presión entre tuberías indicada en los estudios preliminares			
El tiempo de fusión es el indicado en los estudios preliminares.			
El tiempo de calentamiento es el indicado en los estudios preliminares.			
Se denota una depresión tipo V en medio de la junta resultante de la termofusión.			
Se nota una asimetría significativa entre la junta resultantes de la termofusión.			
Se nota cierta inclinación en las pegas entre tuberías.			
Se desprende fácilmente el material de la junta resultante de la termofusion.			
Se nota algún agente contaminador entre las juntas de la tubería.			
<b>IMPACTO AMBIENTAL</b>			
Se siguen las recomendaciones de cuidado ambiental indicados en los estudios preliminares.			
Se observa el ambiente de trabajo limpio y ordenado.			
Se siguen los lineamientos de desecho de materiales.			
Se reutiliza la Bentonita.			
Se aprecian sonidos fuertes.			

**Nombre y firma del inspector:** \_\_\_\_\_