

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PETROLEO,  
GAS NATURAL Y PETROQUÍMICA**



**TENDIDO DE UN SISTEMA DE DUCTOS DE RECOLECCIÓN DE  
PRODUCCIÓN “GATHERING” Y REINYECCIÓN DE GAS EN  
SELVA PERUANA - LOTE 88**

## **TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO DE PETRÓLEO**

ELABORADO POR:

**ABEL MEZA TALAVERA**  
PROMOCIÓN 2001-0

**LIMA – PERÚ**  
**2008**

**Dedicatoria:**

*A mi padre*, que me enseñó a pensar, a hacer las cosas bien y a tener esperanza.

*A mi madre*, por sus lágrimas, su preocupación, su esfuerzo y su cariño.

*A mi hermana*, su alegría y chispa ilumina cada día nuestras vidas.

*Sin su presencia y apoyo, esto no hubiera sido posible ni tendría mucho sentido.*

*A mi abuelo*, que por fin descansa en paz.

**Agradecimientos:**

A los amigos y gente de buena voluntad que encontré en el camino  
y que me ayudaron a terminar lo que tenía que terminar.

# TENDIDO DE UN SISTEMA DE DUCTOS DE RECOLECCIÓN DE PRODUCCIÓN “GATHERING” Y REINYECCIÓN DE GAS EN SELVA PERUANA - LOTE 88

<b>Sección I: Introducción.</b>	<b>3</b>
<input type="checkbox"/> Lote 88.	3
<b>Sección II: Soporte Teórico.</b>	<b>6</b>
<input type="checkbox"/> Objetivo del proyecto.	6
<input type="checkbox"/> Parámetros de diseño.	6
<input type="checkbox"/> Materiales y elementos para fabricación.	7
<input type="checkbox"/> Normas y códigos aplicables.	10
<input type="checkbox"/> Cálculos de diámetros en tuberías de gas.	11
<input type="checkbox"/> Flujo de 2 fases en tuberías.	14
<input type="checkbox"/> Correlaciones para cálculos en tuberías de flujo bifásico.	16
<input type="checkbox"/> Soldadura, inspección y pruebas de soldadura.	21
<input type="checkbox"/> Recubrimiento y protección catódica.	32
<input type="checkbox"/> Diseño geotécnico y control de erosión.	36
<input type="checkbox"/> Cruce de cañerías en cursos permanentes de agua, perforaciones direccionales y colocación de cañerías en estas secciones.	41
<b>Sección III: Planeamiento.</b>	<b>47</b>
<input type="checkbox"/> Condiciones de trabajo y problemas a enfrentar.	47
<input type="checkbox"/> Selección de ruta para la tubería.	49
<input type="checkbox"/> Logística y transporte.	61
<input type="checkbox"/> Campamentos.	64
<input type="checkbox"/> Programación del desarrollo de la construcción.	65
<input type="checkbox"/> Definición del derecho de vía (right of way) y áreas a desforestarse.	65
<b>Sección IV: Fases de la Construcción.</b>	<b>69</b>
<input type="checkbox"/> Prospección y replanteo.	71
<input type="checkbox"/> Desbroce y apertura de pista.	72
<input type="checkbox"/> Nivelación de terrenos y movimiento de tierras.	74
<input type="checkbox"/> Apertura de zanjas.	78

❑ Tendido de ductos a lo largo del derecho de vía.	80
❑ Doblado de ductos.	82
❑ Soldadura.	85
❑ Pruebas de calidad de soldadura (rayos x, gammagrafía).	93
❑ Revestimiento de las soldaduras y reparación.	102
❑ Descenso de las tuberías a la zanja.	104
❑ Tapado o cubierta de las zanjas.	106
❑ Cruce direccional del río Camisea.	107
❑ Cruces aéreos.	116
❑ Uniones y empalmes finales.	116
❑ Trampas de limpiadores – raspadores, instalaciones y accesorios.	118
❑ Limpieza de traza.	120
❑ Control de erosión.	121
❑ Pruebas de presión.	124
❑ Barrido de agua, limpieza y secado las tuberías.	134
❑ Instalación de protección catódica.	137
<b>Sección V: Diseño Mecánico y Cálculos.</b>	<b>141</b>
❑ Espesores de revestimiento de hormigón en lastrado de cañerías.	141
❑ Verificación de cañerías en cruces aéreos.	145
❑ Cálculos para pruebas hidrostáticas.	148
❑ Cálculo de los espesores de cuerpo de lanzadores de chanchos.	158
❑ Diseño del sistema de protección catódica.	162
❑ Fuerza de jalado necesaria para la sarta de tuberías en el cruce direccional.	167
<b>Sección VI: Costos del Proyecto.</b>	<b>173</b>
❑ Estructura de costos.	173
❑ Costos.	174
<b>Sección VII: Conclusiones.</b>	<b>177</b>
<b>Sección VIII: Apéndices.</b>	<b>184</b>

# 1

## Introducción

El presente trabajo de tesis es un proyecto de tendido – construcción de líneas de recolección y reinyección de gas entre planta y grupos de pozos en el lote 88, a lo largo de 26 Km. en un ambiente de bosque tropical (selva peruana) que presenta características y desafíos propios para la labor, como son el clima, comunicación y transporte, topografía y conflictos sociales, aparte de los propios problemas constructivos.

Labores anexas como logística, transporte de materiales y campamentos también han sido tratadas pero no se han incluido los aspectos relacionados con la supervisión medioambiental por ser un tema específico, materia de otro tipo de estudio.

Para realizar la construcción del sistema de ductos se entra al terreno con una idea ya definida de cuales serán los diámetros a manejar y el diseño hidráulico del sistema (ingeniería básica). La recolección está representada por una línea de 20" fluyendo desde los pozos hacia la planta de separación y por lo tanto transportando gas con pequeñas cantidades de líquido; a su vez, una línea de 16" sale de la planta y lleva gas seco a alta presión para reinyección en los pozos. Por ser la fase de construcción no se hace un estudio de las técnicas de mantenimiento ni de la operación de los ductos, aunque se explica la instalación de sistemas de protección de la tubería (protección catódica, revestimientos) a ser usados a lo largo de su vida operativa.

Las labores de construcción abarcarán desde la selección de ruta, estudios preliminares (topográfico, climático, de suelos, etc.) hasta las pruebas hidrostáticas – limpieza secado de las cañerías, dejándolas listas para labores de puesta en marcha; como parte también del trabajo se pone atención en las tareas de restauración de vías y revegetación, básicas en el cumplimiento de compromisos y legislación vigentes: labores conjuntas de ingeniería de construcción se desarrollan en la superación de accidentes geográficos, soportes para las tuberías, planos de trazado y planificación para llevar a buen fin las tareas que se requieran.

### **I.- Lote 88:**

El lote 88 y áreas de influencia se encuentran ubicados en la parte suroriental del Perú, distrito de Echarate, provincia de La Convención, departamento de Cuzco, área fuertemente influenciada por la presencia de los ríos Urubamba y Camisea que cumplen labores de vías de comunicación fluvial. Geográficamente el lote se encuentra entre las coordenadas UTM 8675000 N a 8710000 N y 786000 E a 734000 E, ocupando un área de 1800 km<sup>2</sup>. El acceso para el lote es por vía aérea desde Lima hasta los aeródromos de Malvinas (campamento principal y base de la planta de separación y compresión) y Nuevo Mundo y por vía fluvial desde el Amazonas (inclusive

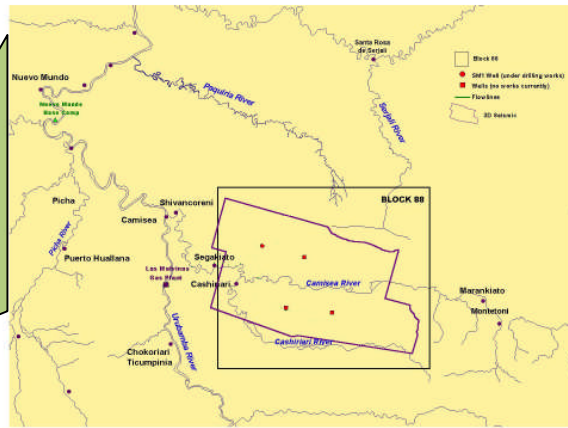
desde el Atlántico) ya que el río Urubamba está conectado a la gigantesca red hidrográfica del Amazonas.

El lote 88 se encuentra aproximadamente a 500 Km. hacia el este de Lima, en plena selva Amazónica con climas y parajes propios de una selva tropical húmeda. La zona geográfica en la que se ubica es comúnmente conocida como el Bajo Urubamba por la presencia del gran río que surca el norte de Cuzco, este río sirve como principal vía de comunicación y transporte a través del cual se realizan pequeños movimientos de comercio; en sus orillas ubicamos innumerables poblados conocidos como comunidades nativas (CCNN) y asentamientos de colonos. Habiendo la presencia de CCNN, el proyecto es sujeto de constante supervisión por entidades gubernamentales e instituciones extranjeras preocupadas en la protección del medio ambiente, de los nativos y su estilo de vida y de los posibles impactos que del proyecto se pueden derivar, tomando en cuenta que la fiebre del caucho dejó en el pasado huellas imborrables en la memoria de los nativos del lugar.

La cercanía a centros poblados grandes es remota, ciudades como Quillabamba se encuentran río arriba en Selva Alta a una distancia fluvial considerable, razón por la cual las vías de comunicación y transporte así como los medios deben ser previa y cuidadosamente establecidos a fin de contrarrestar emergencias y brindar el apoyo necesario. Adicionalmente la traza de las líneas se encuentra muy próxima a la reserva Nahua Kugapakori, zona de aislamiento para algunos pueblos nativos.

<b>Datos de los puntos de llegada y salida</b>			
	<b>Coordenadas UTM</b>		
<i>Sitio</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Altitud (msnm.)</i>
<i>Malvinas</i>	8689850,000	723666,708	378,00
<i>San Martín 1</i>	8698233,000	742302	428,51
<i>Inicio ducto de 20" (Malvinas)</i>	8690672,874	723875,124	376,33
<i>Inicio ducto de 16" (Malvinas)</i>	8690672,225	723875,767	376,33
<i>Final ducto de 20" (SM-1)</i>	8698095,237	742193,024	434,50
<i>Final ducto de 16" (SM-1)</i>	8698096,813	742196,753	434,50
<i>Distancia directa entre Malvinas y SM-1 en metros / millas</i>		19791,6 metros	12,3 millas

### Mapa de ubicación del lote 88



## Objetivo y Soporte Teórico

### I.- Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto es la construcción de un sistema de ductos para la recolección de gas (20") y líquidos asociados desde los pozos de la plataforma San Martín 1 hasta la planta de separación en Malvinas y de reinyección (16") de gas seco a mayor presión desde la planta hasta los pozos. El tiempo de vida asignado a los ductos es de aproximadamente 35 años y satisficará la necesidad de transportar el gas entre los 2 puntos distantes entre sí 26.3 Km. a través de la ruta o traza seleccionada, la ubicación del proyecto es en el lote 88 en selva peruana lugar de alta sensibilidad medioambiental y hogar de grupos nativos con poco contacto con el mundo externo. No existen carreteras y los medios de transporte son el fluvial (a través de ríos que pertenecen a la cuenca hidrográfica del Amazonas como el Urubamba) y el aéreo (estableciendo una ruta específica de transporte hacia el lugar por la ausencia de ciudades o aeropuertos en las inmediaciones).

### II.- Parámetros de diseño

Los siguientes son los parámetros técnicos bajo los cuales nos basaremos en la etapa constructiva:

<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Recolección (20")</b>	<b>Inyección (16")</b>
Servicio	Gas con líquidos	Gas seco
Tiempo de operación	35 años	35 años
Flujo de diseño	730 MMPCED	350 MMPCED
Presiones de operación		
Malvinas, planta	1300 psi	4000 psi
San Martín, pozos	1400 - 1700 psi	3400 psi
Temperaturas de operación		
Malvinas, planta	90 - 110°F	120°F
San Martín, pozos	130°F	80 - 110°F
Presiones de diseño	1800 psi	4200 psi
Código de construcción	ASME B31.8 Transmisión y distribución de gas por ductos	
Material para tubos	API 5L Especificación para tubería	
Válvulas	API 6D Especificación para válvulas	
Soldaduras	API 1104 Especificación para soldadura de líneas	
Pruebas de presión	API 1110 Practicas recomendadas para presión en ductos	



Y las características de las tuberías a ser tendidas

Diámetro	Sentido del flujo	Función	Longitud
20" (508 mm)	San Martín 1 - Malvinas	Recolección	26,3 Km.
16" (406,4 mm)	Malvinas - San Martín 1	Reinyección	26,3 Km.

Diámetro	Presión de diseño	Espesor	Material
20" (508 mm)	1800 psig / 126,5 kg/cm <sup>2</sup> / 122,48 atm	0,732"/0,804" (18,6mm/20,4mm)	API 5L Gr. X-70
16" (406,4 mm)	4200 psig / 295,2 kg/cm <sup>2</sup> / 285,79 atm	0,726"/0,859" (18,4mm/21,8mm)	API 5L Gr. X-70

### III.- Materiales y elementos para fabricación

Si queremos clasificar los materiales que vamos a usar en el tendido podemos hacerlo de acuerdo a la materia prima de que están elaborados, materiales metálicos y no metálicos. Los que más nos interesan son los metálicos dentro de los que están los férreos (elaborados a partir de hierro y derivados importantes como el acero) y no férreos (con base en otros metales como cobre, níquel, aluminio, etc.). En los materiales con base de hierro tenemos los de hierro colado y forjado y aparte con un uso bastante amplio en la industria y que serán en los que nos enfocaremos: los aceros.

Características esenciales para tuberías, accesorios y componentes:

- Químicas.-
  - a) Elemento base primario (para materiales ferrosos y acero es el hierro).
  - b) Elementos de aleación (que otorgan y quitan propiedades y cualidades al elemento base, níquel, manganeso, cromo, carbono, etc.).
  - c) Elementos incidentales (pequeñas cantidades de elementos que no estaban previstos).
  - d) Impurezas (elementos indeseables, cuanta menor cantidad se tenga de ellos mejor, fósforo, azufre).
- Físicas.- densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión termal, conducción de calor como electricidad, etc.
- Microestructura.- estructura atómica, fase metalúrgica, tamaño y tipo de granos.
- Mecánicas.- resistencia (a la cedencia, final y elongación a la ruptura) y elasticidad (Charpy, temperatura de transición de ductibilidad, elasticidad a la fractura, etc.)

Estas características son inicialmente brindadas por el fabricante o extractor de materia prima (como el que elabora las planchas de acero de las cuales se obtendrán las futuras tuberías). Aquí es donde se efectúa una primera supervisión del material obtenido, buscándose buenas características químicas y físicas (homogeneidad sin impurezas ni defectos). Con los procesos de fabricación que se realizan, los materiales en elaboración van adquiriendo sus propiedades mecánicas de acuerdo a como el proceso de fabricación altere la microestructura.

### **Materiales de acero**

Acero: primariamente los aceros son aleaciones de hierro y carbono, siendo el carbono importante en la obtención de propiedades mecánicas que se mejoran con el uso de otros elementos para establecer las diferencias de uso. Una relación de los elementos (porcentajes en proporciones al peso) junto con las propiedades que otorgan y reducen son:

- Carbono (C): otorga resistencia (a la cedencia y final) y dureza pero sacrifica ductibilidad (elongación al estado de ruptura) y elasticidad para pruebas en V (medidas por Charpy y temperatura de transición de ductibilidad nil NDT).
- Manganeso (Mn): deoxidiza y desulfuriza el acero, atrapa impurezas del azufre, evitando los sulfatos de hierro quebradizos, mejora el trabajo en caliente y refina el grano. Cuando la relación Mn/C > 3 se mejora la elasticidad al impacto y por sobre el 0.8% el Mn tiende a endurecerlo.
- Sílice (Si): deoxidante que ayuda a capturar el oxígeno y evita porosidades, mejorando la capacidad a ser trabajado en estado fundido.
- Cromo (Cr): aumenta resistencia a la abrasión y desgaste, encima del 11.5% forma una capa estable de protección contra el óxido. Adicionalmente mejora la resistencia al ataque de hidrógeno por alta temperatura y formación de grafito.
- Molibdeno (Mo): refina la microestructura y mejora la resistencia a altas temperaturas y a la corrosión localizada (pitting) bajo varios ambientes.
- Níquel (Ni): mejora notablemente la elasticidad a la fractura y resistencia a la fatiga.
- Aluminio (Al): como complemento del sílice ayuda en la deoxidación.
- Cobre (Cu): mejora la resistencia a la corrosión atmosférica.
- Vanadio (V): refina los granos de acero, mejorando las propiedades mecánicas, además de mejorar la resistencia del acero al ataque del hidrógeno a altas temperaturas.

Los aceros los clasificamos de acuerdo a su contenido químico:

**Aceros de alta aleación:** contienen una mayor cantidad que los mínimos porcentajes de aleaciones que definen un acero de aleación, por ejemplo los que tienen más allá del 10% de cromo. Comunes son también aquellos aceros con el 18% Cr lo que se define como un acero inoxidable. Normas ASTM rigen las propiedades que obtendrán los materiales (tuberías y accesorios) hechos de estas aleaciones, propiedades que los hacen caros y aplicables para usos específicos.

**Aceros de aleación:** son aquellos aceros de baja y media aleación; los aceros de baja son los que contienen menos del 5% de aleaciones en total, los de aleación media superan un poco el límite y son de común uso para servicio en alta temperatura como líneas de alta presión de vapor, intercambiadores de calor, hornos, etc. Su costo es superior al haber sido preparados especialmente.

**Aceros al carbono:** son aquellos aceros con contenido de carbono definido por debajo del 1.7% y por encima del 0.02%, con un contenido de manganeso por debajo del 1.65%, contenido de sílice debajo de 0.60% y de cobre menos de 0.60 %, cantidades mínimas no especificadas de Cr, Al, Ni, Mo (que no afectan mayormente las propiedades del acero) y ciertos límites de impurezas respecto al azufre, nitrógeno y oxígeno. Este es la materia prima principal del cual se hacen los materiales a usarse en tuberías, válvulas y otros accesorios para transporte de hidrocarburos a menos que el servicio y operación indiquen lo contrario. El gran mérito del acero al carbono para ser tan ampliamente usado es que aparte de ser lo suficientemente barato comparte propiedades muy similares al hierro, como son la suavidad y la capacidad para ser trabajado y forjado, pero al mismo tiempo por su contenido de carbono es más duro y fuerte (aunque menos dúctil y algo más trabajoso para soldar).

Son varias las aplicaciones para el acero al carbono en industrias como energía, química, de procesos, etc. El objetivo en este caso es conocer la fabricación de tuberías para transporte de hidrocarburos regulada por la especificación API 5L.

El acero al carbono es clasificado por su contenido en los siguientes grupos:

- Acero al carbono de bajo contenido “mild steel”: que va del 0.05% al 0.26%.
- Acero al carbono de contenido medio “medium steel”: que va del 0.29% al 0.54%.
- Acero al carbono de alto contenido “high steel”: que va del 0.55% al 0.95%.
- Acero al carbono de muy alto contenido “very high steel”: que va del 0.96% al 2.1%.

De todos estos, el más comúnmente usado es el acero de bajo contenido con un precio relativamente bajo y propiedades que son aceptables a muchas aplicaciones. Al tener bajo contenido de carbono no es ni extremadamente quebradizo ni muy dúctil.

Muchos métodos son empleados para mejorar las propiedades de los aceros al carbono. Aparte de las trazas de otros elementos que puedan otorgar alguna cualidad los tratamientos por calor son muy usados para mejora de resistencias, dureza, ductibilidad, elasticidad, impacto etc. Asimismo si se quiere otorgar a la superficie del acero ciertas características de resistencia o dureza (capas protectoras) se puede someter el material a baños con ciertos elementos químicos y tratamientos de calor.

#### **IV.- Normas y códigos aplicables:**

Para el diseño, construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento de un sistema de tuberías nos valemos de una serie de códigos y normas internacionales de aplicación exitosa en otras partes del mundo:

- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos – “American Society of Mechanical Engineers” ASME B31.8 Norma principal para sistemas de transmisión y distribución de gas.
- Instituto Americano del Petróleo – “American Petroleum Institute” API 1104 - Norma del API para calidad en el trabajo de soldadura de líneas.
- API Prácticas recomendadas 1110 Pruebas de presión para tuberías de hidrocarburos.
- Norma GE-N1-124- Procedimiento general para pruebas de resistencia y hermeticidad de gasoducto.
- ASME B31.4 Norma para sistemas de transporte de líquidos como hidrocarburos y otros.
- API 5L Especificación para tuberías.
- ASME Sección IX Calificaciones para soldaduras.
- ASME Sección V Examinación por pruebas no destructivas.
- Sociedad Americana para Pruebas No Destructivas “American Society for Nondestructive Testing” ASNT TC-1 A RP Certificación y calificación de personal en pruebas no destructivas.
- Asociación Nacional de Ingenieros de la Corrosión – “Nacional Association of Corrosion Engineers” NACE Estandar RP-0274-74 - Inspección eléctrica de alto voltaje para recubrimientos de tubería previa a su enterramiento.

- NACE RP0169 Control de la corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas sumergidas o enterradas.
- NACE RP0286 Aislamiento eléctrico de tuberías protegidas catódicamente.

## V.- Cálculo de diámetros en tuberías de gas

El cálculo de las dimensiones de las tuberías a ser tendidas requiere del conocimiento de los requerimientos de presión y cantidades de gas a ser transportadas de un punto a otro. En los primeros días de la industria las formulas eran simples por las pocas cantidades transportadas y las bajas presiones en operación. Hoy en día las formulas se han sofisticado tremendamente, existiendo gran variedad que necesitan de computadoras y cálculos iterativos conforme las presiones, cantidades, distancias y obstáculos geográficos se han multiplicado. La formula más conocida es la de Weymouth, usual para tuberías de pequeño diámetro ( $\leq 15''$ ) mientras que la Panhandle y Panhandle modificada son más adecuadas para tuberías de mayor diámetro.

Deduciendo a partir de balances de energía considerando temperatura constante y evaluando el factor z de desviación de gas a T constante y presión promedio entre la de entrada  $p_1$  y la de salida  $p_2$  obtenemos la siguiente ecuación:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{25\gamma_g q^2 T z f L}{D^5}$$

Donde:

P : Presión sea de entrada o de salida

$\gamma_g$  : Gravedad específica del gas

q : Flujo de gas en MMPCED (a 14.7 psia y 60 °F)

T : Temperatura promedio en °R

z : Factor de desviación de gas a temperatura y presión promedias

P :  $(p_1 + p_2)/2$

L : Longitud del tubo en pies

D : Diámetro interno de la tubería, en pulg.

Reordenando términos adoptamos la forma clásica de la ecuación de flujo:

$$q = \frac{CT_b}{p_b} \left[ \frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{\gamma_g T z f L} \right]^{0.5}$$

Donde C es una constante que depende de las unidades usadas:

P	T	D	L	q	C
Psia	°R	Pulg.	millas	PCED	77.54
Psia	°R	Pulg.	pies	PCED	5634
Psia	°R	Pulg.	pies	MMPCED	5.634*10 <sup>-3</sup>
kPa	°R	Pulg.	m	m <sup>3</sup> /día	1.149*10 <sup>6</sup>

La ecuación de arriba se soluciona iterativamente por la dependencia de factores como la desviación de gas o el de fricción en el flujo q, el diámetro y en las presiones. Por esto siempre se buscó desarrollar ecuaciones que substituyeran el valor de f para ser hallado más fácilmente. La ecuación de Weymouth lo substituyó usando sólo el diámetro; las ecuaciones de Panhandle lo substituyen en base al número de Reynolds.

La ecuación de Weymouth basa su deducción en que el cambio de energía cinética es despreciable, el flujo es estable e isothermal, no hay transferencia de calor y el flujo es horizontal. De estas condiciones deducimos la expresión:

$$q_h = 3.23 \frac{T_b}{p_b} \left[ \frac{(p_1^2 - p_2^2) D^5}{\gamma_g z T f L} \right]^{0.5}$$

Con el flujo en pies<sup>3</sup>/hora y la longitud en millas, que presenta aun un cálculo iterativo. Weymouth propuso una expresión independiente del número de Reynolds para calcular el factor f:

$$f = \frac{0.032}{D^{1/3}}$$

De lo que incluyendo en la ecuación de arriba resulta:

$$q_h = 18.062 \frac{T_b}{p_b} \left[ \frac{(p_1^2 - p_2^2) D^{16/3}}{\gamma_g z T L} \right]^{0.5}$$

Que es conocida como la ecuación de Weymouth.

Para secciones no horizontales que muestren diferencias de alturas entre puntos iniciales y finales la ecuación adquiere la forma:

$$q_h = 3.23 \frac{T_b}{p_b} \left[ \frac{(p_1^2 - e^s p_2^2) D^5}{\gamma_g z T f L} \right]^{0.5} \quad \text{con } s = 0.0375 \gamma_g \Delta Z / T z$$

Donde:

e : Base del logaritmo natural = 2.718.

ΔZ : Diferencia de elevación entre salida y entrada.

Una forma más rigurosa de esta ecuación es:

$$q_h = 3.23 \frac{T_b}{p_b} \left[ \frac{(p_1^2 - e^s p_2^2) D^5}{\gamma_g z T f L_e} \right]^{0.5} \quad \text{con} \quad L_e = \frac{(e^s - 1)}{s} L$$

Para una pendiente uniforme con  $L_e$  de longitud efectiva del tubo para longitud real  $L$ , en caso no haya pendiente uniforme se tiene que dividir en varias secciones el tramo.

Las ecuaciones de Panhandle parten de la ecuación general pero sustituyen al factor de fricción en base al Número de Reynolds. Existen 2 ecuaciones de Panhandle: Panhandle A y Panhandle modificada o Panhandle B. Panhandle A asume que  $f$  varía según:

$$f = \frac{0.085}{N_{Re}^{0.147}}$$

Haciendo que la ecuación de flujo se transforme en:

$$q = 435.87 \left( \frac{T_b}{p_b} \right)^{1.07881} \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{T L z} \right)^{0.5394} \left( \frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.4604} D^{2.6182}$$

Ecuación de Panhandle A

La ecuación de Panhandle B o Panhandle modificada es quizás la más usada para líneas de gran longitud (troncales, transporte en largas distancias) y asume que  $f$  varía como:

$$f = \frac{0.015}{N_{Re}^{0.0392}}$$

Haciendo que la ecuación de flujo se transforme en:

$$q = 737 \left( \frac{T_b}{p_b} \right)^{1.02} \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{T L z \gamma_g^{0.961}} \right)^{0.510} D^{2.530}$$

Ecuación de Panhandle B

Como sumario de las ecuaciones expuestas, queda una ecuación general de flujo de gas escrita de la siguiente manera:

$$q = a_1 E \left( \frac{T_b}{p_b} \right)^{a_2} \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{T L z} \right)^{a_3} \left( \frac{1}{\gamma_g} \right)^{a_4} D^{a_5}$$

Con  $E$  como factor de eficiencia del flujo.

Las unidades de la ecuación son:

$q$  : pies<sup>3</sup>/día medido a  $T_b$  y  $P_b$ .  
 $T$  : °R  
 $P$  : psia  
 $L$  : millas  
 $D$  : pulgadas

Y los valores de las constantes para cada una de las ecuaciones serían:

Ecuación	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
<i>Weymouth</i>	433.5	1.0	0.5	0.5	2.667
<i>Panhandle A</i>	435.87	1.0788	0.5394	0.4604	2.618
<i>Panhandle B</i>	737.0	1.02	0.510	0.490	2.53

## VI.- Flujo de 2 fases en tuberías:

Dentro de las formas de flujo para tuberías, una de las que mayores problemas presenta tanto para cálculos de ingeniería como para la operación es el flujo de 2 fases con características y naturaleza distintas a las de una sola fase (gas o líquidos), con sensibilidad a cambiar de régimen de flujo fácilmente ante pequeñas variaciones de temperatura y presión y provocando por lo tanto dificultades para calcular y predecir caídas de presión. A lo largo de los años se han publicado numerosas investigaciones reportando correlaciones de mayor o menor precisión para cada una de las situaciones generadas por este flujo (vertical, horizontal, inclinado, etc.), que han tenido relativo éxito para el cálculo de diámetros y estimación de  $\Delta P$  por fricción.

Dadas las dificultades para el diseño como para la operación, el uso de tuberías bifásicas ha sido bastante restringido a sólo aquellos casos en los que resulta poco práctico o muy costoso el trabajar con sistemas monofásicos. En nuestro caso, la aplicación se da por la necesidad de transportar la producción de gas con una pequeña cantidad de líquidos desde los pozos hasta la planta donde se da la separación; la locación en pozos se encuentra en una zona de más difícil acceso y las instalaciones de separación necesitan de lugares amplios y abiertos de fácil entrada como el río Urubamba (para facilitar logística, transporte, etc.). La distancia entre pozos e instalaciones de separación es de 20 Km. (relativamente largo) y requiere de la construcción de una tubería que transportará ambos fluidos. El área presenta colinas y cuestas relativamente empinadas complicando algo más el problema de cálculo de dimensiones.

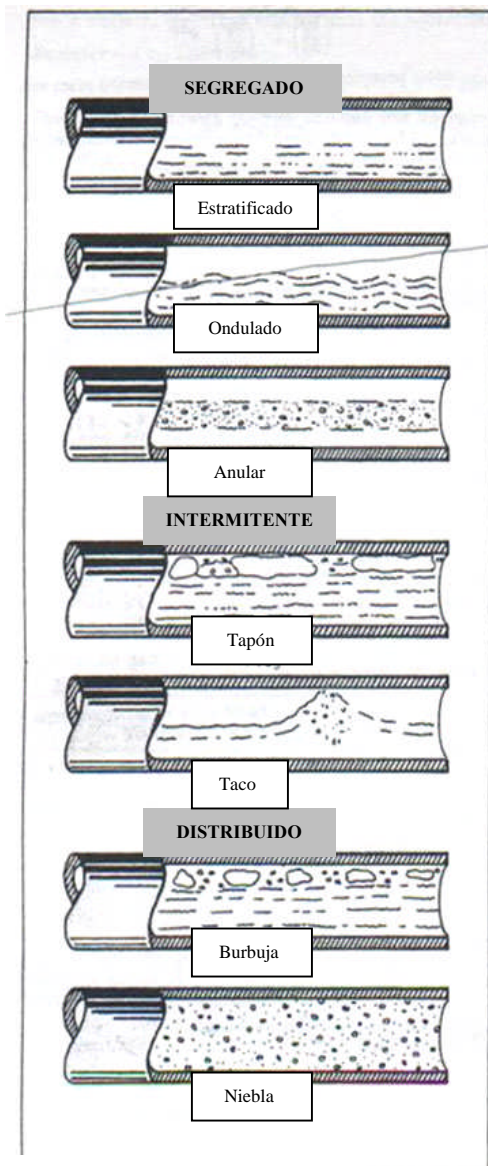
Algunos de los parámetros que se presentan en flujo bifásico son:

**Efecto de retención de líquidos o “Holdup” ( $H_L$ )**, es una relación matemática entre las porciones de líquidos y gases encontradas en algún punto de la cañería y desde el punto de vista físico es muy sensible al cambio y depende de muchos factores como son la inclinación del terreno, velocidad del flujo, régimen, propiedades de los fluidos y el tiempo; el  $H_L$  adquiere una importancia



fundamental como aspecto de la operación de la cañería en flujo inclinado. Es sencillo imaginar que entre gases y líquidos fluyendo juntos el gas tiene una mayor facilidad de flujo por su baja viscosidad y densidad, lo que hace que pueda fluir más rápido que el líquido y sobrepasarlo; cuando se tiene una tubería inclinada (cuesta arriba en una colina) ocurre el resbalamiento “slippage”, fenómeno que hace que los líquidos tiendan a acumularse en los sectores más bajos de la cañería y el gas en los más altos, haciendo el  $H_L$  inestable y fluctuante. Dentro de la tubería se producen tacos de líquidos intermitentes que deben de ser atrapados a la salida de la cañería para prevenir daños a las instalaciones de separación, por lo que se debe mantener velocidades altas que impidan que los líquidos retrocedan y se alojen en las partes bajas.

**Régimen de flujo**, modelo de flujo bajo el cual el fluido transportado tiene un cierto comportamiento característico y presenta propiedades constantes lo que permite determinar la pérdida de presión. En líquidos son muy conocidos los regímenes de flujo laminar y turbulento, en flujo bifásico la variedad de regímenes es realmente amplia y algo difícil de reconocer. Inclusive se ha llegado a cuestionar la importancia de conocer los regímenes pero la mayoría de soluciones tentativas al problema de  $\Delta P$  requieren de alguna manera el conocimiento de ellos. Se han identificado hasta 8 regímenes, cada uno con sus particularidades.



Patrones de flujo horizontales

regímenes de flujo laminar y turbulento, en flujo bifásico la variedad de regímenes es realmente amplia y algo difícil de reconocer. Inclusive se ha llegado a cuestionar la importancia de conocer los regímenes pero la mayoría de soluciones tentativas al problema de  $\Delta P$  requieren de alguna manera el conocimiento de ellos. Se han identificado hasta 8 regímenes, cada uno con sus particularidades.

- Segregado: en corte transversal de la tubería muestra una clara separación física de las fases.

- 1) Estratificado: el flujo viene separado en capas delimitadas.
- 2) Ondulado: el flujo también es separado pero el límite de separación de las fases no es horizontal sino ondulado como con olas.
- 3) Anular: si cortamos transversalmente el tubo veremos un anillo de líquido alrededor de una sección de gas.
- 4) Semianular: es similar al caso anterior con la diferencia que la sección de gas no es centrada.

- **Intermitente:** también hay separación de fases pero una de ellas tiende a acumularse más en ciertas partes de la cañería, formándose bolsones y el corte transversal de las fases no es constante en la longitud de la cañería.
  - 1) Tapón: en la tubería se identifican burbujas grandes de gas mezclados con líquidos.
  - 2) Taco: hay partes donde el líquido ocupa enteramente la tubería, este fenómeno es muy conocido en zonas inclinadas (colinas, cerros).
- **Distribuido:** las fases se encuentran totalmente mezcladas y no hay separación clara entre una y otra, se puede hablar de una mezcla distribuida.
  - 1) Burbuja: burbujas de gas tienden a ubicarse en la parte superior del tubo en un medio continuamente líquido.
  - 2) Niebla: pequeñas burbujas de líquido se encuentran dispersas en un medio continuamente gaseoso.

En orden de incremento de la velocidad de gas, los flujos oscilan entre burbuja, tapón, estratificado, ondulado, taco, semianular, anular y niebla.

Las líneas de flujo de 2 fases han sido construidas y operadas con éxito, no obstante las dificultades que presentan. Si bien con uso restringido, manteniendo ciertas condiciones de velocidad, cuidado, mantenimiento es posible tener condiciones operativas en lugares donde la separación inmediata y construcción de más líneas presenta muchos obstáculos.

## **VII.- Correlaciones para cálculos en tuberías de flujo bifásico**

Tal como se dijo anteriormente el flujo multifásico es un problema de difícil solución por lo impredecible que se vuelve el calcular una caída de presión más grande que la que se estimaría usando métodos de flujo de una sola fase. Por otro lado el imponer tamaños de línea más grande para solucionar la más alta caída de presión puede sobredimensionar el diámetro causando gastos excesivos de construcción y futuros problemas de operación inestable con presencia de tacos de líquido y presiones fluctuantes.

Para transporte de flujo bifásico inicialmente se trató el problema asumiendo un flujo horizontal, condición poco frecuente ya que toda línea enfrenta pendientes en su trazo, más aun cuando el trayecto presenta cerros y colinas como el presente caso. Para algunas correlaciones se requiere el conocimiento del patrón de flujo multifásico predominante en el tubo, algo bastante relativo ya que los patrones son susceptibles a pequeños cambios en la presión de fácil ocurrencia, problema agravado cuando asumimos para la solución una presión promedio que puede no ser representativa. Una de las mejores correlaciones para flujo horizontal es la de Dukler II (1969).

A partir de los trabajos en flujo horizontal se desarrollaron los de flujo inclinado con soluciones relativamente satisfactorias. La pérdida de presión total se compone de 3 elementos que son por fricción, de aceleración y de elevación; para flujo inclinado los 2 principales componentes son por fricción y sobretodo el de elevación tomándose en cuenta el de aceleración sólo para muy altas velocidades. El componente de elevación cobra importancia por la necesidad de levantar los fluidos una distancia vertical donde sino se mantiene una velocidad mínima, las fases pueden separarse dejando atrás líquidos con la consecuente creación de tacos.

Algunos de los trabajos más precisos para solución de flujo inclinado son el de Flanigan y el de Beggs & Brill. Flanigan condujo numerosas pruebas de campo y observó que:

- La mayor parte de la caída de presión ocurre en la sección cuesta arriba de las líneas.
- La  $\Delta P$  decrece en la línea conforme aumenta el flujo de gas, ocurre porque el contenido de líquido en cuestas ocasiona marcadas diferencias de presión.

Flanigan separó los 2 componentes de  $\Delta P$  y presentó un método en la determinación de ambos. Para determinar la pérdida por fricción obtiene la velocidad del gas y la relación gas líquido de donde halla el factor de eficiencia E aplicable en la ecuación de Panhandle A. En el cálculo de la pérdida por elevación desprecia la ganancia que se pueda tener cuestas abajo y trata las cuestas arriba como una suma total de elevaciones que daría una gran suma vertical, cantidad proporcional a la pérdida por elevación. Los ángulos de las pendientes y diferencias de alturas entre extremos no son de importancia en el cálculo para esta correlación.

El procedimiento de cálculo en la correlación de Flanigan es:

- 1.- Se calcula la velocidad superficial del gas  $v_{sg}$  en pies/seg. mediante la fórmula:

$$v_{sg} = 31.194 \frac{q_g \bar{z}}{D^2 \bar{p}} \left( \frac{\bar{T}}{T_{sc}} \right)$$

Donde:

$q_g$  : flujo de gas en MMPCED.

$z$  : Factor de desviación de gas a T y P promedias en la tubería.

D : diámetro interior de la tubería en pulgadas

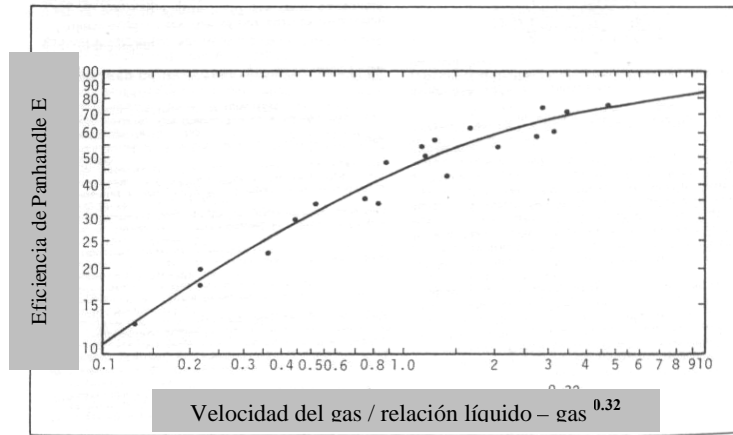
$\bar{p}$  : presión promedio en la tubería, del promedio  $(p_1+p_2)/2$

$\bar{T}$  : temperatura promedio en la tubería.

- 2.- Se determina la relación líquidos – gas R en bbl/MMPCE

- 3.- Calculados la velocidad superficial  $v_{sg}$  y R, se calcula el factor:

$v_{sg} / R^{0.32}$  para la determinación del factor de eficiencia E Panhandle en la gráfica de abajo



Correlación de eficiencia de Flanigan

4.- Calculado el factor de eficiencia E, calculamos la caída de presión por fricción en base a la ecuación de Panhandle A

$$q = 4.3587 * 10^{-4} E \left( \frac{T_b}{p_b} \right)^{1.07881} \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{TLz} \right)^{0.5394} \left( \frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.4604} D^{2.6182}$$

q en MMPCED

5.- Con el valor de velocidad superficial  $v_{sg}$ , obtenemos el factor de elevación  $H_{lf}$  o factor Holdup de Flanigan:

$$H_f = \frac{1}{1 + 0.3264 * V_{sg}^{1.006}}$$

O de la gráfica respectiva

6.- Calcular en base al perfil de la línea la suma de las elevaciones  $\Sigma H$  en pies.

7.- Con todos esos datos procedemos al cálculo de la caída de presión por elevación:

$$\Delta P_{elv} = \frac{\rho_{liq} H_{lf} \Sigma H}{144}$$

Donde  $\rho_{li}$  : densidad de liquido en lb/pies<sup>3</sup>

8.- Teniendo los valores de diferenciales de presión por fricción y elevación, los sumamos y restamos de la presión de entrada al tubo.

Este método es iterativo desde que asumimos presiones en la salida para los cálculos. Una vez terminado el cálculo tenemos que repetir el ciclo hasta que lo asumido se ajuste con lo obtenido. Se ve también el uso de la ecuación

de Panhandle para el cálculo de pérdidas por fricción. Sin embargo tal ecuación fue diseñada para uso de flujo de gas por lo que su uso en cálculos bifásicos debe limitarse cuando la relación gas / líquidos sea bastante alta. En caso contrario debemos usar correlaciones por fricción conocidas en flujo bifásico horizontal.

Realizando los cálculos para hallar el diámetro de la tubería de producción con los datos correspondientes:

Datos:

- Flujo de gas: 730 MMPCED
- Temperatura promedio: 110 °F
- Presión de entrada: 1800 psi
- Presión de salida: 1300 psi
- Presión base: 14.7 psia
- Temperatura base: 60 °F
- Gravedad del gas: 0.766
- Longitud: 26.3 Km. (16.35 millas)
- Contenido de líquidos: 31 bbl/MMPCE
- Densidad de los líquidos: 48 lb/pies<sup>3</sup>

Y del perfil topográfico observamos las siguientes elevaciones:

Sumatoria de cerros	
Número	Altura (mts)
1	35
2	92
3	80
4	20
5	86
6	101
7	39
8	63
9	116
10	125
11	27
12	104
13	94
	<b>982</b>

$\Sigma$  alturas: 982 m. = 3221.8 pies

Asumiendo un diámetro de 20" y con una presión promedio de 1550 psi, hallamos primero el factor de desviación del gas a presión y temperaturas promedias:

$$\bar{z} = 0.748$$

Hallamos la velocidad superficial del gas:

$$v_{sg} = 31.194 \frac{q_g \bar{z}}{D^2 p} \left( \frac{\bar{T}}{T_{sc}} \right) = 30.13 \text{ ft / seg}$$

Con la velocidad superficial del gas y el contenido de líquidos determinamos:

$$v_{sg} / R^{0.32} = 10.04$$

Con lo cual de la gráfica de eficiencias determinamos

$$\text{Eficiencia} = 0.925$$

Luego procedemos primero con el cálculo de pérdidas por elevación:

$$H_f = \frac{1}{1 + 0.3264 * V_{sg}^{1.006}} = 0.0906$$

Y teniendo la densidad de líquidos y  $\Sigma$  de alturas:

$$\Delta P_{elv} = \frac{\rho_{liq} H_f \Sigma H}{144} = 97.31 \text{ psi}$$

Habiendo calculado la pérdida por alturas vemos cuanta es la presión disponible:

$$P_{disponible} = P_1 = 1800 \text{ psi} - 97.31 \text{ psi} = 1702.7 \text{ psi}$$

Analizando la relación gas – líquido (GLR) (inversa del contenido) vemos que tiene un valor de 32258 PCE/bbl, bastante alto demostrando el elevado contenido de gas por lo que podemos utilizar la ecuación de Panhandle A en la obtención del diámetro que se ajuste a nuestra  $\Delta P$  por fricción.

Usando la ecuación de Panhandle A:

$$q = 4.3587 * 10^{-4} E \left( \frac{T_b}{p_b} \right)^{1.07881} \left( \frac{p_1^2 - p_2^2}{\bar{T} \bar{L} \bar{z}} \right)^{0.5394} \left( \frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.4604} D^{2.6182}$$

Y despejando en función del diámetro obtenemos:

$$D = 18.64''$$

Al diferir este valor del inicialmente asumido (D=20''), iteramos y tras los cálculos obtenemos convergencia en:

$$D = 18.50''$$

De aquí asumiendo un espesor de 0.4" o 0.5" estimamos un DE entre 19" y 20", por lo tanto:

$$NPS_{recolección} = 20''$$

Del valor obtenido del diámetro externo del tubo de recolección, calculamos el valor de espesor de pared, con tal fin usaremos la formula que relaciona la presión de diseño con el DE, el esfuerzo al límite elástico del acero usado y el espesor de pared. Tal formula es:

$$\frac{PD}{2S_y FET} = t$$

Donde:

$S_y$  = "SMYS" o esfuerzo de cedencia mínimo especificado = 70000 psi

P = Presión de diseño = 1800 psi

D = 20"

F = Factor de diseño por ubicación = 0.72 (áreas despobladas) (\*)

E = Factor por soldadura longitudinal de juntas = 1 (soldadura eléctrica) (\*)

T = Factor por aumento de temperatura = 1 ( $T_{operación} < 250^{\circ}F$ ) (\*)

El valor del espesor de pared es:

$$t = 0.357''$$

valor inicial ya que hay considerar sobreespesores para protección mecánica anticorrosión y considerar F = 0.6 como factor en cruce de cuerpos de agua y secciones aéreas. Una determinación completa de los espesores de pared se puede ver en la sección de cálculos – pruebas hidrostáticas.

---

(\*) Valores extraídos de tablas en la sección 8 - apéndice

## VIII.- Soldadura, inspección y prueba de soldadura

La labor de soldadura de línea es la labor más amplia e importante de todas aquellas asumidas en la construcción de una tubería de gas. Podría pensarse que es una tarea sencilla debido a que implica rutinariamente la unión de varios sectores de cañería para formar una gran línea continua, pero es complicada ya que requiere gran habilidad, paciencia, experiencia, conocimiento del tema, factores favorables en su realización, etc. Todo esto a fin de obtener una buena calidad en la soldadura, indispensable para cumplir con las especificaciones internacionales en el tendido y asegurar una adecuada duración y performance de operación de cualquier sistema de transporte de fluidos.

La soldadura es la unión de 2 partes metálicas por un calentamiento efectuado en los extremos de las mismas que hacen que se derritan y fusionen para formar un solo cuerpo (coalescencia). Otras veces la fusión no se realiza por la unión de las partes fusionadas sino por la acción de un agente externo de relleno (metal de aporte) que se derrite y une ambas partes (2 secciones de tubería). Las fuentes de las que nos valemos para obtener el calor necesario

son arco eléctrico, resistencia eléctrica, flama, etc.; estas 3 fuentes son tradicionales y ampliamente usadas aunque no las únicas.

### **1) Procesos de soldadura**

La soldadura se puede realizar usando diversas clases de procesos y fuentes de calor, cada proceso diferenciándose en el procedimiento, equipo, fuente de protección del ambiente de soldadura, etc.

- Soldadura manual con electrodos – “Shielded Metal Arc Welding” (MMA/SMAW)
- Soldadura por arco sumergido – “Submerged Arc Welding” (SAW)
- Soldadura semiautomática con protección de gas – “Gas-Metal Arc Welding” (GMAW)
- Soldadura por arco de tungsteno con protección de gas – “Gas - Tungsten Arc Welding” (GTAW)
- Soldadura con hilos tubulares con protección de gas – “Flux Core Arc Welding” (FCAW)

Todos estos procesos se caracterizan básicamente por 2 detalles. El 1<sup>ero</sup> es la fuente de la que obtiene el calor para calentar las partes a soldarse y que normalmente da el nombre al proceso (soldadura por arco eléctrico, soldadura por arco de tungsteno, soldadura por rayo de electrones). El otro detalle es que los metales al ser calentados y llevados a altas temperaturas tienden a reaccionar rápidamente con la atmósfera por lo que requieren la aplicación de una fuente de protección de la soldadura mientras se encuentra fundida; el método de protección aplicado es la segunda característica más importante usándose desde materiales granulares fundentes hasta gases inertes (o inclusive hacer vacío) en la zona de soldadura.

La soldadura de metales ha encontrado una serie de aplicaciones fuera de la unión de metales, sin embargo lo que proponemos analizar en esta sección es la aplicación de soldadura para la unión de partes de tuberías y accesorios (válvulas, bridas, etc.)

**“SMAW”:** También conocida como Soldadura de arco de metal manual (MMAW), soldadura por electrodo revestido o soldadura por varilla, se produce por el aporte de metal de una varilla (electrodo) que va llenando gota a gota el espacio entre las secciones de tubería y las une conforme la varilla se derrite por acción del calor y ayudado en parte por un poco del metal de las tuberías que también es derretido; cuando el cordón de soldadura se enfría se endurece para así formar la costura. El calor se genera por la acción de un arco eléctrico creado entre el electrodo que sirve como un polo del arco y el acero de las tuberías trabajadas que es el otro polo, así el electrodo, el acero de la tubería y el arco constituyen un circuito eléctrico: el circuito de soldadura.



La varilla o electrodo consumible tiene una longitud normal entre 9 a 18 pulgadas y se compone de un núcleo de metal sólido y una cobertura de material exterior que aísla al electrodo de contacto accidental con la tubería. Conforme se va consumiendo el electrodo la cobertura se descompone y libera un gas para aislar y proteger la soldadura de agentes externos tales como el aire, polvo y otros que pudieran contaminarla, permite estabilizar el arco producido y puede contener elementos que ayudan a mejorar la calidad de la soldadura. Aparte, conforme la cobertura se va consumiendo aporta una escoria que protege en superficie al cordón cuando se está enfriando y ya no hay capa de gases como durante el proceso de soldado; la escoria también ayuda a dar una forma adecuada al cordón en posiciones vertical y de cabeza.

Por la facilidad y ventajas, “SMAW” es el proceso de soldadura más común (aparte de también ser el más antiguo). Enumerando sus ventajas tenemos:

- Suelda una gran cantidad de metales.
- Bueno tanto para secciones gruesas como delgadas.
- Permite el uso de gran variedad de coberturas para el electrodo.
- Puede ser usado en todas las posiciones que requiera el soldador.
- El equipo que se usa es ligero y fácil de transportar en campo.
- El abastecimiento de energía puede ser tanto corriente directa como alterna.
- No necesita de abastecimiento de gas o agua.
- Puede usar un electrodo que se ajuste a metal base o a una aleación especial.

El proceso también posee ciertas desventajas como:

- La soldadura se ve retrasada por lo lento que es el reemplazo de electrodos después de que cada varilla es consumida (no es un proceso continuo).
- La escoria tiene que ser limpiada continuamente después de cada pasada.
- Gotas de metal de aporte derretido tienden a derramarse durante el proceso, las cuales se conocen como salpicaduras “spattering”.

Aún así el proceso es muy versátil y adaptable en zonas donde el trabajo es bastante incómodo como trabajar de cabeza o en secciones verticales.

**“SAW”**: Este proceso tiene ciertos aspectos similares al anterior como el uso de un arco eléctrico para la generación de calor y de electrodos consumibles para el metal de relleno. Sin embargo la diferencia se establece en el uso de un material fundente “granular flux” compuesto de silicatos y otros elementos el cual ayuda en el aumento de la calidad de la soldadura, el arco se forma entre el electrodo colocado en contacto con el material a unir (tuberías), pero el espacio de soldadura es cubierto con el material fundente granulado que va a esconder el arco. Comenzada la soldadura parte del material granular se fundirá y formará una cubierta protectora que impedirá la contaminación del cordón de agentes externos, la cubierta puede ser removida y reutilizada una vez terminada su labor en la costura recién elaborada.

El electrodo usado es alambre alimentado continuamente hacia la junta, por ser electrodo continuo, la soldadura producida es uniforme y gracias a las altas corrientes usadas (suministradas por una fuente de poder de voltaje constante de alta capacidad sea AC o DC) permite una penetración en superficie más profunda (alta deposición) que en otros procesos.

Dentro de las ventajas podemos encontrar:

- Alta productividad.
- Bajo costo en la preparación.
- La continuidad o la forma en que la soldadura se puede efectuar de un solo pase, inclusive en materiales de gran diámetro.
- Bastante confiable si es que los parámetros de operación son los correctos.
- Muy poca tensión transversal.
- Baja factibilidad en la formación de grietas por hidrógeno.
- Alta deposición de la soldadura.

Entre las desventajas podemos citar:

- El equipo que se usa es grande y costoso.
- Por la misma razón anterior este proceso de soldado se adapta mejor para soldadura horizontal y plana.
- El soldador no ve el arco que está cubierto por el material granular.
- El metal permanece derretido por un tiempo más largo (debido a la cobertura del material).

Las funciones principales del fundente son:

- Proteger la soldadura fundida de la acción contaminante de la atmósfera.
- Limpia y desoxida la soldadura fundida.
- Ayuda a controlar las propiedades químicas y mecánicas del metal de aporte en la soldadura.

**“GMAW”:** También es conocida como soldadura “MIG” (Metal Inert Gas o Gas Inerte Metal) cuando la protección es brindada por un gas inerte (tales como argón o helio) o Soldadura Gas Activo Metal (MAG) cuando la protección viene de un gas reactivo tal como el CO<sub>2</sub>. Hasta cierto punto se parece a SAW con la diferencia que no se produce escoria sino se usa un chorro de gas que protege y aísla al arco eléctrico. El proceso es continuamente productivo desde que el electrodo es un alambre sólido continuo; su gama de uso es muy amplia y abarca casi cualquier clase de metales así como de aleaciones en alambres, haciendo su aplicación casi infinita y específicamente muy recomendada para condiciones susceptibles de contaminación por el ambiente así como de defectos por porosidad.

La mecánica de funcionamiento es por medio del electrodo o alambre continuo el cual es alimentado al área de soldado a través de un tubo dentro del cual se coloca una guía para que permanezca centralizado. Por los anulares o boquillas de esta centralización el gas es alimentado para proteger el arco durante la soldadura, permitiendo que no se genere escoria ni el retirado de la misma cada vez que termina una pasada.

**“GTAW”:** Denominada también como “TIG” (Tungsten Inert Gas – Gas Inerte Tungsteno) o soldadura “Heliarc”, formada por la acción de un electrodo no consumible de tungsteno (tungsteno puro o de aleación con zirconio o thorio) que va colocado al centro de una boquilla de gas para la protección de la soldadura. La soldadura puede ser autógena (sin metal de aporte se forma por el derretimiento de los metales base de las partes a unirse) o con el aporte de una varilla o electrodo consumible.

Los gases inertes que podemos usar son argón y helio, cada uno con sus ventajas y desventajas; una combinación de ambos gases como protección también es posible para aprovechar sus ventajas. Los gases proporcionan una protección muy buena contra la contaminación externa, la atmósfera se encuentra prácticamente aislada al 100% y con un control muy fino y preciso del calor la soldadura llega a ser más fuerte, dúctil y resistente que aquellas fabricadas con electrodo revestido.

**“FCAW”:** “Flux Core Arc Welding” o Soldadura por arco con núcleo de flux, se realiza con un electrodo continuo que es un tubo metálico con un interior hueco y relleno de una sustancia “Flux” bajo la forma de hilos tubulares -en español es llamado soldadura con hilos tubulares-, es continuo porque viene suministrado bajo la forma de un cable enrollado. El “Flux” protege automáticamente la soldadura fundida de impurezas formando una escoria durante el derretimiento y liberando un gas (similar al “SMAW”) con lo que se completa la protección.

Una variación de este método consiste en que el gas de protección es suministrado independientemente de la acción de los hilos tubulares (guarda cierta similitud con “GMAW”), en un proceso denominado soldadura con hilos tubulares de protección gaseosa o “gas-shielded FCAW”. El gas suministrado puede ser argón o CO<sub>2</sub> que proporcionan muy buenas propiedades en el mejoramiento de la calidad de soldadura, para ambos casos, la escoria formada de la acción de los hilos es retirada una vez que la soldadura se ha enfriado y endurecido.

Las ventajas ofrecidas por el proceso son:

- Funciona con muchos metales.
- Se puede usar en todas las posiciones.
- Tiene una alta velocidad de deposición.
- La escoria protectora es relativamente delgada y de fácil remoción.

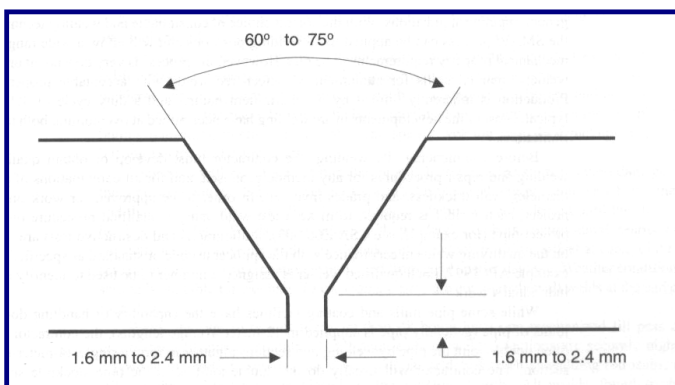
Y sus desventajas:

- Al ser el electrodo continuo, cuando se termina la pasada sobre la circunferencia de soldadura se tiene que cortar el suministro de “flux”.
- La soldadura viene acompañada de humo.

## 2) Geometría de la soldadura

La soldadura es un arte que ha logrado ser adaptado prácticamente a cualquier tipo de configuración geométrica para la unión de partes metálicas, pero hay ciertas configuraciones clásicas en las cuales se trabaja, por ejemplo, las juntas con bordes verticales, juntas de traslape, junta en forma de T, junta de esquina, junta de bordes biselados en V, etc.; de todas la que nos interesa es la junta de bordes en V.

Las tuberías son fabricadas con los bordes en ángulos biselados mostrados en la figura. Esta configuración muestra una sección vertical pequeñísima (aproximadamente 1/16” de espesor) que luego hace ángulo de



30° hacia atrás (el borde biselado) y que completa el espesor de pared de la tubería -en la industria esta configuración es conocida como bisel API.

Con la configuración mostrada la unión de una junta biselada en V debe ser realizada en múltiples etapas

o varias pasadas de soldadura, periódicamente agregando material de aporte a la junta acumulando una capa encima de otras y otorgando mayor fortaleza hasta completarla totalmente.

Para cada configuración geométrica uno o más procesos de soldadura son los que mejor se adaptan. En el caso de la configuración “V” los procesos anteriormente descritos se adaptan con mayor o menor dificultad (ver VIII - 1).

### **3) Metalurgia de la soldadura**

Podemos considerar a la soldadura como un mini ejemplo de moldeado de metales, muy similar al que se realiza cuando usamos metal derretido para elaborar tuberías. Este mini moldeado se realiza en una zona pequeña como el espacio entre los biselados extremos de las cañerías a unirse, afectando a las zonas vecinas al collar de soldadura. Podemos identificar varias zonas importantes en las que el metal derretido interactúa con el metal base:

- Zona de fusión: es la zona de soldado donde se acumula el metal de aporte fundido que unirá las piezas, sus propiedades dependen del metal de aporte y la compatibilidad que tenga con el metal base que está uniendo. La microestructura que presenta es moldeada con los granos apuntando en la dirección del flujo de calor lo que se crea mientras la soldadura se va enfriando.
- Zona afectada por el calor: rodea la zona de fusión y es directamente afectada por el calor generado, está compuesta por material base pero su microestructura y propiedades han sido alteradas por la soldadura y dependerán de cómo se comporta el metal base sometido a altas temperaturas. Está área es la que se muestra más débil y donde se acumulan esfuerzos residuales producidos por los cambios de temperatura, la zona no es derretida por el calor sino alterada y por eso su microestructura es la de granos más grandes afectados por la elevación de temperatura.
- Zona de material base: fuera del área afectada por el calor es la tubería sin sufrir los efectos del soldado, por lo tanto la microestructura se mantiene inalterada.

La microestructura, el tamaño de granos y propiedades mecánicas son controladas por la técnica de soldadura y parámetros, así como el tratamiento de calor recibido de las continuas pasadas de material de soldado, las velocidades de calentamiento y enfriamiento y por tanto los tratamientos de pre-calentamiento y post-calentamiento que se hayan planificado.

### **4) Clases y número de pasadas**

Dependiendo del espesor de pared de la tubería a unirse las circunferencias de las juntas serán rellenadas con un número variable de pasadas, cada pasada tomará su tiempo y tendrá una coordinación adecuada de inicio luego que la anterior haya sido terminada y limpiada. Dependiendo del

proceso de soldadura y el diámetro del tubo, cada soldadura tomará de unos cuantos minutos hasta algunas horas (importantes para el cálculo de producción de soldaduras).

En términos generales existen 4 tipos de pasadas:

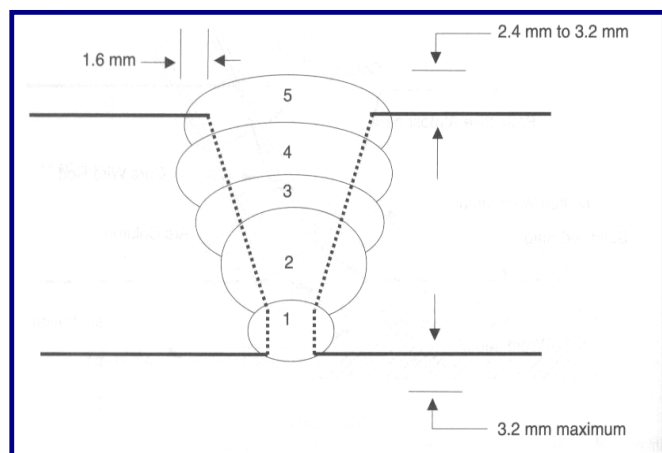
- De raíz.
- En caliente.
- De relleno (puede ser 1 o más).
- Cobertura final.

**Pasada de raíz:** es la más importante de todas por ser la más crítica y la que asegurará desde el inicio la calidad de la soldadura, será la que inicialmente una las 2 secciones de tubería por lo que es primordial un adecuado alineamiento y espaciamiento. Por ser la más interna de todas las pasadas es preferible realizarla desde el interior mismo de la tubería, aunque sigue siendo práctica común también hacerla desde el exterior.

**Pasada en caliente:** la segunda de las pasadas es también crítica por consolidar la unión, su elaboración comienza antes que la pasada de raíz haya terminado de enfriarse completamente.

**Pasada de relleno:** puede ser una o varias dependiendo del espesor de la pared de la tubería. Son varias las pasadas de relleno y acumulan metal de aporte en la junta luego de las 2 primeras, haciendo la soldadura más resistente y gruesa; el número de las pasadas también puede estar en función del proceso usado, obviamente a mayor número menor velocidad en la producción.

**Cobertura final:** es la última pasada que termina el trabajo en la unión de tuberías y por lo tanto es la más ancha, inclusive es más ancha que el espacio superior que forman los bordes biselados de los 2 extremos de tuberías. En otras palabras, la cobertura final se extiende ligeramente por sobre el borde exterior de las tuberías y otorga a la soldadura un espesor mayor que la pared del tubo.



## 5) Defectos de soldadura

Por la forma de trabajo es muy difícil tener una soldadura totalmente continua y regular (especialmente por soldadura manual). Pequeñas

discontinuidades son siempre detectables mediante el uso de ciertas técnicas de prueba e inspección, sin embargo, cuando las discontinuidades exceden ciertas características y números establecidos por normas internacionales las discontinuidades pasan a llamarse defectos, los que deben de ser subsanados y corregidos para evitar problemas futuros en el desempeño operativo de las cañerías. El estudio de estos defectos producidos durante la soldadura ha sido extensivo tanto para la comprensión de su naturaleza como para su prevención. A continuación enumeramos una serie de rasgos vistos como defectos:

- a) Porosidades: no son más que espacios vacíos o burbujas de gas atrapadas en el bulto de soldadura fundida. La formación de burbujas de gas tiene una explicación química: si el oxígeno atmosférico llega a mezclarse con el acero derretido en plena soldadura se formarán burbujas de CO. Puede solucionarse agregando ciertos elementos en la composición de los aceros como sílice o aluminio que pueden agotar el oxígeno presente para la formación de sus propios óxidos como son el SiO<sub>2</sub> o el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (sin exagerar su cantidad porque el aluminio y el sílice reducen la dureza y resistencia del acero). La existencia de porosidades es peligrosa si consideramos que son espacios vacíos que reducen el volumen y espesor de la soldadura y por consiguiente su resistencia a altas presiones.

Una forma clásica de porosidad es el hueco interior de una pasada (también conocido como porosidad vermicular o hueco de gusano), de longitudes que varían desde las fracciones hasta algunas pulgadas (casos más severos). Las causas que los producen son excesivas velocidades de viaje en las pasadas, altas corrientes y una pobre preparación y limpieza de la junta.

- b) Rajaduras o roturas: son fracturas de longitudes relativamente pequeñas pero de probable incidencia profunda en el volumen de soldadura y por lo tanto dañinas. Existen 2 tipos, las que se forman en caliente durante la soldadura “hot cracks” y las de aparición tardía “delayed cracks” cuando la soldadura ya está fría.
- c) Inclusiones: ejemplos de inclusiones probables son pedazos de tungsteno provenientes del electrodo que se usa en el proceso “TIG”, escoria, impurezas u óxidos atrapados en la soldadura (se incluyen sobre todo pedazos y partículas no-metálicas). El punto de derretimiento de los óxidos es más alto que el del metal base por lo que quedan como inclusiones en la soldadura.
- d) Concavidad de raíz y corte interno “undercut”: la concavidad de raíz es un hueco o entrada en la soldadura de raíz, mientras que un corte interno es una entrada en los bordes del collar de soldadura, sea en el lado interno o externo de la tubería. Ambos reducen el área seccional de la soldadura y son una consecuencia de inapropiados parámetros y técnicas de operación.

Otro defecto bastante común es la huella de vagón “wagon track”, producido en la pasada de raíz y que ocasiona surcos pequeños en los costados de la soldadura fundida, justo donde se une con la pared del tubo. Algunas veces estos surcos resultan ser bastante profundos y en otras se ven profundizados más a un lado que al otro ocasionando que la próxima pasada tenga que incrementar su factor de penetración para cubrirlos completamente.

- e) Penetración incompleta: es cuando la pasada de raíz ha fallado en unir los bordes de las tuberías en la sección más interna de la soldadura, es decir no ha penetrado y cubierto completamente la pared de la tubería. Cortando transversalmente al eje de la cañería por medio de la soldadura, veríamos que la sección de soldadura está incompleta en su parte inferior (los filos de los biseles interiores no han quedado cubiertos) lo que disminuye su resistencia, actúa como un incrementador de tensión en la zona (como si fuera una rotura circunferencial) y se comporta como una cresta que puede cobijar futura corrosión e inclusive puede provocar turbulencias en el flujo.
- f) Falta de fusión: es la falta de contacto o fusión entre los metales de aporte y el metal base que toman lugar en las paredes de los bordes de los biseles. Esta falta de fusión se comporta como una rotura empotrada.
- g) Encogimiento: este es un fenómeno común producto de que los collares de soldadura tienden a encoger longitudinalmente la tubería en aproximadamente 1/8” y causan desalineamientos angulares.

## **6) Inspección y pruebas de soldadura**

Luego de la soldadura los cordones son sometidos a pruebas no-destructivas que se realizan en un porcentaje mayor o menor o en todas las soldaduras. Determinando el porcentaje de soldaduras probadas, dividimos las locaciones por las que pasan las tuberías y las clasificamos en 4 según sus características urbanas. La denominación de clases viene basada en un área que se extiende a 220 yardas a cada lado de la línea eje de 1 milla continua de longitud de tubería:

1. Clase 1: locaciones con muy pocos edificios o sin ellos. Al menos 10% de las soldaduras deben ser probadas excepto en locaciones costa afuera.
2. Clase 2: localidades con un cierto número de edificios o casas. El 15% de las soldaduras son puestas a prueba.
3. Clase 3: las características urbanas se asemejan a la de pueblos.
4. Clase 4: las locaciones incluyen edificios de 4 o más pisos y están densamente pobladas. El 100% de las soldaduras son puestas a prueba y de no ser posible al menos el 90%. Tanto en las clases 3 y 4, en los cruces de cursos permanentes de agua (ríos grandes, arroyos),



lugares donde encontremos que el derecho de vía cruza rieles de tren, carreteras y caminos de uso público, incluyendo túneles, puentes, etc. y en uniones finales de la tubería “tie-ins”, el 100% de las soldaduras serán inspeccionadas.

Estos porcentajes son sólo indicativos mínimos de inspección por zona. Si el proyecto en curso considera conveniente de acuerdo a sus especificaciones particulares, un mayor número o inclusive el 100% de cordones pueden ser probados. Las soldaduras que son rechazadas deben ser removidas y reparadas, en cada soldadura que va a ser reparada el defecto debe ser encontrado, removido, limpiado el metal, el segmento a trabajarse precalentarse y luego nuevamente realizar la soldadura. La nueva soldadura será puesta a prueba para probar si se le acepta o no.

Inicialmente la inspección era visual, con los años, métodos más profundos han sido puestos a la práctica como:

**Pruebas radiográficas:** método muy usado por sus múltiples ventajas (sobre todo detección de defectos volumétricos y superficiales), se usa una fuente de rayos X o rayos gamma en un lado de la superficie en evaluación y en la otra una película (lo más cerca posible a la superficie) para registrar los defectos como vacíos.

**Prueba por partículas magnéticas:** en esta prueba usamos un yugo magnetizado creado por corriente AC circulando en alambres enrollados alrededor del mismo. El yugo es colocado sobre la superficie de la tubería generando un campo magnético y líneas magnéticas recorren la superficie de la tubería mientras un polvo (método en seco) o un líquido con partículas magnéticas son dispersados sobre el área. Consecuentemente las partículas se van orientando de acuerdo a las fuerzas generadas a lo largo de las líneas magnéticas y de haber discontinuidades en la soldadura, estas perturbarán las líneas y se harán visibles donde las líneas no son continuas.

**Prueba por tintas de penetración:** este método detecta defectos en superficie por la aplicación de tintes líquidos en superficies limpiadas, el tinte penetra en huecos, mini fracturas o irregularidades que serán puestos en evidencia una vez que se remueva el tinte del área y se aplique un rociado de contraste que haga resaltar el tinte remanente en los defectos. La prueba es ideal para porosidades provenientes de la fabricación de los tubos, mini-fracturas en superficie, costuras, penetraciones incompletas, huecos y problemas de corrosión.

**Pruebas ultrasónicas:** las ondas ultrasónicas también son usadas en la detección de defectos con la ventaja de no sólo cubrir el espectro superficial. Con ayuda de un transductor (emite ondas ultrasónicas) y un líquido de cobertura para detectar defectos, roturas y evaluar el espesor; tiene como ventajas el que sólo se necesita de un lado del objeto para realizar el análisis, mide con bastante precisión la profundidad y longitud de roturas (y fallas similares) y variando de ángulos podemos examinar figuras complejas. Sus principales desventajas son: es difícil el análisis de figuras complejas, se

requiere de una superficie alisada y cubierta de líquido especial y como el transductor sólo cubre un área pequeña de evaluación, toma un buen tiempo el escanear piezas o secciones de tamaño grande. Aparte el método requiere de alguien con experiencia y habilidad ya que 2 o más roturas se pueden camuflar y no deja registro permanente de lo observado.

El método más usado es el radiografiado por rayos X o gamma. La manipulación de equipos de rayos X es pesada por lo cual los equipos de rayos gamma ofrecen una mayor facilidad de manipulación en sectores alejados.

## **IX.- Recubrimiento y protección catódica.**

### **1) Recubrimiento para tuberías**

Al estar elaboradas de acero las tuberías son fácilmente susceptibles de sufrir los efectos dañinos de la corrosión y del medio ambiente tanto después de su fabricación y transporte como durante el periodo de tendido y en su vida operativa, cuando estando enterradas van a ser sometidas a un constante ataque del terreno que las rodea (muchas veces bastante agresivo). La corrosión ocasiona un flujo de corriente eléctrica desde la tubería hacia el medio circundante llevando a la larga a un deterioro del tubo. Una de las soluciones más comunes y útiles para contrarrestar tal efecto es el usar un recubrimiento exterior que proteja y aisle la tubería.

Algunas de las propiedades a enumerarse en un buen recubrimiento son:

- a) Buena adhesión a la tubería: es esencial una buena adherencia permanente a la superficie pues en caso contrario pequeños espacios pueden alojar humedad que lentamente afectará la longevidad del recubrimiento junto a esfuerzos de rozamiento con el terreno y fenómenos de desadherencia catódica. Los espacios se irán agrandando multiplicando su efecto por lo que la limpieza en la superficie, buen flujo y aplicación del recubrimiento son mandatorios.
- b) Buena resistencia al impacto: es la resistencia a impactos concentrados en algún punto por algún objeto durante la manipulación y el relleno, pues al impactar el recubrimiento puede ser ahuecado derivando en una falla.
- c) Flexibilidad: resistencia a roturas y desadherencias por efectos de doblado del tubo. Se llevan a cabo pruebas para observar los efectos en radios de curvatura mínimos.
- d) Resistencia a los esfuerzos del terreno: el terreno aunque no parezca está en constante dinámica, ejemplo de ello son las arcillas que se expanden y contraen conforme son expuestas a humedad y que ejercen un fuerte arrastre sobre el recubrimiento durante la contracción.
- e) Resistencia a la abrasión (dureza): dado muchas veces un largo tiempo entre aplicación de recubrimiento y colocación en zanja, el

recubrimiento debe resistir fricción y abrasión durante el transporte, la manipulación, etc.

- f) Resistencia a la penetración: el apilamiento produce presión por lo que el recubrimiento debe soportar cargas estáticas que lo puedan deformar o penetrar.
- g) Resistente al clima: durante el período que la tubería no es usada o enterrada estará sujeta a los efectos del clima (humedad, exposición a rayos solares, etc.). Un buen revestimiento no será afectado en sus propiedades por los elementos del clima.
- h) Resistencia eléctrica: debe ser alta y no cambiar con el tiempo ni con el contacto al agua. La alta resistencia aislará eléctricamente al tubo aunque en verdad, el recubrimiento no estará expuesto a significativas corrientes excepto durante la detección de huecos.
- i) Estabilidad química y física: no debe reaccionar con el ambiente ni degradarse con el tiempo exhibiendo resistencia a ácidos, álcalis y agentes biológicos.
- j) Compatibilidad con la protección catódica: el otro método de protección anticorrosivo entra en acción cuando un punto del revestimiento es descubierto, sin embargo esto puede inducir la evolución de gas hidrógeno e incrementar el transporte de humedad al agujero. El proceso se desata en cadena al incrementar la desadherencia en los bordes del agujero.
- k) Compatibilidad con el recubrimiento de las juntas soldadas: deben guardar correspondencia entre ambos para no generar separación ni reacción – degradación de alguno de ellos.
- l) Resistencia a las bacterias del terreno, organismos marinos (locaciones costa afuera) y desadherencia catódica: debe resistir a estos elementos que tienden a corroer o degradar fácilmente el acero, no deben penetrar el revestimiento que debe ser neutro a su acción.
- m) Facilidad de aplicación: porque los recubrimientos difíciles de aplicar llevan a consumo de tiempo, mucha supervisión, dificultad frente a un medio agresivo (lluvia, viento, polvo) y posibilidades múltiples de fallas difíciles de detectar.

El recubrimiento anticorrosivo puede ser aplicado tanto antes de entregar la tubería al cliente como durante los trabajos de tendido (cuando la tubería acaba de ser soldada). Sin embargo y para aligerar labores en campo es preferible realizar la aplicación en condiciones seguras y protegidas del medio ambiente como en la fábrica de tuberías.

Para la realización del proceso de recubrimiento se procede a realizar una limpieza total de la superficie exterior de la tubería, dejándola libre de

materiales grasos y residuos. Inmediatamente se precalienta de manera uniforme dejando la superficie totalmente seca y limpia para la aplicación de abrasión “blasting” y maquinado que eliminarán vestigios de óxido y defectos metálicos sobresalientes, cuidándose que la humedad presente no genere una nueva capa de óxido; los procesos de aplicación del recubrimiento exterior consisten en la aplicación de múltiples capas que se adhieren, cohesionan y se consolidan como recubrimiento total para soportar las condiciones futuras de trabajo. Un proceso típico es el de tricapa de polietileno: liso, de espesor constante y sin deformidades ni irregularidades poseyendo las propiedades enumeradas anteriormente.

## **2) Protección catódica**

La protección catódica es otra forma de protección de la tubería contra el medio agresivo que la rodea ya que el terreno tiende a corroer la tubería por ataque del suelo y sus constituyentes como el agua, aire, sales, bacterias, etc., degradándolo en una reacción electroquímica a largo plazo. Para que la reacción se produzca deben concurrir 4 condiciones primarias:

- Debe de haber un cátodo y un ánodo.
- Debe de haber una diferencia de potencial entre cátodo y ánodo.
- Debe haber una conexión metálica entre cátodo y ánodo.
- El cátodo y el ánodo deben estar inmersos en un medio conductor eléctricamente común (el electrolito, en este caso el terreno que rodea).

Si el acero no es protegido adecuadamente su corrosión ocurrirá y probablemente será bastante rápida, llevando al adelgazamiento de la pared de la tubería o concentración de la corrosión en ciertos puntos específicos produciendo agujereamiento. Por eso la tubería es protegida de 2 maneras, con el recubrimiento alrededor de la pared externa y con el sistema de protección catódica. Los recubrimientos (tanto el del cuerpo de tubería como el de las juntas soldadas) son un excelente método de prevenir la corrosión, pero por la larga vida operativa que tendrán que sobrellevar y condiciones que los rodean, siempre es bueno prevenir alguna falla en toda la extensión de la tubería en algún momento indeterminado. Como complemento está presente la protección catódica.

La protección catódica consiste en la protección de la tubería volviéndola catódica dentro del ambiente. En contacto con el terreno, el tubo es ánodo perdiendo electrones por una diferencia de potencial creada con el suelo que hace que una corriente fluya desde el tubo, pero si se hace fluir la corriente hacia el tubo desde un ánodo de sacrificio con la aplicación de una fuente de corriente externa, entonces la tubería perdurará mientras el metal funcionando como ánodo se sacrificará. Hay 2 métodos para poder aplicar la protección catódica:

1. **Sistema de corriente impresa:** se imprime una corriente desde una fuente de poder externa que fluya entre los materiales para permitir una tasa de consumo o corrosión. La fuente de poder hace que la corriente fluya desde el rectificador hacia el cable cabezal que conecta los ánodos en su lecho. De los ánodos la corriente va hacia la tubería por el terreno y penetra en los posibles huecos o fallas del revestimiento, yendo por el tubo hacia un cable catódico soldado cuproaluminotermicamente (soldadura que une el acero con cobre). El circuito se completa con este cable que va de regreso al rectificador. Los tipos de ánodos usados son grafito, acero sin revestimiento, hierro con alto contenido de cromo - sílice, etc.

Las ventajas de este sistema son:

- Puede ser diseñado para un amplio rango de voltaje y corriente.
- Alta salida de amperaje por año disponible desde un solo lecho de ánodos.
- Grandes áreas pueden ser protegidas con una sola instalación.
- Voltaje y salida de corrientes variables.
- Aplicable en ambientes de alta resistividad
- Efectivo en estructuras no revestidas o pobremente revestidas.

Las limitaciones:

- Si hay tuberías adyacentes se puede causar problemas de interferencia catódica.
  - Susceptible a fallas de alimentación de energía.
  - Requiere inspección y mantenimiento periódicos.
  - Requiere una fuente externa, lo que involucra un costo.
  - La sobreprotección puede ocasionar daños al revestimiento.
2. **Sistema de corriente galvánica:** funciona similar a una celda galvánica en donde se proporciona un metal más electronegativo que el metal de los tubos, creando la corriente galvánica, una reacción natural. La corriente fluye del ánodo hacia el tubo por el terreno, entra en el agujero que tenga el revestimiento y la diferencia de potencial causada impide que la corriente deje la superficie impidiendo la corrosión. La corriente sale del tubo a través de la conexión cable cátodo (soldadura cuproaluminotérmica) y el circuito se completa uniendo los cables que salen del cátodo y ánodo en una estación donde se permita un fácil

monitoreo del flujo de corriente. Cuanta más alta sea la diferencia de potencial entre los metales, más alto será el voltaje.

Entre las ventajas del sistema tenemos:

- No requiere fuente externa ni regulación.
- De fácil instalación.
- Mínima interferencia catódica.
- Poco mantenimiento.
- Distribución uniforme de corriente.
- Eficiente uso de corriente de protección.

Y las desventajas son:

- Limitada diferencia de potencial.
- Limitada salida de corriente.
- Estructuras con pobre recubrimiento requieren abundantes ánodos.
- Puede ser poco efectivo en ambiente de alta resistividad.

Si bien es cierto que el sistema galvánico es más sencillo de usar y requiere menos elementos en su construcción como en su mantenimiento, tiene un rango de aplicación limitado a la capacidad de los materiales, a la resistencia del terreno, no cubre una gran área y no es muy efectivo para proteger tuberías pobremente recubiertas.

## **X.- Diseño geotécnico y control de erosión:**

A lo largo de la traza seleccionada en el bosque existirán numerosos obstáculos a superar (quebradas, abismos, pendientes, etc.), accidentes geomorfológicos que tienen una propia dinámica con el medio ambiente que los rodea (lluvias constantes, material orgánico abundante, dinámica de suelos combinada con constante flujo de agua en cualquier época del año, etc.). La interacción ha hecho que a través de los años el relieve del suelo selvático cambie de muchas maneras en forma lenta e imperceptible pero segura. Para los fines que buscamos, el tender una tubería que tenga varios años de vida operativa sin ser afectada por los movimientos de suelos, es crucial el poder predecir con precisión los cambios potenciales en el terreno y su intensidad. Basados en la predicción se busca los mejores y más seguros terrenos que se puedan cruzar y se efectúan tareas de control de erosión destinadas a no permitir o reducir al máximo la erosión de suelos que pueden exponer a la tubería a derrumbes, deslizamientos, contacto con aguas de lluvia, destrucción del relleno de protección, erosión, etc.

Se define como control de erosión a los trabajos realizados para controlar la erosión adicional causada por el hombre a su paso por un área, provocando un acelerado desgaste e inestabilidad del paisaje en relación a la erosión natural que mantenía con el agua y el aire antes de ser afectada. Para ello trabajamos en:

### ***Estabilidad de pendientes***

Al enfrentarnos a un terreno de colinas y cerros la traza estará llena de pendientes que varían desde las más suaves hasta las más empinadas; aparte del problema constructivo que representan, muchas de las pendientes pueden ser inestables porque cada cierto tiempo por la erosión de los suelos, la inestabilidad de sus capas superiores o inclusive de las subsuperficiales ocasionan deslizamientos de mayor o menor intensidad, peligrosos para la tubería tendida a través de ellas.

La mecánica de inestabilidad de las pendientes se puede entender tomándolas como una serie de capas superpuestas. La compactación que tengan entre sí depende de las características del suelo, la intensidad con que son afectados por las aguas de lluvia, la protección que tengan por la vegetación que las cubre, el filtrado de aguas subterráneas y la pendiente. Cuando los factores están en contra ocurren numerosos derrumbes y deslizamientos, dentro de los cuales el peor es el de asiento profundo en el que varias capas son comprometidas y que si encuentra una tubería a su paso la deformará fácilmente. Si agregamos el impacto de la construcción y nivelación de terrenos, inclusive viejas pendientes inestables con cierta compactación pueden reactivarse. Para prevención en el manejo de la estabilidad de pendientes podemos:

1. Reconocer y evitar pendientes potencialmente inestables.
2. Tener buenas prácticas en la nivelación de suelos que minimicen la posibilidad de deslizamientos.
3. Mantener el estable estado de pendientes con buenas técnicas de control de erosión.

El reconocimiento de pendientes inestables es algo complicado de predecir; algunos signos son árboles inclinados o deformados, terrenos inestables, grietas por donde el agua de lluvia irrumpe en el subsuelo. Sin embargo y en caso que la tubería deba necesariamente cruzar una de éstas, adecuadas técnicas pueden permitir no reiniciar movimientos o controlar la inestabilidad.

Durante la nivelación de suelos, algunas prácticas que se deben adoptar son la correcta ubicación de las tierras removidas, el proceso de movimiento de las mismas y la adecuada restauración de los contornos de las pendientes; una técnica comúnmente usada en la nivelación de una pendiente es empujar la tierra removida pendiente abajo, tal técnica puede contribuir a la inestabilidad

porque las capas empujadas están siendo colocadas sobre otras capas superficiales que no son estables y que en conjunto por el peso y movimiento pueden originar deslizamientos. A veces el material extraído es amontonado en las laderas pudiendo producirse el mismo efecto, por lo que es recomendable colocarlo en partes planas y seguras como las bases de las pendientes. Respecto a la restauración de los contornos, muchas veces se sigue la premisa de dejar todo tal cual se encontró lo que puede resultar erróneo porque la construcción ya dejó alguna perturbación en el paisaje y lo mejor es trabajar en base a la misma y volverla segura.



Algunas técnicas aplicadas para reducir la erosión y permitir mayor estabilidad de suelos son:

**Drenajes:** se basa en el control de los drenajes y cursos de agua sobre y por debajo del suelo, controlando la dinámica que el agua ejerce en acarrear los finos y las partes del suelo. La erosión del derecho de vía, la posible exposición de la tubería enterrada y la inestabilidad de las pendientes pueden ser controladas con la incorporación de canales, gabiones, tapones en zanja, subdrenajes y otras técnicas.

**Canales transversales:** son canales compuestos de tierra superficial, colocados transversalmente al derecho de vía en intervalos en una pendiente para coleccionar y redirigir el flujo fuera de la vía y específicamente del espacio donde están alojadas las tuberías. Son una práctica común para controlar las aguas superficiales y se aplican bastante bien en el control de las corrientes generadas por la lluvia. Para la construcción de canales transversales, algunas recomendaciones útiles son:

- Los canales deben ser construidos de materiales minerales y con una mínima cantidad de material orgánico pues contribuye en su descomposición y posterior destrucción.



- Una adecuada altura será calculada en base a estimaciones de las cantidades de lluvia registradas en las estaciones de mayor aforo.
- El dique tendrá mayor resistencia a la erosión en función de una mayor compactación.
- Los canales deben extenderse a lo largo de todo el ancho del DDV para prevenir que fallen en transportar las aguas de lluvia fuera del DDV.
- La determinación del espaciamiento dependerá de la topografía, de la pendiente y el drenaje. Como base, conforme aumenta la inclinación de la pendiente el espaciamiento entre canales se reduce.

Dependiendo también de las características topográficas se tomarán diferentes patrones en los canales. Los más comunes son el patrón diagonal y el bifurcado o en “V” (herringbone). El primero es común cuando la pendiente se inclina preferentemente hacia uno de los lados de la colina, sector hacia donde debe de dirigirse el flujo. El “V” se usa cuando la pendiente muestra inclinaciones hacia ambos lados de la pendiente o cuando el flujo no tiene una dirección definida hacia los costados. Para la determinación del espaciamiento de los canales transversales podemos valernos de la siguiente tabla:

Pendiente	Potencial de erosión del terreno		
	Alto (arena fina, limos)	Moderado (arcillas y arena gruesa)	Bajo (grava y lecho de rocas expuestas)
<b>Suave (&lt;5%)</b>	45 m	50 m	no es necesario
<b>Moderado (5% - 10%)</b>	30 m	45 m	50 m
<b>Empinado (&gt;10%)</b>	305 / % pend. m	305 * 1.5 / % pend. m	305 * 2 / % pend. m

**Canales longitudinales:** como complemento a los canales puestos en medio del derecho de vía se encuentran los canales longitudinales que corren paralelos a la pista y se ubican a los costados. Estos canales vienen a recibir todo el flujo de los transversales y lo llevan paralelo a la pista. Cuando las pendientes son ligeras los canales son simples vías ayudadas por la inclinación, trasladando el agua sólo por gravedad. Sin embargo conforme las pendientes aumentan, los canales trasladan agua a mayor velocidad causando erosión en el mismo canal y acarreado grandes cantidades de finos que se pueden acumular fácilmente en la descarga, llevando a una obstrucción. Por lo tanto en grandes pendientes los canales son construidos escalonadamente (caídas sucesivas de agua) controlando la velocidad del flujo y reteniendo en cada escalón un cierto porcentaje de los finos acarreados.

**Gabiones:** son conjuntos de guijarros de tamaño determinado agrupados y limitados por mallas de alambre y colocados en lugares donde la concentración del flujo fácilmente erosiona cualquier otro material. Los lugares donde puede ser necesaria su presencia son en alcantarillas, desagües, cajas de recolección de aguas, etc.; también tienen bastante aplicación en orillas de quebradas y

ríos para protección de taludes, pendientes y cimientos de puentes de la constante erosión. En su construcción se utiliza mantas o geotextiles como filtro para la retención de finos.

**Diques de contención en zanja:** no sólo las aguas superficiales representan un peligro para la erosión de la cobertura de las cañerías, también lo son el filtrado y las aguas de poca profundidad que poco a poco van concentrándose si es que no se coloca un obstáculo para detenerlas. Un método para detener el flujo es la colocación de bolsas de suelo impermeables en plena zanja, transversalmente a las tuberías, que detienen el flujo en el subsuelo redireccionándolo hacia la superficie donde es fácilmente alejado de la pista con el uso de canaletas transversales. Los sacos son elaborados con arena, con suelos finos seleccionados y combinados con cantidades pobres de cemento, todos rellenos en sacos de yute y colocados alrededor de la tubería (inclusive por debajo) para impedir cualquier tipo de erosión circundante. Los sacos son entrelazados lo más junto posibles, creando así una barrera impermeable al flujo y su espaciamiento en pendiente dependerá de la inclinación observada. Sin embargo y a pesar de su cuidadosa fabricación y colocación algunos problemas pueden surgir con su uso:

- El relleno y colocación de los sacos con tierra o material que se use es una tarea bastante exhaustiva, que consume bastante tiempo y de un costo relativamente alto.
- El entrelazado de los sacos debe ser bastante ajustado, no dejando pequeños espacios o canales por donde el agua pueda filtrarse. Similarmente donde los sacos limitan a los costados en las paredes y en el fondo de la zanja, el relleno debe ser bastante compacto (sin fugas ni huecos) tarea laboriosa y de inspección detenida.

Un método bastante más sencillo y efectivo es el uso de capas de bentonita seca (arcilla) y grava fina o arena. En su primer contacto con el agua la bentonita se hincha y se satura para formar una barrera totalmente impermeable, inclusive se puede eliminar el uso de la grava o arena de tenerse suficiente bentonita disponible.

En la construcción de diques debemos considerar que:

- En cualquier lugar donde se proponga la construcción de un dique, es recomendada la construcción de un canal transversal pendiente abajo y en superficie inmediatamente para redireccionar el flujo forzado a salir a superficie.
- Si bien inicialmente con el levantamiento topográfico se pueden escoger lugares donde colocar diques, la definición se hará notable una vez que la zanja se haya excavado y muestre condiciones del suelo para filtrado así como señales de aguas bajo la superficie.
- El planeamiento de la cantidad de diques debe ser cuidadoso, ni muchos que terminen por hacer una labor innecesaria, ni pocos que resulten ineficaces y que requieran recavar la zanja donde están los tubos.

**Subdrenajes:** son tuberías colocadas por debajo del nivel de la zanja, usadas para hacer descender los niveles de aguas subterráneas que resultan excesivas para los diques de contención. Una tubería es perforada, colocada en una zanja cruzando el derecho de vía y rellenada con grava; recolecta las aguas subterráneas y las lleva a donde la pendiente incline, sólo que a diferencia de los otros métodos, lo hace subterráneamente.

## **XI.- Cruce de cañerías en cursos permanentes de agua, perforaciones direccionales y colocación de cañerías en estas secciones**

Esta es una de las labores más complicadas y cruciales en la construcción y de mayor preocupación ambiental. Son cursos permanentes todos aquellos ríos y arroyos principales cuya actividad no cesa (o cesa un tiempo mínimo) aun en la época no lluviosa. Al ser permanentes el tendido perturbará por un tiempo el normal tránsito del agua, y posteriormente a este debemos estar seguros que la tubería no será dañada por contacto con el torrente de agua y consecuentemente fugas en la tubería no producirán contaminación. Para realizar los cruces existen diversos métodos proporcionando mayor o menor rapidez, perturbación y costo.

Identificando las clases de cruces en cursos de agua:

- Cruces mayores.
- Cruces menores.

**Cruces mayores:** son cruces en cursos de agua anchos, profundidad notable, con caudales considerables o con configuraciones o formaciones geológicas complicadas para la construcción que requieren del uso de técnicas de tendido especializadas y avanzadas, incluyendo equipos costosos y mayor riesgo de operación. Por esta razón el tendido de tales tramos se independiza de los sectores adyacentes; la profundidad, ancho y material que conforma el lecho del cuerpo de agua determinarán la clase de método a ser usado en el cruce. En el presente caso el río Camisea es un cruce mayor.

**Cruces menores:** son cursos de caudal pequeño y ancho no considerable como quebradas pequeñas que sólo en época lluviosa incrementan su caudal, por lo que no generan mayores problemas de construcción. El cruce se puede realizar con equipos normalmente usados en tierra (retroexcavadoras, tiendetubos) con técnicas similares a las de tierra firme. Debido a su similitud, técnicas y procedimientos comunes de tendido son fácilmente planificados para salvaguardar los aspectos ambientales. Estos cruces se parecen bastante a los cruces de caminos, vías férreas, carreteras, etc.

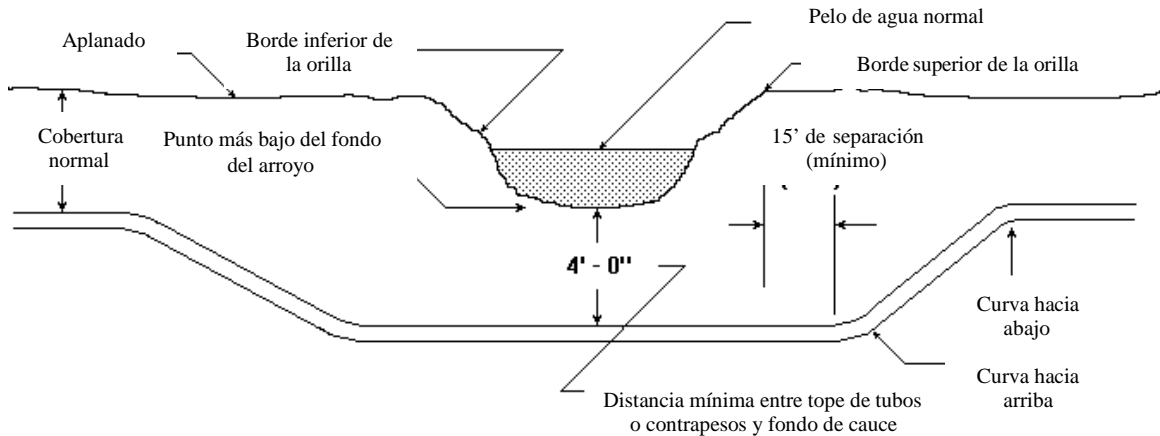
En cualquier cruce, como requerimiento de construcción, las tuberías son de mayor espesor (tubería pesada) para proporcionar protección mecánica y se les acopla lastrados o secciones de concreto para control de la flotabilidad.

El encargado de cruces especiales supervisará:

- Que la manipulación, excavación, soldado, recubrimiento, relleno y toda labor cumpla con los requerimientos de obra.
- Las profundidades de cruce u otras dimensiones anotadas en planos típicos y especificaciones son cumplidas.
- Donde haya sobrexexcavaciones, codos y curvas, las tuberías serán adecuadamente soportadas en el fondo de la zanja por bolsas de arena o el relleno de fondo, no generando esfuerzos.
- Las tuberías usadas son de mayor espesor y proporcionan protección mecánica adicional.
- Datos de las tuberías enterradas son registrados y quedan plasmados como cruces especiales en planos conforme a obra. Se pone énfasis en datos como longitud del cruce, profundidad de enterramiento, ubicación del cruce, etc.

Los métodos de cruce varían según la longitud a cruzar, el caudal del arroyo, la presencia de bancos u orillas amplias, zonas medioambientalmente sensibles, etc. Los podemos clasificar como:

- A cielo abierto “overland”, sin mayor diferencia que los métodos clásicos usados para tendido en tierra firme, se usa en arroyos de pequeño ancho donde se pueda maniobrar con maquinaria pesada usada en tierra (retroexcavadoras, tiendetubos, tractores, etc.).
- Cruces aéreos “overhead”, no sólo usados para cursos de agua sino en general para aquellos obstáculos en los que enterrar la tubería no es práctico ni razonable ni económica ni ambientalmente aconsejable. Los cruces aéreos no son soluciones muy buscadas porque dejan la tubería descubierta en tramos de longitud apreciable, generando exposición al medio y la creencia de peligro de fallas y explosiones.
- Cruces subterráneos “trenchless”, son técnicas con maquinaria especializada de alto costo por día en el caso de perforaciones direccionales, pero al mismo tiempo de mucha menor perturbación ambiental. El nombre “trenchless” en inglés viene de la idea de no usar una zanja abierta sino un hueco perforado que llegue de extremo a extremo donde se posiciona la tubería. Podemos distinguir las técnicas:
  1. perforación de tramos no muy largos y rectos (caminos, vías férreas),
  2. perforación direccional, que consiste en la perforación dirigida (y posterior ensanche) de un túnel algunos metros por debajo del nivel del lecho del río.



### Cruce típico de un arroyo

#### 1) Cruces a cielo abierto

Cuando las condiciones son favorables, un cruce a cielo abierto proporciona un método tradicional y relativamente sencillo aunque no de menor impacto ambiental. El cruce tendrá impacto en todo el tramo donde se efectúa (sobre todo en el lecho), lo que ha devenido en que leyes ambientales lo vayan descartando poco a poco y reduciendo su uso.

Primero seleccionamos la época en que los ríos tienen menor caudal o épocas de sequía para proceder, en la selva aproximadamente en los meses de junio – julio. Los estudios de topografía y batimetría registrarán las altitudes y distancias a cruzarse buscando los lugares más favorables para esta técnica, la cual requiere terrenos de pendiente suave. El cruce se efectúa en sección perpendicular al río (90° con respecto al eje del río en el sector de trabajo) o diagonal lo más cercana a los 90°, permitiendo menor distancia de cruce y menor perturbación en el lecho. No se deben colocar codos que compliquen la configuración.

Se trabaja con retroexcavadoras y líneas de dragado, las que excavan una zanja en las riberas y posteriormente en el lecho del río. En el lecho la labor se realiza en 2 etapas:

1. En la 1<sup>ra</sup>, desde una ribera se comienza la zanja mientras que en el lecho se hace trabajos de desviación del curso hacia la otra ribera, dejando el sector del lecho cercano a la zanja despejado y sin agua; por el bajo caudal registrado se puede mantener fácilmente sin inundar las áreas en la ribera opuesta. Excavada la zanja, se jala y coloca la cañería y se rellena cubriendo completamente la zanja.
2. Se redesvía el río hacia el lado opuesto donde yace enterrada la cañería. Una vez redireccionado, se comienza a excavar la margen opuesta y se instala la tubería desde la ribera que corresponde a este

margen. Habiendo dejado un traslape para encontrar el extremo de la otra columna de tubería a la mitad del río se hace la unión respectiva. La profundidad de enterramiento en el río es de 3 metros.

Previo a la excavación se inicia el preparado de las columnas de cañería que van a ser unidas ambas en cada orilla. Labores de desfile, alineación, soldadura, colocación sobre rodillos para sostener a los caños, inspección y pruebas de presión se suceden como se hace rutinariamente en tierra. Probada la columna se le coloca revestimiento de hormigón para evitar la flotabilidad de la cañería en presencia del medio acuático y quede lista para ser trasladada con la ayuda de tiendetubos y jalada con un malacate o tractor hasta llegar al punto de unión con la otra columna; similares tareas se reflejarán en la otra ribera para la otra columna. Una vez unidas ambas partes se las probará en conjunto para descartar fugas en sus soldaduras y uniones finales, terminadas las pruebas se proceden a las uniones finales con los tramos adyacentes del ducto

Dadas las preocupaciones ambientales por la perturbación, se requiere que tanto riberas como lecho y curso del río queden en lo posible tal como fueron encontrados. Paralelo a las labores de relleno de zanjas irán las de recomposición de laderas, riberas y taludes. Se puede clasificar el material extraído y recolocarlos en sus posiciones originales, así como proceder a la colocación de bolsas de cemento y gaviones que ayuden a la estabilidad de taludes y pendientes; el relleno de la zanja en el lecho se hará con el mismo material extraído.

La limpieza de la operación es básica en el lecho porque en un cruce abierto sí se tendrá contacto directo con flujo de agua, medio de transporte de cualquier sustancia como grasa, combustible, lechadas de cemento que contaminarían y producirían daños graves al ecosistema. La inspección evitará poner en contacto tales sustancias con el flujo y los equipos permanecerán en el agua el mínimo tiempo posible para evitar la contaminación, no se dejarán desperdicios acarreables por el agua ni en el lecho ni en las riberas.

## **2) Cruces direccionales**

Las técnicas de cruce direccional fueron desarrolladas con la finalidad de proveer un método rápido que no genere perturbación en los lechos y que sea efectivo. Este método es el más sofisticado y por lo tanto requiere de ciertas condiciones que harán que sea factible y luego exitoso. Para reconocer que un río (u otro obstáculo) es susceptible de ser superado por este método tomamos en cuenta:

- Cursos de agua grandes con habitats y ecosistemas sensibles, por lo que operaciones en el lecho no son permitidas.
- Orillas con barrancos inestables o pendientes difíciles de transitar.
- Preocupaciones ambientales y sociales involucradas como zonas de parque nacionales, reservas, cercanía a poblaciones, etc.

- Lechos con sedimentos fácilmente perturbables que contaminarían el curso del agua.

En el proceso de escoger el probable lugar donde se efectuará el cruce podemos considerar lugares que reúnan las siguientes características:

- Facilidad de acceso (comunicación directa y fácil con el DDV).
- Disponibilidad de espacios para la llegada y colocación de los equipos así como de probables campamentos satélites temporales de apoyo para el personal en trabajo.
- Áreas cercanas al río relativamente estables que no sean afectadas ni deterioradas fácilmente por crecientes y lluvias.
- Orillas factibles de recibir grava u otro material de asentamiento.
- Un lugar cercano que proporcione las características para la construcción de un puente lo suficientemente fuerte para el paso de maquinarias.
- Terrenos que reúnan las cualidades geotécnicas adecuadas para permitir la factibilidad del cruce (lechos no rocosos, con cierta consolidación).
- Zonas ambientalmente no sensibles.

Las ventajas del método:

- Los lechos y ecosistemas involucrados no se ven afectados ni dañados.
- Desde que no hay excavación en el río ni en las orillas no hay acumulación de limos y finos ni tampoco erosión de las orillas, por lo que no se necesitan tomar medidas especiales para proteger las especies acuáticas.
- Comparado con el método a cielo abierto, el espacio de trabajo es mucho más pequeño y se reduce a acomodar maquinarias en ambas orillas (extremos del túnel), más los tanques de lodo y maquinaria complementaria (retroexcavadoras, tractores, tiendetubos). La cantidad de recortes extraídos es bastante menor que todo el movimiento de tierra producto de la excavación.
- La técnica se puede aplicar en cualquier estación del año (mayor ventana de aplicación que a cielo abierto). Las épocas de gran flujo o de desove de peces no afectarán el trabajo.

Pero junto con estas sustanciales ventajas existen también varias razones que limitan el uso de la perforación direccional:

- Resulta difícil en terrenos poco consolidados, arenosos o cargados de agua.
- El costo de la operación es bastante alto, cobrado diariamente, precisando de planificación y sin pérdida de tiempo. De fallar, una operación de remediación a tajo abierto incrementaría el costo.
- El tramo de ducto necesita características especiales: primero tiene que ser tubería extrapesada, probada y comprobadamente bien soldada y con un recubrimiento distinto que aguante desgaste y arrastre continuos durante la operación de jalado (aumenta el costo significativamente). En adición, luego que la tubería ha sido jalada no hay manera de estar seguros que el recubrimiento resistió la fricción.
- La tubería requiere sucesivas pruebas hidrostáticas, tanto preparada y soldada fuera del hueco como dentro. Si la prueba muestra fallas en el tramo una vez dentro del túnel, no hay manera de reparar la falla.



**A**ntes de iniciar labores en el área prevista, es necesario ejecutar una serie de tareas para evaluar cómo iniciar la construcción reconociendo previamente el terreno lo mejor posible y a partir de eso planificar la ruta de la traza, ubicación de campamentos, logística y abastecimiento así como la programación de las tareas que hagan factible la realización del proyecto.

### **I.- Condiciones de trabajo y problemas a enfrentar:**

La construcción de un sistema de ductos de recolección – reinyección en la selva implica tomar muchas previsiones no asumidas en otros lugares de más libre tránsito o menor preocupación ambiental. Los problemas más comunes que se tendrán que enfrentar son:

- Preocupaciones ambientales en un área tremendamente sensible a lo externo.
- Problemas de transporte de personal: el personal a escogerse no vive en la selva, proviene de otras partes, generalmente regiones urbanas alejadas a los que se les transporta sólo por avión (medio más rápido) o por río (lento, mucho menos usado).
- Problemas asociados a logística: de materiales para la construcción, campamentos, alimentos, talleres, etc.; los que no se pueden adquirir en la región por carecer de mercados y centros de producción cercanos. Todo se debe traer de zonas urbanas e industriales alejadas.
- Dificultades de un medio ambiente agreste y poco poblado: por ser selva tropical aquellas áreas no transitadas por ríos, están cubiertas eternamente por vegetación espesa que debe ser cuidadosamente desbrozada y luego revegetada; los suelos son fácilmente erosionables y por lo tanto inestables. Al haber dificultades para la comunicación, para el mantenimiento de estructuras habitables y por el clima, las poblaciones son escasas, dispersas y de poca comunicación con el exterior.
- El clima es de temperaturas altas, con fuertes precipitaciones lluviosas y extrema humedad, sobretodo en los meses de verano.
- Estacionalidad de la construcción: las labores de la construcción en el campo están restringidas a los meses entre abril y noviembre, los otros meses identificados como de verano son influenciados fuertemente por la presencia de lluvias, el crecimiento notable de los ríos, arroyos, inundación de múltiples zonas y por lo tanto, recorte y desaparición de las pocas vías de acceso terrestre a lo largo de la traza.

- Problemas sociales: las comunidades nativas residentes en las cercanías son protegidas cuidadosamente por organismos nacionales e internacionales, cualquier imposición sobre ellas o sus derechos a la tierra y recursos es muy mal visto y origina múltiples problemas.
- Enfermedades y salud: las zonas de la selva son poco transitadas y adaptadas a la presencia del hombre, esto determina que en muchas áreas de trabajo, las enfermedades erradicadas en zonas urbanas (poco conocidas) sean abundantes o endémicas, alimentadas por el clima, la flora y la fauna. A su vez los trabajadores o proveedores pueden introducir enfermedades desconocidas en el área y diezmar la población nativa carente de defensas naturales.
- Presencia de zonas protegidas: la reserva Nahua Kugapakori hacia el este está muy cerca a la traza de los ductos. La traza podría volverse un medio de acceso para los madereros u otros, peligroso para esta área de voluntario aislamiento de nativos. Hacia el oeste ubicada a algunos kilómetros del curso del río Urubamba está la Zona Reservada del Apurímac, que podemos clasificarla dentro del área de influencia del proyecto aunque con poca posibilidad de afectación porque la traza toma la dirección Planta Malvinas – NE, donde se encuentran los pozos. Más alejados se encuentran el Santuario Machiguenga – Megantoni (sureste) y el Parque Nacional del Manu (este – Madre de Dios).
- Para este proyecto, la disponibilidad de energía debe ser autogenerada.

<b>Datos climáticos</b>		
<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>En Malvinas y SM-1</i>
<b>1</b>	Máxima Temperatura - verano	100 °F
	Mínima Temperatura - invierno	60 °F
<b>2</b>	Número de días en un año	
	cuando la temperatura es $\leq 65$ °F	17
	cuando la temperatura es $\geq 95$ °F	6
<b>3</b>	Promedios mensuales - el más alto	87 °F
	Promedios mensuales – el más bajo	71 °F
<b>4</b>	Rango de temperaturas para diseño	50 °F - 104 °F
<b>5</b>	Dirección del viento	
	Mayo - junio – julio	Desde el sur
	Otros meses	Desde el norte
<b>6</b>	Presión barométrica media	13,9 psia
<b>7</b>	Humedad relativa del aire	
	Máxima	100%
	Mínima	60%
<b>8</b>	Lluvia	
	Máxima lluvia mensual - diciembre	38,2"
	Lluvia anual media	61,6"
	Lluvia mensual media	5,13"
	Estación lluviosa	septiembre - abril

Aparte de los inconvenientes externos propios de la construcción, otros inconvenientes provendrán del diseño del sistema para que responda a la producción y no se detenga por fallas, fugas, roturas, etc.:

- Control de la corrosión o mitigación debido a la presencia de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (formación de ácido carbónico).
- Producción multifásica: características de retención de líquidos y formación de tacos en colinas y cerros, tamaño de las líneas vs. velocidad de flujo, caídas de presión, efecto de retención de líquidos afectando presión en cabeza de pozo, presión de entrada en planta y tamaño de atropa - tacos.
- Requerida continuidad en el uso de chanchos limpiadores de la tubería para control de formación de tacos, retención de líquidos y limpieza preventiva de la corrosión.
- Instalación, capacidad de lanzadores - receptores de chanchos.
- Elección de la ruta que satisfaga los requerimientos ambientales – sociales, económicos y técnicos (evitar pendientes empinadas, tubería sobre terreno estable, menor número de cruces de ríos, etc.).

## **II.- Selección de ruta para la tubería**

La definición de trazo o ruta que seguirán las tuberías es el primer paso para comenzar el proyecto y es básica para los estudios de ingeniería, los estudios de impacto ambiental, definición del proyecto y trámites a gestionar para la obtención de permisos que otorgue el gobierno (tanto locales como sectoriales). Por lo tanto lo podemos clasificar como dentro de la fase de planeamiento. Con la definición de la ruta obtendremos datos importantes tales como la longitud que tendrán los ductos, propuestas de centros de acopio de las tuberías, lugares donde se colocarán los campamentos, rutas alternas que se podrían seguir en caso haya accidentes geográficos difíciles de superar, proximidad a los ríos desde donde poder realizar el abastecimiento (de materiales de construcción, alimentos, medicinas, instalaciones de campamento, etc.), cruces de ríos y arroyos importantes, abismos y depresiones a ser cruzadas o rodeadas, cercanía a comunidades nativas o centros poblados, puntos más altos y más bajos de la traza, etc. En otras palabras, una colección de datos valiosos que definirán el proyecto. Cabe en este momento advertir que también los estudios técnicos pueden cambiar, según los parámetros definidos para la ejecución del proyecto (sean técnicos, de preservación ambiental, regulatorios por parte del Estado, económicos, etc.) por lo que es normal que no sólo una propuesta de ruta sea elaborada, sino varias.

### **1) Selección preliminar de ruta**

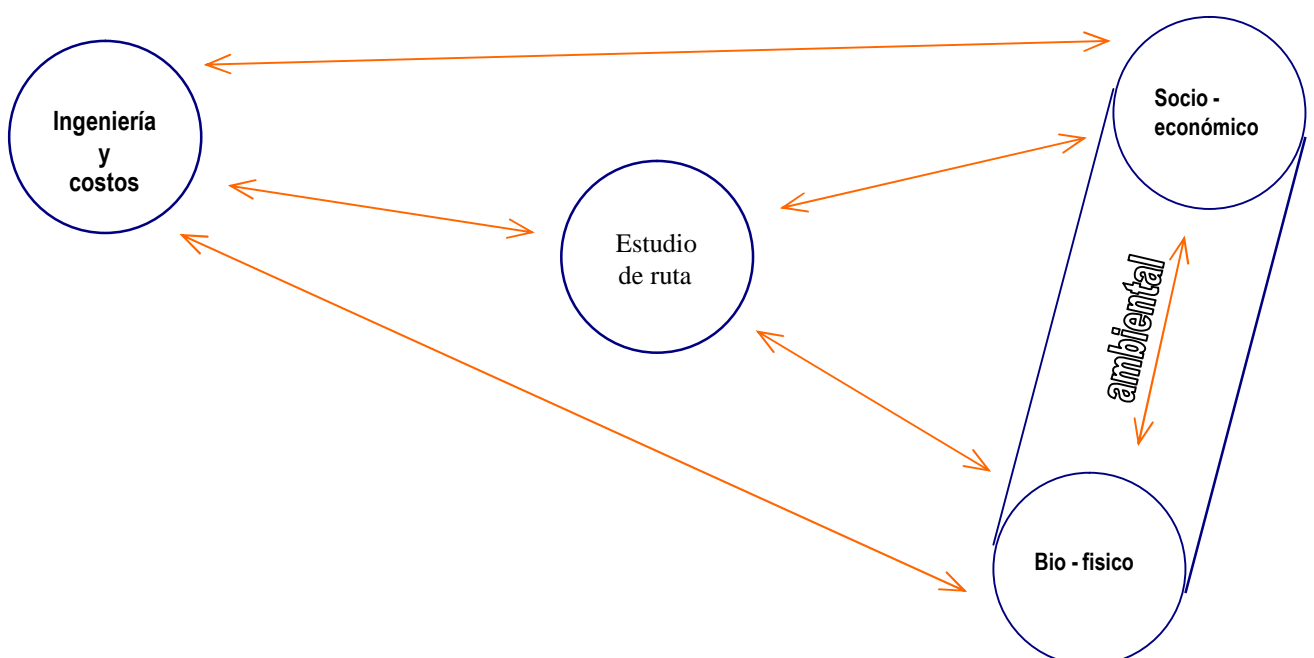
La selección preliminar de ruta comienza identificando el punto de salida y de llegada de las tuberías. De acuerdo a la dirección del flujo: para el sistema

de recolección el punto de salida es desde los pozos y el de llegada es la planta de separación, para el tubo de reinyección la situación es inversa. De aquí sacamos nuestra primera conclusión, sea cual sea la ruta a elegirse deberá partir de la planta y seguir una ruta noreste que es la dirección hacia donde están los pozos.

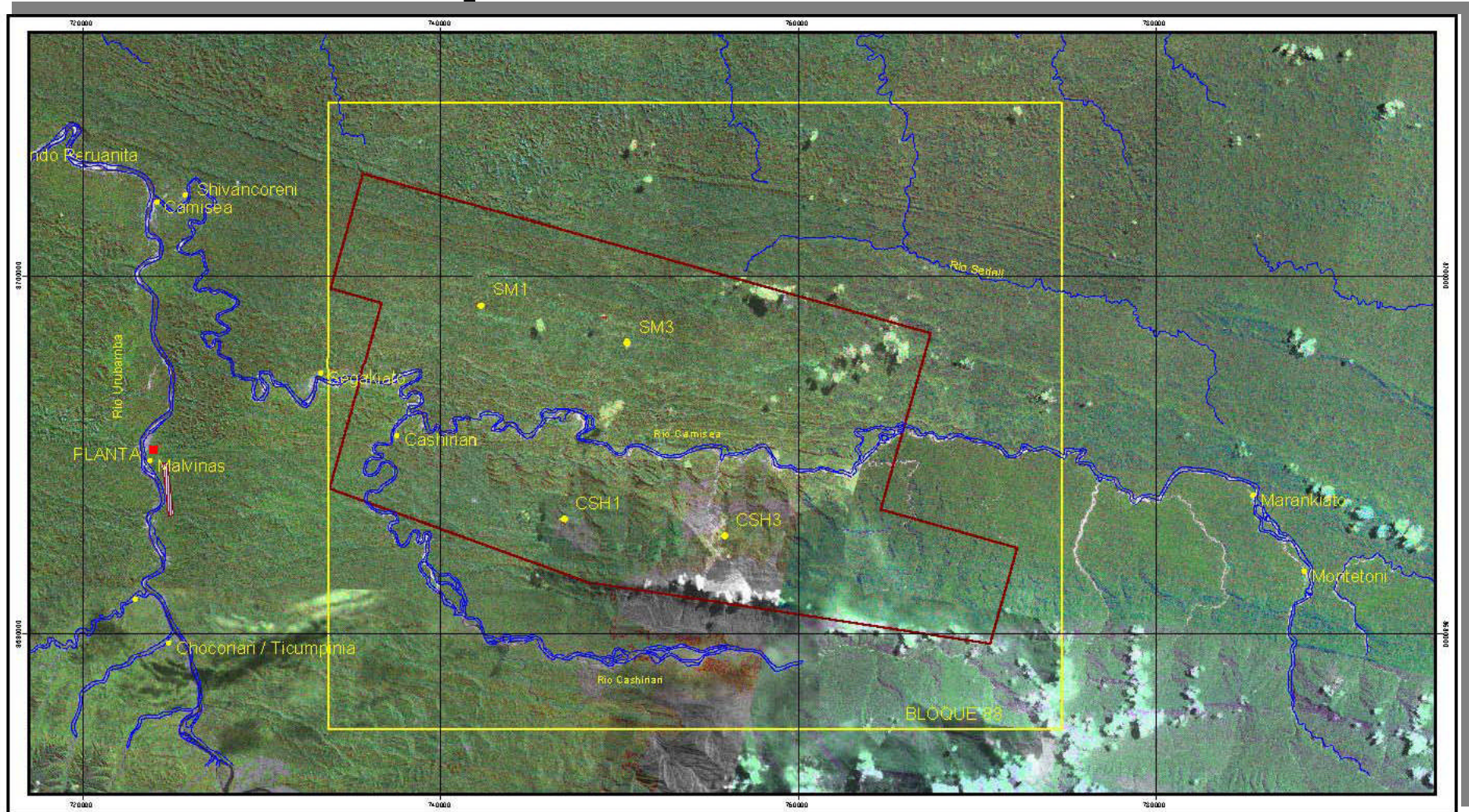
Lo más sencillo sería construir un gasoducto en línea recta que ahorre mayores cantidades de tiempo y dinero, pero esto es imposible desde que hay que considerar una serie de factores que afectan la construcción y que no se limitan al tiempo y al dinero invertido. Importante rol juegan: los factores ambientales, el diseño que pueda tener el gasoducto, las restricciones geográficas que podamos encontrar y de aquí las dificultades en la construcción que tengamos que enfrentar (lo que influencia directamente en el tiempo, dinero y sobretodo futura operación y tiempo de vida del gasoducto). Resumiendo, los factores que consideramos en la selección de la ruta son:

- Eficiencia en el costo.
- Integridad de la tubería.
- Impactos ambientales.
- Seguridad en la construcción.
- Restricciones en el uso de los territorios a cruzar como parques nacionales, reservas de protección de la vida silvestre, zonas de caza, agricultura, recolección y vivienda de las CCNN, etc.
- Tiempos de construcción y compromisos contractuales.

## 2) Principales consideraciones en la selección de ruta



# Mapa satelital del lote 88



### **3) Recolección de información y propuestas iniciales:**

Nuestras fuentes de información inicial son los mapas satelitales, mapas topográficos que existan, registros de inmuebles y terrenos y mapas con los límites y características de las áreas naturales protegidas. De los mapas satelitales, así como de la información recolectada en estudios y la disponible en entidades gubernamentales (INRENA, Instituto Geográfico Nacional, municipalidad), extraemos algunos datos que nos ayudarán en la definición del trazo:

- En el área no existen infraestructuras ni instalaciones, es un área sin desarrollo urbano. Al no haber instalaciones tampoco hay tuberías que sortear, los únicos asentamientos son los de las comunidades nativas que hay que tratar de evitar.
- A medio camino entre planta y pozos están las tierras que usan las CCNN para satisfacer sus necesidades vitales (agricultura, caza, recolección, etc.). La traza necesariamente dividirá las zonas por donde pase, por lo que es necesario negociar con las CCNN para afectar lo menos posible sus áreas de trabajo.
- No existen reservas ni áreas protegidas que sortear a pesar de la cercanía a zonas reservadas. Esto no implica que la zona no sea ambientalmente sensible y que no hayan áreas donde las especies de flora y fauna requieran un cuidado especial por lo delicado del ecosistema que conforman.
- La planta está dentro de las tierras propiedad de la comunidad nativa de Camisea, el grupo de pozos recae en propiedades de la comunidad de Segakiato. La traza por lo tanto recorrerá necesariamente buena parte de las tierras de ambas comunidades y podría recorrer las tierras de las comunidades de Cashiriari (sur) y Shivankoreni (norte). El proceso de negociación con las CCNN debe abocarse a negociar el derecho de paso.
- Los datos que se pueden extraer de mapas (tanto satelitales como algún otro recolectado de entidades estatales) son sólo referenciales para definir la traza y deben ser confirmados por las observaciones en campo.

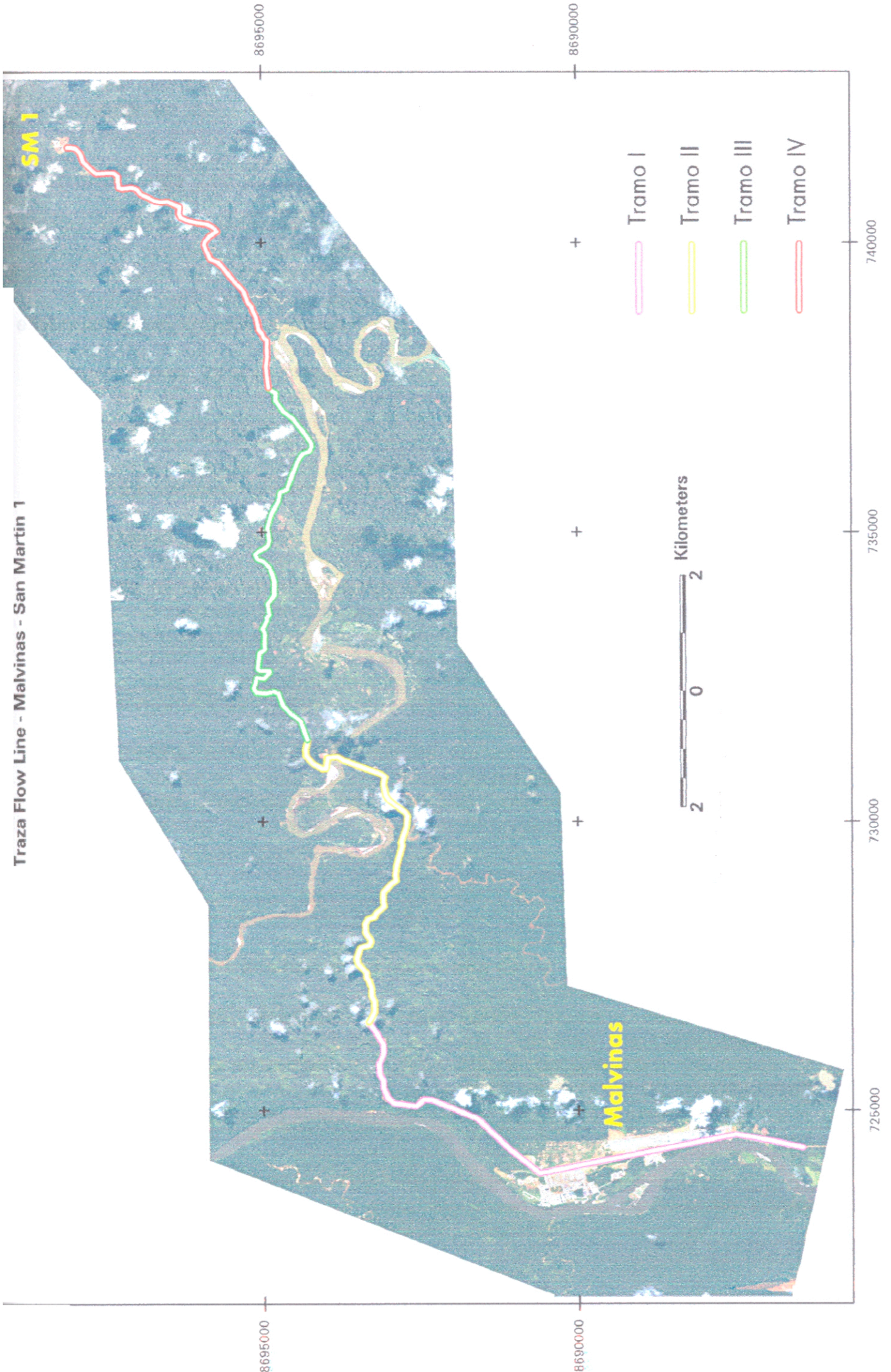
Con los datos obtenidos de los primeros mapas se va al campo y se hace un reconocimiento topográfico, del cual se extraen datos importantes para complementar y completar la selección de ruta. Resumiendo las principales dificultades y características que se extraen de los mapas y primeros reconocimientos en la zona son:

- El obstáculo más notorio visto en los mapas es el río Camisea que necesariamente tiene que ser cruzado porque separa el área donde está la planta de donde se encuentran los pozos. El río en el área de estudio está en su curso medio inferior próximo a su desembocadura en el

Urubamba, recibiendo el aporte de numerosos arroyos y quebradas. Su pendiente es baja al haber dejado las montañas de donde nace, el lecho es arenoso y en sus riberas presenta abundancia de orillas arenosas como de playa de rocas que pueden servir como canteras. De ancho variable, dependiendo de la estación (alrededor de los 100 m. promedio) tiene como cualquier otro río selvático presencia de meandros, pero también de zonas de curso recto facilitando la labor de cruce; lógicamente el río deberá ser cruzado una sola vez.

- En toda el área existen una serie de quebradas clasificadas tanto de cauce permanente como de cauce estacional que aparecen cuando llueve. Todas las quebradas requerirán un tratamiento de cruce como cuerpo de agua, no tan complicado como el del río pero que asegure estabilidad y no erosión de la zanja donde se coloquen los tubos. Las de cauce permanente requerirán probable cruce aéreo para evitar remover cantidades grandes de tierra y modificar demasiado el paisaje. Por lo tanto hay que minimizar los cruces de quebradas permanentes y los cruces aéreos.
- Prácticamente toda el área entre la planta y los pozos se caracteriza por la presencia de colinas, a excepción del valle en las inmediaciones del río Camisea y la zona adyacente a planta que es una terraza. Tal característica se traduce en numerosos montes a cruzar, especialmente en la zona central entre la planta y el río y la zona entre el río y los pozos. Entre la planta y el río Camisea las pendientes son muy empinadas formadas de colinas altas fuertemente disectadas que hay que cruzar cuidadosamente por laderas y/o crestas. Camino hacia los pozos las pendientes son menos severas en promedio por formar parte de colinas más bajas, pero por igual hay que buscar el sortearlas o evitarlas.
- La zona de sensibilidad de la flora se expresa por la presencia de bosques primarios (poco intervenidos, con especies de más difícil regeneración) en la zona norte de la planta camino hacia el río. Cruzando el río y por toda la zona norte hasta aproximadamente la comunidad de Segakiato encontramos los mismos bosque en colinas altas y medianas, por lo que las anteriores zonas serían las más sensibles desde el punto de vista forestal. Al sur del río y la comunidad de Segakiato al igual que toda la zona que va después de los bosques primarios hacia San Martín es de bosques mixtos, con presencia de pacaes y por lo tanto de bosques de mayor poder regenerativo disminuyendo la sensibilidad. Nuevamente la zona alrededor del Camisea se presenta más propicia al albergar bosques mixtos.
- Las comunidades nativas: la más afectada será probablemente la de Segakiato por encontrarse justamente a medio camino de la recta que une la planta a los pozos. Otras son Cashiriari (sur) y Camisea (norte) afectándose sus territorios así como su estilo de vida.

Traza Flow Line - Malvinas - San Martin 1



SM 1

Malvinas

- Tramo I
- Tramo II
- Tramo III
- Tramo IV

2 0 2 Kilometers

8695000

8690000

725000

+

+

+

730000

735000

740000



- Otras restricciones a evaluarse conforme se conozca más la ruta son la posibilidad de encontrar zonas de restos arqueológicos, los bajiales próximos al río, los abismos en la zona de colinas, etc.

#### **4) Restricciones y características del área entre planta y pozos:**

Al realizarse el levantamiento topográfico inicial, se identifican las siguientes restricciones entre planta y pozos:

Aquellas relacionadas a cursos permanentes y/o principales de agua, entiéndase ríos, arroyos, cuerpos de agua como lagunas o cochas y pantanos.

- Cruces: toda la zona está llena de quebradas a cruzar en número variable, pero el cruce más importante será necesariamente el del río Camisea. Como es un cruce mayor o importante debe ser hecho una sola vez y en un lugar que asegure estabilidad para la operación; como en toda región selvática, existen bajiales y pantanos que deben ser evitados yendo por zonas de poca posibilidad de inundación.
- Áreas de erosión potencial: relacionado a los cruces de cursos permanentes como el río Camisea. Nuestra área de cruce se ubica en el curso medio inferior del río próximo a su desembocadura, caracterizado por una suave pendiente y lechos arenosos amplios, por lo que la erosión no es tan dramática en las riberas como en su sección superior. Las probables zonas de erosión sólo serían las collpas y barrancos de las colinas en el sector central entre las comunidades de Segakiato y Camisea (a evitar).
- Lechos poco favorables en los cursos: el lecho medio inferior del Camisea es arenoso con algunas playas de rocas que se inundan en verano. Pero de los estudios, tales playas de rocas no son muy profundas por lo que se desestima la presencia de lechos rocosos.
- Variación y progresión de los cursos naturales de agua: el curso bajo del Camisea está lleno de meandros y también de pequeñas rectas, el lugar de cruce debe ubicarse en los segundos.

Los relacionados a la fisiografía (geografía física):

- Pendientes excesivamente empinadas: la zona central entre el campamento de Malvinas y el río Camisea se caracteriza por pendientes extremas (< 70%) producto de una zona de colinas y abismos. Después del río Camisea, hacia el norte de la comunidad de Segakiato hay una zona de fuertes pendientes que hay que cruzar para llegar a los pozos de San Martín 1.
- Pendientes laterales: hay innumerables laderas por la presencia de colinas, pero se pueden evitar siguiendo la línea de crestas y pasos bajos.

- Pendientes rocosas: no las hay en nuestra ruta, pero son comunes en la zona sur del lote (Cashiriari).
- Suelos erosivos o fáciles de erosionar: en toda la zona es muy común la presencia de suelos arcillosos y areniscas, muy susceptibles de erosión y movimiento por las constantes lluvias.
- Terrenos rocosos, canteras y zonas de acumulación de cantos rodados como las riberas de los ríos: son posibles de encontrar en las proximidades del Camisea.
- Terrenos arenosos: existen bancos de arena a lo largo de las riberas del Camisea.
- Posibilidades de movimientos telúricos: de ocurrencia espaciada ya que el lote no es un área sísmica de importancia y el historial mismo así lo dice.

Algunas otras restricciones que tenemos que considerar:

- Áreas pobladas: las zonas próximas a CCNN, Camisea y Shivankoreni al norte, Segakiato en línea directa hacia los pozos y Cashiriari algo más hacia el sur. Segakiato con aproximadamente 300 personas y Cashiriari con 200 (alrededor de 500 en afectación directa) serán los pobladores más cercanos que notarán más las actividades de tendido.
- Áreas restringidas como parques nacionales y de CCNN: el camino entre planta y pozos no cae dentro de ninguna zona reservada, pero se aproxima a la reserva Nahua Kugapakori.
- Áreas con acceso temporal y permanente: la entrada por vía aérea se puede mantener permanentemente para el traslado de personal; pero las vías terrestres se inundan fácilmente y se vuelven intransitables durante el verano, aunque como contraparte las vías acuáticas (el río Camisea y el Urubamba) se vuelven más navegables. Sin embargo para recorrer la traza siempre es necesario tener el apoyo de rutas terrestres.
- Locaciones para los futuros campamentos: deben ser cercanos a ríos, zonas planas, con vías de comunicación y espacio para viviendas y talleres. En el área entre planta y pozos las zonas más propicias son aquellas cercanas al río Camisea.
- Tiempos y plazos pactados para el desarrollo de la construcción: se debe llevar cabo en un plazo menor de 8 meses, período no lluvioso.

Una vez presentadas las restricciones que probablemente enfrentemos en nuestro camino evaluadas del trabajo en mapas y fotografías satelitales, se

hace el reconocimiento en el campo, con el cual se definirá el trayecto de la ruta.

### **5) Características que debe tener la ruta seleccionada:**

Basados en las características extraídas de los mapas y levantamientos topográficos iniciales, se estudia las posibilidades de ruta entre planta y pozos. Los requerimientos que nuestra ruta seleccionada debe satisfacer son:

- El menor número de cruce de ríos o cursos principales de agua y cruces aéreos, los mismos que tienen un tratamiento especial al momento de la construcción, así como evitar las zonas permanentemente inundadas (pantanos, zonas anegadas) como las propensas a la inundación en tiempo de lluvias (planicies, zonas cercanas a quebradas).
- Alejarse de los asentamientos de colonos y comunidades nativas por el impacto social que se pueda causar en ellos.
- Buscar rutas o trayectos que proporcionen una mayor estabilidad, seguridad y confiabilidad de terrenos para el futuro tendido de los ductos. Esto significa terrenos que no se erosionen ni deslicen fácilmente y que se mantengan estables a las lluvias por largo tiempo. Abarca también la acción de evitar en lo posible pendientes empinadas y terrenos que no proporcionen apoyo y estabilidad suficientes.
- Evitar abismos y quebradas y hacer lo posible por tener un trayecto sin cambios demasiado abruptos en altitud. Razones técnicas obligan a que un ducto transportando gas y líquidos no deba tener estos cambios pues pueden producir resbalamiento, además porque la construcción así como la seguridad se ven más comprometidas cuando se tienen que superar desniveles abruptos. El trayecto por crestas y lomas es recomendable cuando la geomorfología del lugar no proporciona otra salida.
- Por razones económicas, tratar que el trayecto del gasoducto no sea demasiado extenso ya que sería un gasto innecesario de recursos de tiempo y dinero; aparte esto contribuiría a una mayor área de deforestación y de impacto ambiental.
- De haber algún resto arqueológico o cultural de importancia en la ruta, evitarlo y cambiar de trayecto. Estos hallazgos son considerados valiosos y defendidos por instituciones nacionales e internacionales.
- Evitar el paso por reservas, parques y santuarios nacionales. Si no es posible evitar el paso, minimizar el trayecto en tales áreas.
- Tanto desde el aspecto económico, constructivo y ambiental, la ruta debe producir el menor movimiento de suelos que se pueda realizar durante la construcción.

- La ruta escogida debe generar el menor impacto ambiental hacia la flora y fauna. Hay áreas vírgenes de la selva en las que los ecosistemas son únicos con especies abundantes y poco conocidas de plantas y animales; el posible derribamiento de especies de árboles importantes y su consecuente impacto en animales protegidos afectará la selección de la ruta. Este parámetro está bastante relacionado con el cruce de áreas protegidas, pero debemos considerar a cualquier área no protegida como muy sensible, por lo que la evaluación debe ser realizada por técnicos ambientales para evitar conflictos con entidades que los protegen

Complementando, algunos parámetros geotécnicos que debemos tomar en consideración son:

- Donde sea posible, las tuberías deben estar colocadas evitando las laderas de los cerros y los abismos que se tengan que cruzar. Teóricamente la línea de pendiente debe formar un ángulo de 90° con la línea eje de las tuberías, pero esto no es siempre factible de lograr pues las normas de construcción requieren un área de trabajo aplanada para facilitar las labores de colocación de tubería y relleno de zanja. Las tareas se complican algo más cuando tenemos pendientes muy elevadas que requerirán de mayor movimiento de tierras. En este caso es mejor colocar las líneas en posición paralela al plano de la pendiente para minimizar el peligro de tener deslizamientos y fuerzas actuando lateralmente sobre las cañerías.
- En lo posible cualquier pendiente inestable debe ser evitada. Para determinar cuando una pendiente es inestable o el grado de inestabilidad de la misma, se buscan ciertas huellas dejadas por deslizamientos o movimientos de terrenos realizados recientemente. Estos signos son rajaduras o roturas en el terreno, escarpaduras, árboles doblados o arrancados parcialmente de raíz, evidencia de erosión del suelo en las bases de las pendientes, existencia de manantiales o salida de agua desde la napa freática hacia la superficie en plena pendiente.
- Habiendo evidencias de reciente inestabilidad, la naturaleza del movimiento de tierras debe ser analizada. La inestabilidad y los movimientos del terreno se clasifican como profundos o someros y de acuerdo a esto podemos decidir que hacer con la parte del trayecto afectado. Normalmente se trata de evitar los sectores en los que el movimiento de terreno e inestabilidad son profundos porque los intentos de estabilización han probado ser bastante costosos, poco confiables y requieren mucho esfuerzo. Los casos someros pueden no presentar mayor problema por lo que la ruta puede pasar por ellos sin mayor inconveniente. Sin embargo, hay casos inevitables por lo que un extensivo trabajo de estabilización puede ser requerido.
- El aspecto económico debe primar bastante al momento de decidir si cambiamos o no de ruta. Para esto se recurre a la comparación en costos entre un replanteo de ruta y el costo de realizar la estabilización de

taludes y pendientes, nivelación, movimiento de tierras y control y rediseño de drenajes tanto en superficie como en el subsuelo.

- Los estudios por debajo de la superficie y análisis de estabilidad son requeridos para cualquier pendiente que se crea inestable y por la que la tubería pueda ser directa o indirectamente afectada.
- Uno de los pasos cruciales en la elección y evaluación de la ruta es la selección del lugar donde la tubería cruzará los ríos o cursos permanentes de agua. Tales lugares deben de cumplir ciertos requisitos que influyen directamente en la longitud como en el costo del proyecto:
  - 1) Lechos de río que se adecúen mejor al trabajo de instalación de las futuras cañerías. Los poco favorables son los rocosos que necesitan ser volados o los lechos de limo que son muy inestables y deben ser excavados a profundidad.
  - 2) El cruce de ríos es en ángulo de 90°, es decir el eje de la tubería debe cruzar perpendicularmente al eje del río para así tener el menor ancho de cruce y evitar pendientes inclinadas en las riberas.
  - 3) Las riberas de los ríos son estudiadas para evaluar su dinámica de erosión. Si la erosión es severa llevará a la destrucción de la cobertura de relleno de las tuberías, exponiéndolas, dañándolas y generando múltiples problemas.
  - 4) Buscar áreas adyacentes al río (riberas) que aseguren zonas planas o de suave pendiente donde colocar los equipos con los que se trabajará. Estas riberas no deben estar cerca de collpas (zonas ambientales sensibles para la fauna y de caza para los nativos), de abismos (dificultad en acercarse al río) y deben tener áreas amplias que no sean totalmente inundables en caso haya una fuerte creciente durante los trabajos.
  - 5) Buscar sectores de río en los que el flujo de agua no sea rápido y fuerte, el cual puede ocasionar problemas de erosión.
  - 6) Localizar el cruce en una sección recta del río (fuera de curvas y meandros), la misma que proporcionará una menor erosión de las riberas.

Como se ven los parámetros no son pocos y en muchas ocasiones pueden entrar fácilmente en conflicto, por lo que el adecuado equilibrio entre los mismos dará un trazo de ruta que será el proyectado y escogido, el mismo que durante la construcción será susceptible de cambio conforme las circunstancias, legislación, razones técnicas y operativas lo determinen. Sin embargo y para respetar lo proyectado y presentado a las entidades estatales, los cambios deben ser sólo los indispensables.

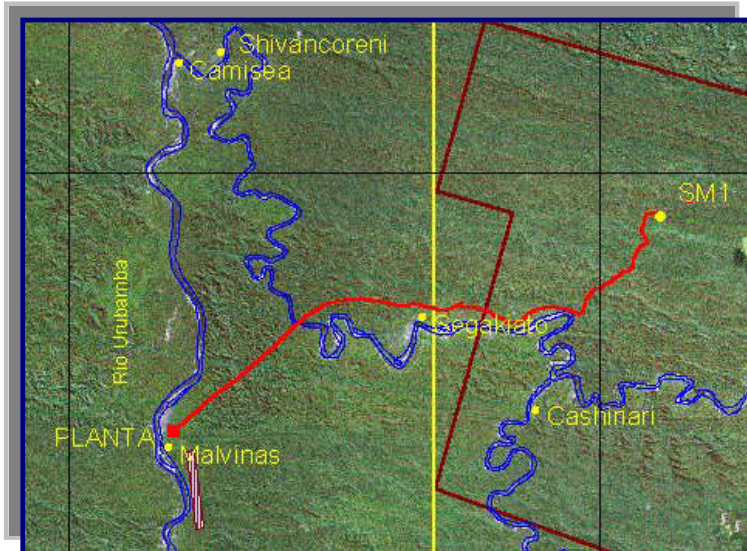
## 6) Selección de la traza:

Teniendo las características del área estudiadas más los requerimientos que nuestra traza debe de cumplir, seleccionamos la ruta que seguirán los ductos. Su factibilidad viene desde los estudios de mapas completándose a profundidad con el levantamiento topográfico:

Las razones por las que esta ruta fue seleccionada podemos explicarlas dividiéndola en 3 tramos:

### **Tramo inicial: Planta Malvinas – río Camisea**

Para el tramo inicial no hay muchas posibilidades de donde elegir. Si bien la zona alrededor de la planta es una terraza plana producto de los depósitos aluviales del río Urubamba propicia para la construcción y bastante intervenida por la mano del hombre, las colinas altas que se encuentran hacia el norte y el este presentan similares dificultades en lo referente al grado de pendientes, abismos e inestabilidad de terreno por deslizamiento (pendientes empinadas, abundancia de abismos). Además presentan un mismo grado de sensibilidad de flora y fauna por ser zonas de bosques primarios que rodean el oeste y suroeste del río Camisea. Tomando una ruta específicamente hacia



el norte no se evitarán las colinas y alargará la traza; irse directamente hacia el este de la planta puede llevarnos a cruzar una zona de colinas menos altas que conducirán hacia el valle del Camisea, pero igual se cruzará una zona sensible de bosques primarios con abundancia de arroyos permanentes y se sumará la posibilidad de cruzar territorios de la comunidad de Segakiato y Cashiriari situados al sur del Camisea; ir al sur para evitar colinas, bosques y CCNN alargará demasiado la ruta La mejor decisión para cruzar las colinas altas con presencia de bosques primarios es ir por el menor tramo posible hacia el río (dirección noreste hacia los pozos), en una ruta que vaya siguiendo la cresta de las colinas (para evitar los abismos) y que cruce el menor número de arroyos permanentes (principalmente ubicados el este de la planta). Tal ruta va primero hacia el norte y luego hacia el este, cruzando un solo arroyo permanente (el Purocari) para luego cruzar el Camisea fuera de la zona de bosques sensibles. Esta ruta además cruza muy pocas zonas usadas por los nativos.

### **Tramo central: Valle del río Camisea**

Para cualquier alternativa de traza, el tramo central debe ubicarse en el valle del río Camisea. Desde el punto de vista económico ofrecerá un tramo de recorrido más corto y libre de obstáculos tal como colinas empinadas. Existen colinas relativamente empinadas hacia el norte y hacia el sur y en ambos casos el suelo es más estable en las inmediaciones del valle que entre los montes. No hay zonas de mayor sensibilidad en flora y fauna porque en el valle los bosques son mixtos (mayor regeneración) y el río proporciona excelentes áreas planas para la colocación de campamentos intermedios en la traza y puede servir como vía de comunicación. La interrogante sería si la traza cruza el río y sigue por las proximidades de la ribera norte o sigue por la ribera sur y cruza el río más adelante. Eso es resuelto viendo que en la ribera sur se encuentran más arroyos de cauce permanente a cruzar y más contacto con territorios de CCNN a ser afectados. Además el río tiene un perfil más estable hacia el norte porque en el sur se forman muchos meandros que conectan justamente a los varios arroyos del área. La posibilidad de cruce del río apunta a hacerlo fuera de tal zona de meandros y luego seguir la traza cerca de la ribera norte pero sin irse demasiado al norte donde comienza la zona de colinas medias. Como inconveniente a este tramo, se pasará muy cerca de la comunidad de Segakiato (ubicada directamente en la orilla norte del Camisea) y se aumentan las posibilidades de hallar zonas de restos arqueológicos.

### **Tramo final: río Camisea - grupo de pozos**

Finalmente se debe recorrer el tramo que queda entre el valle del río Camisea y los pozos. Nuevamente como barrera natural se nos interpone un grupo de colinas, pero esta vez del tipo de colinas bajas fuertemente disectadas en una franja entre la ribera norte del Camisea y cerca de los pozos y ligeramente disectadas en San Martín 1. El ser colinas bajas se expresa como una disminución paulatina de las pendientes desde la ribera norte del Camisea en adelante (entre el 60 y 30 %) sin que lleguemos a cruzar zonas planas, ya que SM-1 está ubicado definitivamente en zona de colinas. Teniendo nuevamente una barrera de colinas al frente, nuestras posibilidades de ruta se reducen a cruzarlas en el menor trayecto posible desde el valle del río Camisea hasta los pozos. Otras dificultades asociadas serán la inestabilidad y sensibilidad de suelos (zona de pendientes, fácil de erosionar por ser suelos arenosos); pero como ventajas, la ruta se alejará cada vez más de los territorios de uso de los nativos y de la zona de probabilidad de ocurrencia de hallazgos arqueológicos; también los bosques que se cruzarán son en gran parte del tipo mixto y de menor sensibilidad.

Después de haber realizado el reconocimiento de campo, una serie de estudios más detallados darán inicio para conocer más y refinar la ruta ya escogida. Proceden las evaluaciones geotécnicas de pendientes y cruce de río así como ambientales, estudios de batimetría y suelos que apoyarán en la futura toma de decisiones y respaldarán desde un punto de vista técnico las elecciones hechas ante cualquier entidad reguladora que lo requiera. Casi por el mismo tiempo comenzará el contacto con los dueños de las tierras por las que atravesará el DDV para negociar el paso y atender los pedidos que ellos

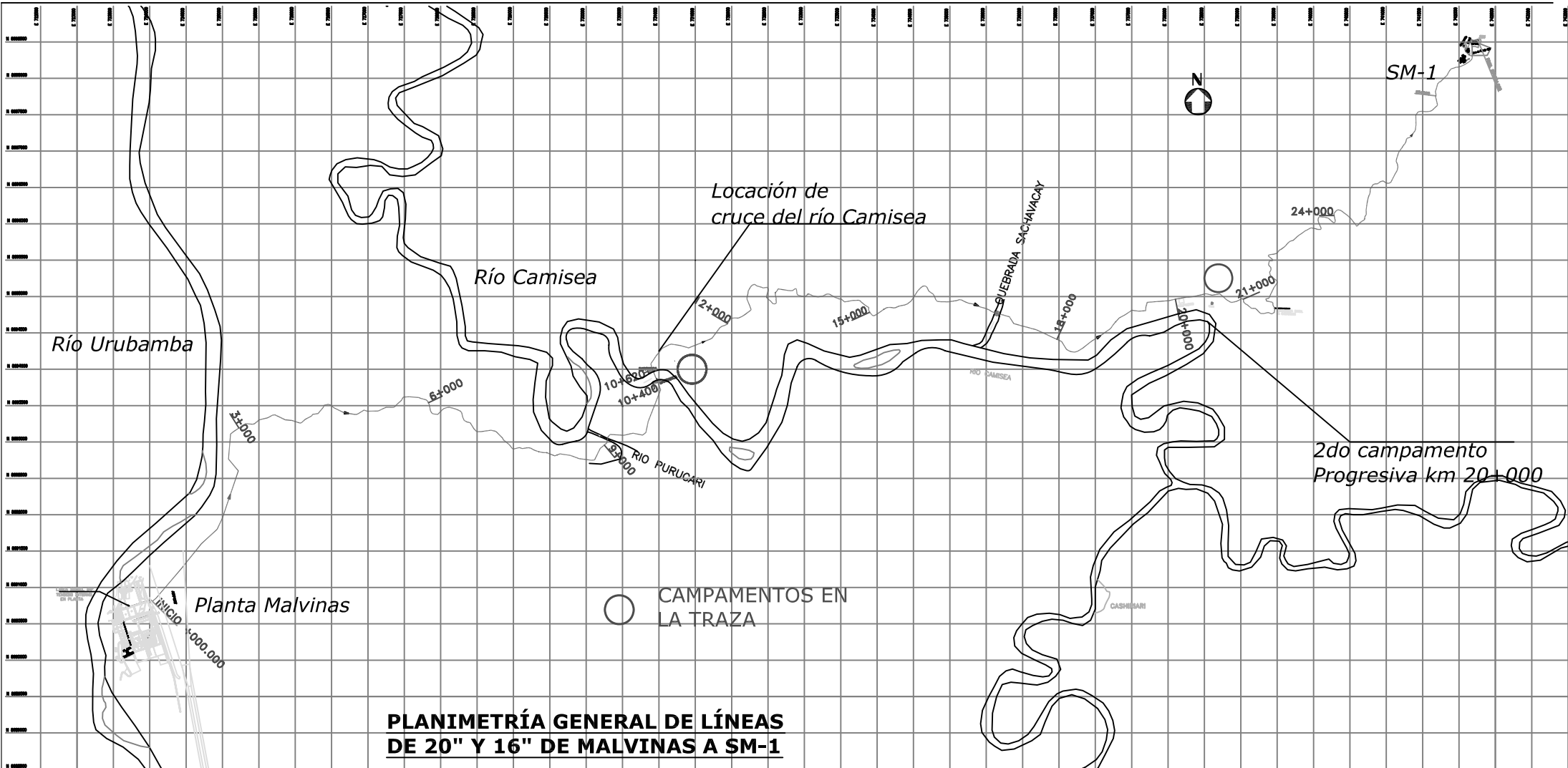
puedan tener respecto al trabajo. Con los estudios y negociaciones hechas algunos aspectos de la ruta pueden variar, aunque serán mínimos y son previos a lo que se conocerá como definición de ruta en el levantamiento para ingeniería (primeras planialtimetrías antes de comenzar la construcción).

## **7) Características generales de la traza:**

A fin de conocer más acerca de la traza que se ha escogido describiremos algunas de sus características más resaltantes:

- La traza tendrá un longitud de aproximadamente 26300 m. que correrán con cierta sinuosidad entre la planta Malvinas (valle del río Urubamba) hasta la locación San Martín 1, lugar en donde se ubican los pozos de gas.
- Las principales áreas fisiográficas que atravesará serán: terrazas de suave pendiente en las inmediaciones de la planta (PK 0+000 – 2+350), zona de colinas altas fuertemente disectadas (PK 2+300 – 8+500), lomadas (PK 8+500 – 10+000), cruce del río Camisea y riberas (PK 10+000 – 10+800), zona de colinas medias (PK 10+800 – 14+000), terrazas medias en el valle del Camisea (PK 14+000 – 20+050), colinas bajas fuertemente disectadas (PK 20+050 – 22+250), colinas altas moderadamente disectadas (PK 22+250 – 24+500) y colinas bajas (PK 24+500 – 26+100)
- El punto de inicio de las labores de construcción estará en la planta de Malvinas al ofrecer mayores facilidades de abastecimiento y logística así como para alojamiento del personal.
- Se planifica la colocación de 2 campamentos satélites de apoyo a las labores en secciones intermedias de la traza. Tales campamentos guardarán espaciamientos de 10 Km. y se colocarán en zonas donde la traza se acerca más al río Camisea (fuente de transporte, agua, etc.)
- Habrán 66 cruces de quebradas, la gran mayoría de ellas secas o de muy poco caudal con sólo presencia notable en momentos de lluvia. Las únicas quebradas con presencia importante de arroyos serán la quebrada Purocari (PK 9+100) y la quebrada Sachavacay (PK 17+100) que por su caudal y constante presencia de agua son probables de ser superadas por un cruce aéreo. Una de las premisas básicas en la selección de ruta fue justamente minimizar el cruce de quebradas con curso permanente.
- No existe la interrupción de carreteras, caminos principales, vías férreas ni alguna vía de importancia. Las únicas interrupciones en el trazo son las numerosas quebradas a cruzar y el río Camisea.
- Al ser el río Camisea un cuerpo de agua principal de ancho considerable y para evitar problemas de tipo ambiental así como repercusiones sociales afectando una fuente de vida de las CCNN, su cruce deberá ser





**PLANIMETRÍA GENERAL DE LÍNEAS  
DE 20" Y 16" DE MALVINAS A SM-1**

○ CAMPAMENTOS EN LA TRAZA

Río Camisea

Río Urubamba

Planta Malvinas

Locación de cruce del río Camisea

2do campamento Progresiva km 20+000

SM-1

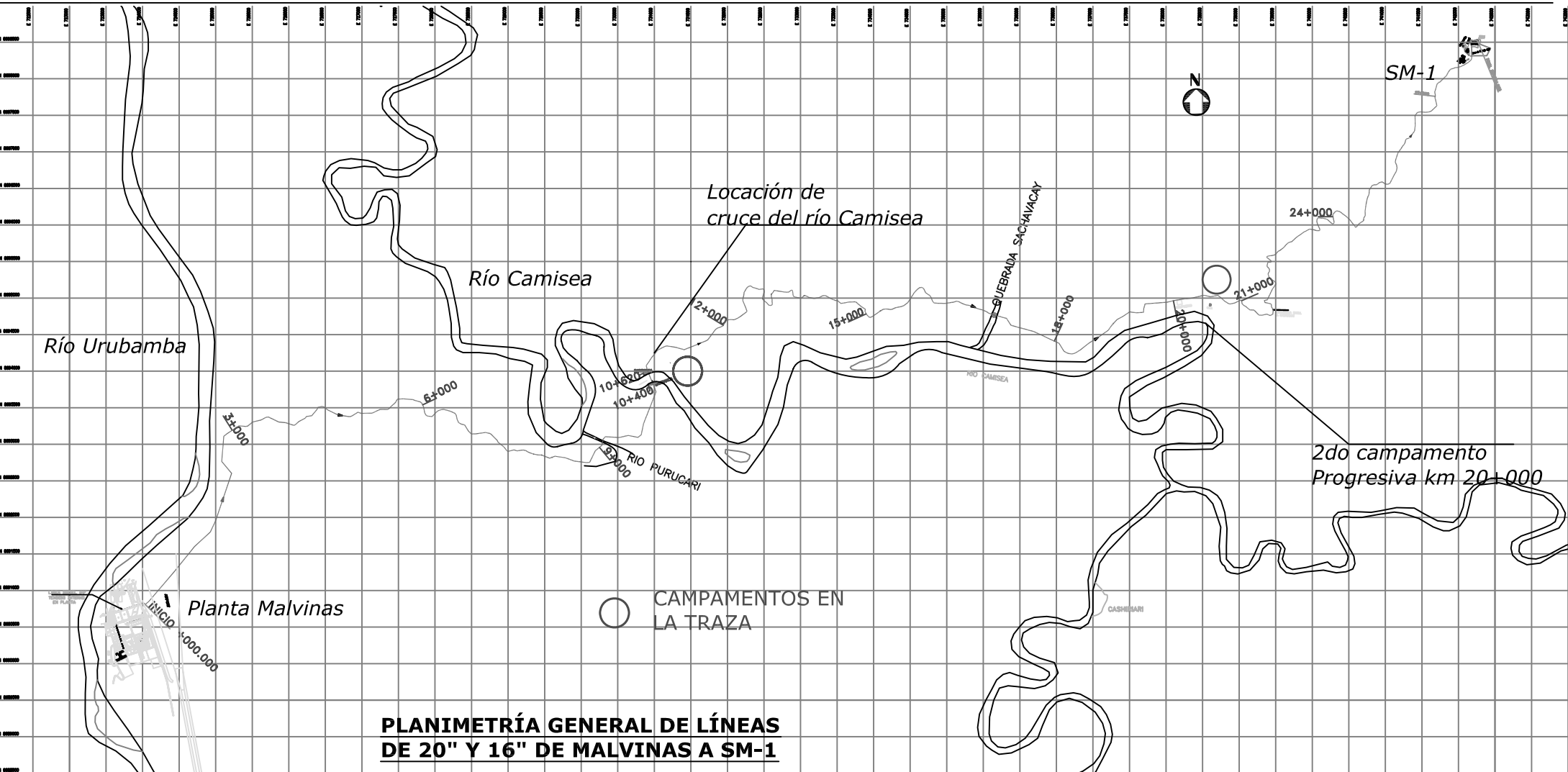


BUENABADA SACHAVACAY

RIO PURUCARI

CASHIBARI

Inicio 0+000.000



### Altimetría general para los ductos de recolección – reinyección de gas entre Malvinas y San Martín 1

Ubicación: Departamento de Cuzco – Provincia La Convención – Distrito Echarate – Selva Amazónica

Progresivas 0+000 hasta 26+289

Progresiva inicial: PK 0+000 (planta Malvinas)      Altitud: 376.33 msnm

Progresiva final:   PK 26+289 (San Martín 1)      Altitud: 438.05 msnm

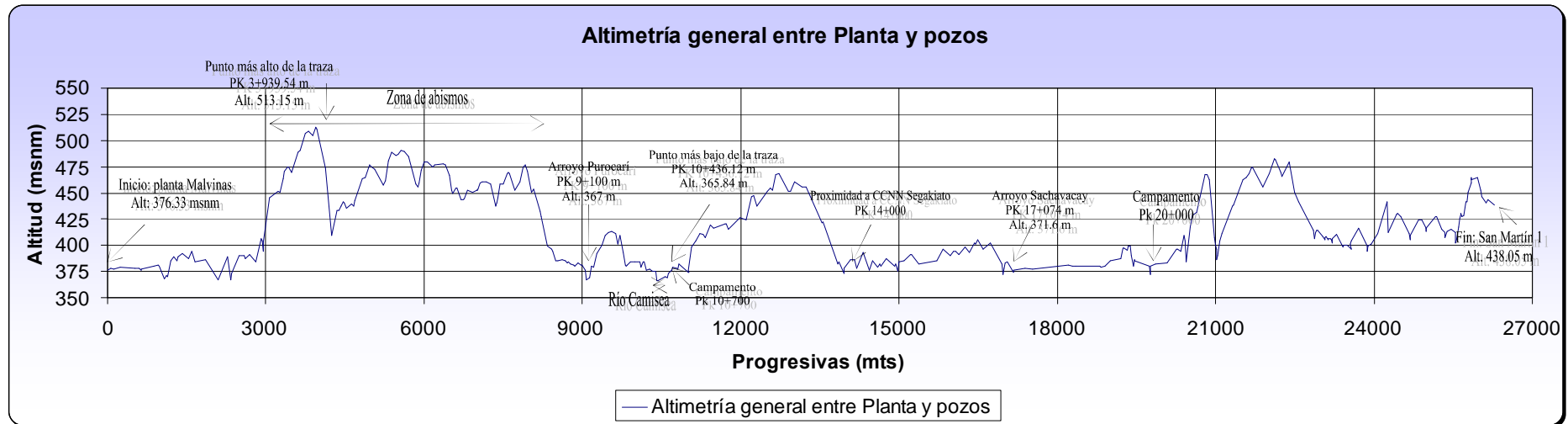
Longitud de ancho de vía (DDV / ROW): 18 metros

Profundidad de tapada: 0.90 metros

Obstáculos principales: Río Camisea (PK 10+500) – Quebradas Purocarí (PK 9+100) y Sachavacay (17+100) y numerosas zonas de abismos

Progresiva de mayor cota: 3+939.54 m      Altitud: 513.15 msnm

Progresiva de menor cota: 10+436.12 m      Altitud: 365.84 msnm (río Camisea)



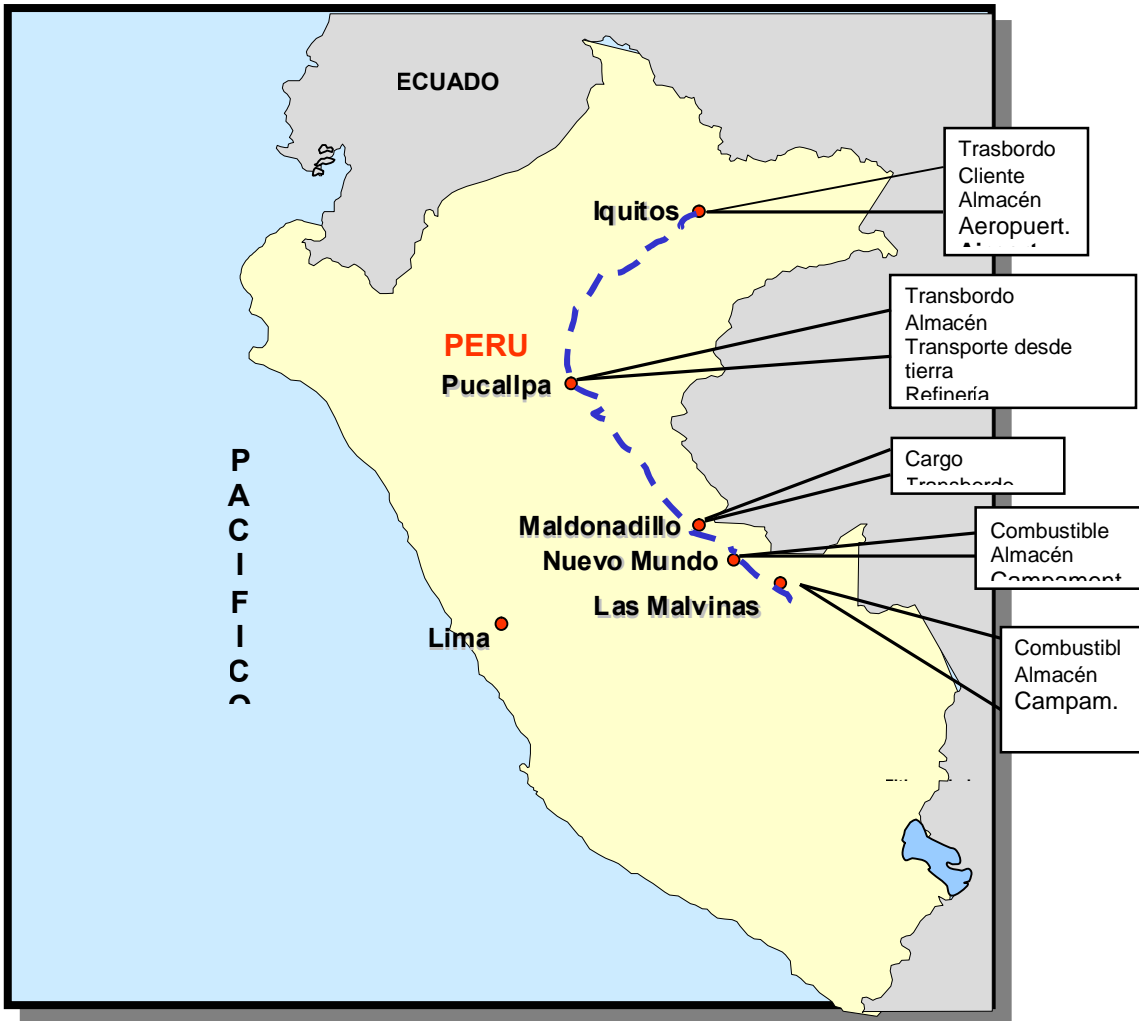
hecho por perforación direccional. Este método permite un menor tiempo de trabajo y menor perturbación del ambiente.

- Para tener vía de acceso a través del río Camisea, será necesario la colocación de un puente permanente durante toda la etapa de construcción. Para las quebradas de curso permanente o de gran ancho se colocarán también puentes de acceso, pero de menor complejidad que el del río y elaborados con material propio de la zona.
- El punto más alto de la traza esta localizado en la PK 3+939 con 513.45 msnm. (puntos de referencia en Malvinas). El punto más bajo está en la PK 10+436 con 366 msnm. (lecho del río Camisea). Como se ve la diferencia de altitudes no es muy significativa ni notoria como en zonas cordilleranas y ayuda a que la recolección de gas de los pozos sea llevada a cabo sólo por la presión en cabeza de pozo. La recolección de datos de altitudes será un parámetro importante en la planificación de las futuras pruebas hidrostáticas.
- Desde el punto de vista ambiental, toda la traza se ubica en una zona de alta sensibilidad ambiental al cruzar bosques con presencia de especies de flora y fauna en poco contacto con el hombre. Podemos identificar zonas con mayor sensibilidad que son las que se encuentran entre planta y río Camisea por la presencia de bosques primarios de bajo poder regenerativo.

### **III.- Logística y transporte**

#### ***Transporte de tuberías y materiales:***

El transporte en este proyecto cobra una vital importancia por la lejanía respecto a los centros de producción y abastecimiento de materiales como de servicios y mano de obra. Tanto los materiales como el personal tienen que ser transportados largas distancias, especialmente los materiales que vienen desde otros países.



Nuestras vías de acceso están limitadas a 2 posibilidades: aérea y fluvial. La segunda es la más importante desde el punto de vista de transporte de materiales de alto tonelaje como tubos, válvulas, etc. mayormente elaborados en el extranjero. La ruta fluvial es una muy larga conexión desde el Océano Atlántico y que corre a través de toda la red hidrográfica del Amazonas. Barcos de gran tonelaje entran por el Amazonas y recorren la ruta aguas arriba hasta llegar a Iquitos. De ahí se realiza el trasbordo a unidades más pequeñas sucesivamente que surcarán los afluentes hasta llegar al Bajo Urubamba. Desde Iquitos hasta Malvinas se encontrarán varios puertos de abastecimiento de combustible como Pucallpa y Sepahua. Los tiempos de viaje y distancias están dados en el siguiente cuadro:

Tiempos de viaje fluvial entre	Ida (corriente arriba)	Vuelta (corriente abajo)	Medio usado
Iquitos - Pucallpa	8 días	4 días	Barcaza
Pucallpa - Maldonadillo	7 días	3 días	Barcaza
Maldonadillo - Nuevo mundo	4 días	1 día	Barcaza
Nuevo Mundo - Malvinas	2 días	1 día	Barcaza
<b>Tiempos de carga - descarga</b>			
Iquitos	3 días		
Pucallpa	3 días		
Maldonadillo	1 día		
Nuevo Mundo	1 día		
Malvinas	1 día		

La época para el transporte es llamada “ventana de navegación”, dada en los meses de verano cuando el caudal de los ríos se incrementa permitiendo la navegación con embarcaciones de alto tonelaje. Conforme se penetre en ríos de menor caudal será necesario hacer trasbordos sucesivos a unidades más pequeñas capaces de surcar los tramos. El tonelaje a transportar para el proyecto es:

<b>Tonelajes a ser transportados</b>			
<b>20"</b>			
Espesor	Longitud ducto (m.)	Peso unit (kg/mts)	Peso (toneladas)
0,732"	23662,39	224,4	5309,84
0,804"	3032,1	245,6	744,68
			<b>6054,52</b>
<b>16"</b>			
Espesor	Longitud ducto (m.)	Peso unit (kg/mts)	Peso (toneladas)
0,726"	23715,99	176,4	4183,50
0,859"	2955,89	206,9	611,57
			<b>4795,07</b>
		<b>Total</b>	<b>10849,60</b>
		5%	542,48
		<b>Supertotal</b>	<b>11392,08</b>

<b>Meses en que los ríos son navegables en Selva para embarcaciones de tonelaje alto</b>													
Desde	Hasta	Meses											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Iquitos	Pucallpa												
Pucallpa	Atalaya												
Atalaya	Malvinas												

	Navegable
	No Navegable

Otra probable ruta de transporte es mitad vía terrestre - mitad vía fluvial. La vía terrestre es la que llega hasta Pucallpa por carretera y que la conecta con el resto del país hasta la costa del Pacífico, específicamente con Lima como principal centro de abastecimiento transportando insumos de a pocos. La distancia de Lima a Pucallpa es de 832 km y el tiempo de viaje en la carretera toma alrededor de 3 días.

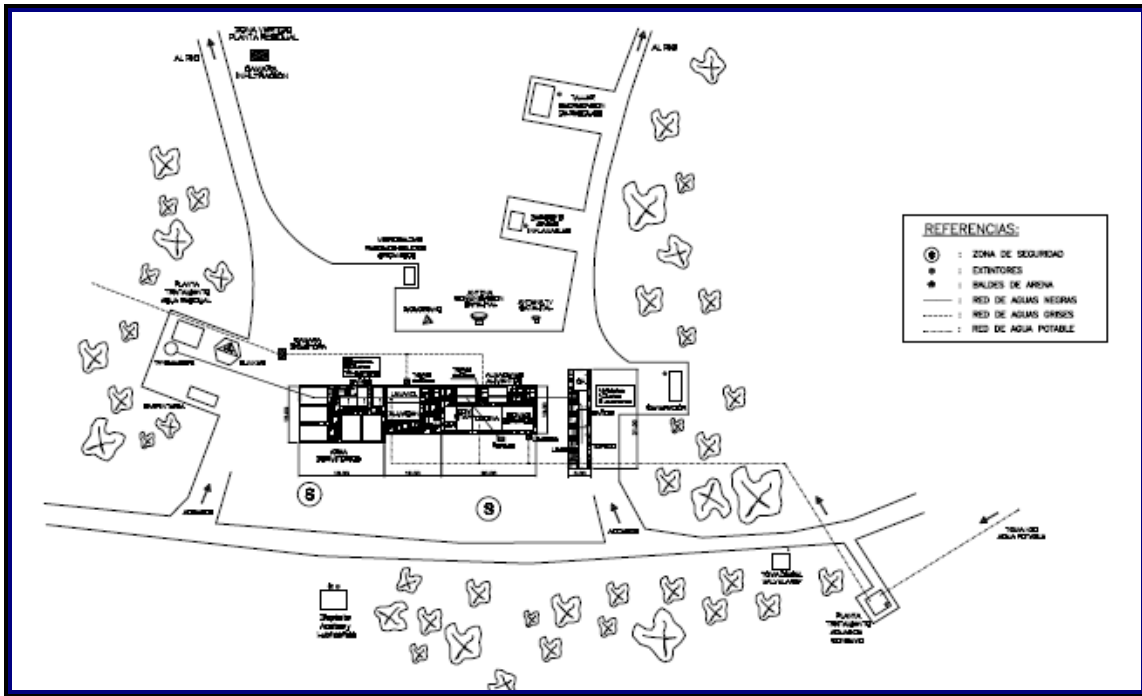
Llevadas las tuberías y materiales principales hasta el campamento de Malvinas, el siguiente paso es realizar el abastecimiento hacia los puntos de labor en las diferentes progresivas según el avance.

### **Reparto de tuberías a lo largo de la línea**

La descarga de las tuberías se lleva a cabo en varios puntos o centro de acopio. El principal puede mantener ciertas condiciones de almacenamiento que permitan preservar las cañerías en buen estado (ser almacenadas en galpones, evitar el contacto con agua o agentes ambientales que promuevan la corrosión, etc.). El mantener estas condiciones de almacenamiento es más difícil conforme uno se va alejando y las cañerías se dejan al paso. El reparto en terrenos desiguales es por medio de tractores, unidades de gran potencia y capacidad de carga, capaces de maniobrar en terrenos de gran pendiente por las cocadas en sus llantas y que llevan los tubos a los costados, balanceando el peso debidamente. El proceso es lento pero es el adecuado y recomendable a falta de otros (el transporte por helicóptero es costoso y limitado)

## **IV.- Campamentos**

Se planifica la instalación de 2 campamentos satélites aparte del principal ubicado en Malvinas. Los campamentos satélites deben estar ubicados en zonas planas de relativo fácil acceso (vía terrestre y fluvial) que a la vez cuenten con talleres de trabajo, áreas de almacenamiento y cercanía a canteras de extracción. De lo que es fácil deducir que los campamentos se ubicarán en las inmediaciones de las áreas donde la traza se acerca o cruza el río Camisea. Estos campamentos son temporales y estarán hechos de materiales fácilmente desarmables y transportables tales como contenedores, carpas y apoyados en maderas fácilmente extraíbles de los alrededores o de los árboles derribados en los trabajos de desbroce de vía. Los campamentos deberán de cumplir normas mínimas de aseo, higiene y seguridad y representarán claros y áreas de mayores dimensiones a desbrozar que el DDV. Una vez concluidas las labores de construcción, los campamentos serán desarmados y retirados en su totalidad y el área que fue usada revegetada.



## V.- Programación del desarrollo de la construcción

El siguiente cuadro es una programación propuesta para el desenvolvimiento de tareas. Las labores están estrechamente ligadas a la estacionalidad en que se realizarán. Así, las labores de transporte y movilización como las de desmovilización se realizan en épocas de creciente de los ríos, momentos en que se permite el transporte de altos tonelajes por el caudal. Las labores de construcción propiamente dichas suceden en épocas más secas, cuando hay menos posibilidades de inundaciones y el DDV es más transitable.

## VI.- Definición del derecho de vía (DDV) y áreas a desforestarse

Uno de los puntos previos más importantes en la construcción de un ducto es la definición del derecho de vía. El derecho de vía (DDV) es un corredor de trabajo en un área determinada donde las operaciones de construcción son realizadas. Este derecho de vía es teóricamente de ancho definido y constante que debe de mantenerse, por lo que su definición debe ser lo más precisa para evitar hacer ensanches posteriores durante la construcción que aumenten el espacio planificado. En el bosque tropical el ancho debe ser mantenido y minimizado en lo posible, para evitar dañar el ambiente más de lo que se está ya afectando y para establecer límites en las operaciones de construcción (no observadas por trabajadores y obreros pero necesarias para no exceder ni malgastar recursos). Puede haber ciertas excepciones cuando la operación lo justifica o inclusive la protección ambiental de un área lo hace; sin embargo las excepciones son tan pocas que el derecho de vía se mantiene en casi toda su longitud.

Para la definición del DDV en la selva tenemos que considerar que si bien  
 1) se debe de cuidar al máximo el medio ambiente para evitar mayor daño, 2)





tampoco podemos minimizar demasiado el ancho por tratar de obtener los permisos a riesgo de incurrir en incumplimientos al comprobarse que el DDV solicitado fue menos que el que realmente se necesitaba. El ancho de vía típico se repartirá para el material de desmonte que se acumula a un lado de la vía (y que después será seleccionado para el relleno), para la zanja (ubicada en uno de los costados de la vía), para los equipos de trabajo (tiendetubos, topadoras, tractores, equipos de soldado, radiografiado, etc.), las operaciones a realizarse y el transporte de personal y materiales. No debemos descartar la existencia a los costados de la vía de cunetas, diques y acequias para el control de erosión. Tomando los tamaños de tuberías, los anchos de áreas de trabajo y de desmonte, anchos referenciales promedios de DDV son:

Tamaño de tubería (mm)	Zona de trabajo (mts)	Zona para desmonte (mts)	Ancho de vía (mts)
<b>60.3 - 114.3</b>	9	7	16
<b>168.3 - 273.1</b>	10	8	18
<b>323.9 - 457</b>	14	9	23
<b>508 - 660</b>	15	10	25
<b>762 - 914</b>	15	11	26
<b>1067</b>	17	12	29
<b>1219</b>	18	13	31

Los factores que definen el ancho de vía en nuestra traza son:

- La topografía del terreno (plano en sectores iniciales, de colinas entre PK 2+300 a 8+500, 10+800 a 14+000 y 22+000 a 24+500)
- El diámetro y número de las tuberías a tender (20" – 16")
- Los métodos de construcción (equipos, zonas de trabajo, etc.)
- Restricciones medioambientales, zonas de alto impacto: cercanías de la comunidad Nativa de Segakiato PK 13+500, presencia de bosques primarios, en general zona medioambientalmente sensible.
- Restricciones sociales: zonas de tránsito - caza para nativos, cercanías de la CN de Segakiato PK 14+000.
- Tamaño de los equipos con los que se trabaja.
- Zonas de trabajo especiales: obradores y talleres de los campamentos PK 10+000 y PK 20+000, cruce del río Camisea 10+300 e instalaciones de gas en superficie PK 26+100.
- Restricciones legales: máximo ancho permitido de DDV es de 25 m. señalado en la DS 015-2006 - Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos, artículo 83, inciso c.

Extensiones o disminuciones del ancho se harán en lugares como:

- Laderas de pendiente empinadas.
- Helipuertos.
- Áreas agrícolas (por la segregación que se hace del terreno).
- Áreas de almacenamiento para equipos y tuberías.
- Áreas relacionadas con trabajos de terrenos pantanosos y cruces de ríos y arroyos.
- Vías alternas a sectores empinados del DDV (6 m. de ancho).

Extensiones importantes las tendremos en los campamentos de las progresivas PK 10+500 y PK 20+000, localizados cerca del río Camisea.

Restringiendo a un mínimo el ancho del DDV por ser área ambientalmente sensible, tenemos un ancho tentativo de 18 metros destinándose 12 m. para zona de trabajo y 6 para desmonte. Sin embargo el DDV no será la única área desforestada, debemos sumar las zonas de campamentos, rutas alternas, extensiones por trabajos de cruce de quebradas y ríos, etc. A fin de estimar con mayor precisión el área total a desforestar se hace un estimado de las longitudes y anchos:

<b>Área estimada a desforestar</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Lugar</b>	<b>Descripción</b>	<b>Superficie (HA)</b>
1	<i>Derecho de vía</i>	DDV de ancho 18 m. y 26.3 Km. de longitud	47,34
2	<i>Afectación</i>	Aproximadamente el 40% del DDV por cruces, quebradas, taludes, etc.	18,94
3	<i>Desvíos temporales</i>	Aproximadamente el 30% del DDV por pendientes, quebradas, cruces, etc. con 6 m. de ancho	4,73
4	<i>Campamentos</i>	1 Campamento principal de 4 HA y 2 satélites de 2 HA c/u	8,00
5	<i>Accesos temporales</i>	Accesos desde los ríos hacia campamentos, de ancho 4 m., longitud total 2,8 km	1,12
6	<i>Acopio de material</i>	Para unos 4500 tubos con centros de acopio en cada campamento de 1 HA c/u	3,00
7	<i>Botaderos</i>	Estimados 24 botaderos de 0,5 HA c/u	12,00
8	<i>Cruce del río Camisea</i>	Necesidad de 0,2 HA para construcción más 0,2 HA para labores anexas en cada rivera	0,80
9	<i>Cruce del río Camisea</i>	Preparación de 2 columnas de tubería de 456 m. c/u en un ancho de 15 m.	0,75
10	<i>Helipuertos</i>	5 helipuertos de 50*50 m. para transporte y evacuación de emergencia	1,25
11	<i>Contingencia</i>	5% de contingencia para todos los ítems desde el 2 hasta el 10	2,53
<b>Total</b>			<b>100,46</b>

Posteriormente luego de haber realizado el cálculo, éste será comparado con la verdadera área desforestada (una vez terminadas las labores de deforestación) la misma que se puede calcular de los anchos medidos de DDV en las planialtimetrías. El área real en lo posible no debe de superar a lo obtenido inicialmente, en caso contrario tendría que ser justificado.

## Fases de la construcción

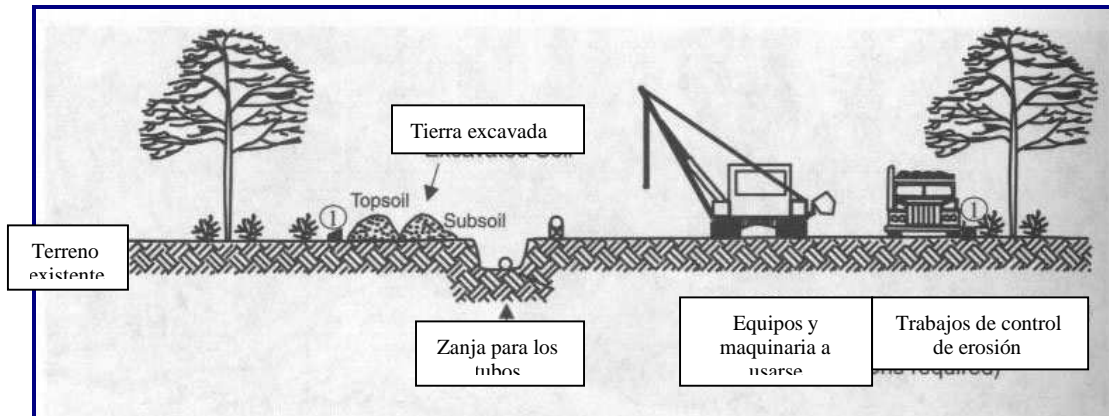
**E**n la etapa de construcción la secuencia de trabajos a realizarse será la siguiente:

- Prospección y replanteo.
- Desbroce y apertura de pista.
- Nivelación de terrenos y movimiento de tierras.
- Apertura de zanjas.
- Tendido de ductos a lo largo del derecho de vía.
- Curvado de ductos
- Soldadura.
- Pruebas de calidad de soldadura -rayos X, gammagrafía, ultrasonido, etc.- y reparación.
- Revestimiento de las soldaduras.
- Descenso de las tuberías a la zanja.
- Tapado o cubierta de las zanjas.
- Cruce del río Camisea.
- Cruces aéreos.
- Uniones y empalmes finales.
- Trampas de raspadores - limpiadores e instalaciones y accesorios.
- Limpieza de la traza.
- Control de erosión.
- Pruebas de presión.
- Barrido de agua, limpieza y secado de las tuberías.
- Instalación de protección catódica.



## I.- Prospección y replanteo:

Antes de iniciar el desbroce y apertura de pista y complementando el levantamiento topográfico, un equipo de prospección marcará los límites del DDV y observará con mayor detenimiento aquellos lugares de difícil geografía como abismos, pendientes empinadas, ríos y arroyos, para una evaluación de cómo superarlos o si es necesario efectuar algunos cambios en la traza. En nuestra traza las progresivas que requieren especial atención son:



- Zona de abismos: PK 2+950 – 8+500 zona de altas pendientes y donde el DDV se reduce por recorrer las crestas de los cerros.
- Progresivas 3+940 – 4+260: tramo de altísima pendiente en donde se desciende de 513 a 394 msnm. Requerirá un descenso en forma de serpiente con secciones horizontales y trabajos de control de erosión.
- Progresivas 13+300 – 13+950: otro tramo de alta pendiente que requerirá trabajos de control de erosión.
- Progresivas 20+100 – 24+450: zona de pendientes abruptas que requerirá trabajos de nivelación de pista para reducir las y rutas alternas para el tránsito de maquinarias, materiales y personal.

El equipo de prospección también señalará por donde transitarán los vehículos y equipos de transporte, lo que probablemente se resuelva con el uso de rutas alternas o zigzags para evitar accidentes y dificultades en el transporte, por lo tanto se tendrá que abrir nuevos caminos separados del DDV. El ancho dependerá de la pendiente y alineamiento del camino proponiéndose una media de 6 m., pensando en los equipos pesados (topadoras, tiendetubos, tractores, etc.) que los recorrerán continuamente en condiciones seguras. Para realizar el mantenimiento de los mismos serán necesarias tareas de movimiento de tierras, cubrimiento del terreno con capa de grava y control de erosión durante su tiempo de uso. Aparte, la prospección registrará las especies de flora y fauna a afectar y que especies de importancia económica o en peligro se podría perjudicar.

## **II.- Desbroce y apertura de pista (ROW clearing and grubbing)**

En una zona de selva espesa los trabajos de desbroce y apertura serán labores bastante arduas por la cantidad de terrenos y espesura a limpiar, tareas que se verán complicadas por la cantidad de taludes y pendientes que hay que cruzar así como abismos que sortear. Típicamente podemos establecer que la cuadrilla de trabajo se constituye de un capataz, un sub-capataz, operadores, obreros para el cortado de árboles y obreros auxiliares, en número variable dependiendo de la cantidad de terreno a desbrozar y la dificultad impuesta por la zona. Los equipos que se usarán en las labores incluyen topadoras “dozers” de gran peso; se realizarán trabajos mínimos y pequeños de nivelación y movimientos de tierras para habilitar lugares y posiciones donde estacionar la maquinaria pesada, combustible y equipos.

Inicialmente desbrozaremos la vegetación pequeña como arbustos para generar una mayor visibilidad del área, con la ayuda de sierras eléctricas se talarán árboles de pequeño diámetro y a continuación se escogerán los árboles de gran diámetro, los que serán talados cuidadosamente con técnica de tumbado dirigido para evitar que caigan fuera del derecho de vía. En el DDV quedarán troncos gruesos y delgados, tocones de árboles cortados y vegetación para ser removida con el uso de topadoras. La altura de los tocones sobre la superficie será la suficiente para ayudar a su desaparición con las topadoras. Específicamente en el eje de la futura zanja la altura de los tocones de cualquier árbol -grande o pequeño-, será de aproximadamente 2 pies que hará sencilla la remoción total de los mismos, quedando la franja de la zanja completamente limpia de cualquier obstrucción para las futuras labores de excavación. En el resto del DDV, dependiendo del tamaño del árbol, se procederá a remover los tocones o a dejarlos tan reducidos que no estorben el paso ni trabajos futuros.

Por ser tan abundante la vegetación, la limpieza con topadoras será sostenida y repetida en varias ocasiones para dejar pelado el DDV, el desmonte de la vegetación se acumulará a los costados y no se dejará los restos en la traza ya que estorbarán el libre tránsito, las labores de construcción y drenaje natural del terreno en los escasos 18 m. de ancho. Por lo tanto la cuadrilla de limpieza se encargará de desarmar los arbustos y troncos grandes para su posterior disposición.

Previamente a estas labores, se habrá escogido un área de desmonte fuera del DDV y del lugar de trabajo en donde se depositará todo el desmonte inservible obtenido de la limpieza. Debido a la longitud de 26 km. de la traza, lo mejor es escoger varios lugares espaciados entre si alrededor de 1 km. lo que nos daría un número de unos 24 botaderos. Aquellos troncos que puedan ser usados para otras labores como nivelación serán escogidos, separados y cortados en longitudes que faciliten su uso y apilamiento. El constructor no debe empujar el desmonte fuera de los límites del DDV autorizado y tampoco quemarlo porque originaría problemas ambientales. En zonas de abismos el desmonte no debe caer por las laderas porque puede generar derrumbes e inestabilidad adicional. Los lugares de desmonte se escogerán en zonas planas donde no se pueda generar perturbación por su acumulación

Para determinar los tiempos en un trabajo de desbroce, las siguientes tablas muestran los tiempos de trabajo con sierras manuales y eléctricas y con árboles de diversos diámetros:

<b>Horas de trabajo netas por hombre usando sierras de mano</b>				
<b>Diámetro promedio del árbol en pulg.</b>	<b>Árboles de tronco suave</b>		<b>Árboles de tronco duro</b>	
	<b>Area abierta</b>	<b>Área densa</b>	<b>Area abierta</b>	<b>Área densa</b>
<b>4</b>	1.49	1.86	1.88	2.35
<b>6</b>	2.26	2.83	2.82	3.53
<b>8</b>	3.24	4.02	4.00	4.96
<b>10</b>	4.10	5.08	5.00	6.20
<b>12</b>	4.98	6.18	6.00	7.44
<b>14</b>	6.39	7.86	7.70	9.47
<b>16</b>	7.39	9.09	8.80	10.82
<b>18</b>	8.32	10.23	9.90	12.18
<b>20</b>	10.58	12.91	12.60	15.37
<b>24</b>	12.71	15.51	15.12	18.45
<b>30</b>	17.09	20.85	20.10	24.52
<b>36</b>	20.50	25.01	24.12	29.43

<b>Horas de trabajo netas por hombre usando sierras eléctricas</b>				
<b>Diámetro promedio del árbol en pulg.</b>	<b>Árboles de tronco suave</b>		<b>Árboles de tronco duro</b>	
	<b>Área abierta</b>	<b>Área densa</b>	<b>Área abierta</b>	<b>Área densa</b>
<b>4</b>	0.37	0.46	0.47	0.59
<b>6</b>	0.57	0.71	0.71	0.89
<b>8</b>	0.81	1.00	1.00	1.24
<b>10</b>	1.03	1.28	1.25	1.55
<b>12</b>	1.25	1.55	1.50	1.86
<b>14</b>	1.60	1.97	1.93	2.37
<b>16</b>	1.85	2.28	2.20	2.71
<b>18</b>	2.08	2.56	2.48	3.05
<b>20</b>	2.65	3.23	3.15	3.84
<b>24</b>	3.18	3.88	3.78	4.61
<b>30</b>	4.28	5.22	5.03	6.14
<b>36</b>	5.13	6.26	6.03	7.36

Los tablas contabilizan el tiempo utilizado en cortar los árboles y en separarlos en longitudes o pedazos, pero no incluyen el apilamiento y transporte.

En esta etapa la inspección se encargará de supervisar y gestionar labores como:



- Límites del DDV o área de trabajo permanente son definidos claramente, marcados y deben ser respetados para que las labores de limpieza no los excedan; si es necesario se colocarán vallas.
- De haber acuerdos sobre el uso de la tierra con propietarios (Segakiato) serán formalizados antes de comenzar las labores y respetarse obligatoriamente para no generar conflictos.
- En la cercanía a los campamentos de Las Malvinas y San Martín se tendrá cuidado con las instalaciones subterráneas (agua, desagüe, etc.), que serán protegidas, tratadas manualmente y marcadas para fácil reconocimiento.
- Los drenajes naturales no serán bloqueados por los troncos y arbustos derribados, de igual forma los detritus, la tierra suelta y las ramas no serán amontonadas en los cursos de agua porque obstruirán el libre curso de la misma.
- El área limpiada será suficientemente grande para no permitir la mezcla de lo extraído en el corte de árboles y arbustos con la tierra suelta removida. El desmonte no será colocado fuera del DDV.

### **III.- Nivelación de terrenos y movimiento de tierras (DDV grading)**

Limpiado el DDV la siguiente tarea es nivelarlo. En las labores de construcción y de operación los terrenos empinados y poco estables pueden ocasionar problemas sobretodo en laderas de montes y cerros a cruzar. La ruta que siga el DDV debe ser nivelada y aplanada reduciendo la pendiente de pasos empinados, cortando laderas para crear accesos en montes, moviendo volúmenes de tierra para realzar la nivelación y el aplanamiento, cubriendo de material competente la superficie del DDV y manteniendo los cursos de agua y drenajes naturales libres para evitar problemas de erosión con los cursos de agua de lluvia.

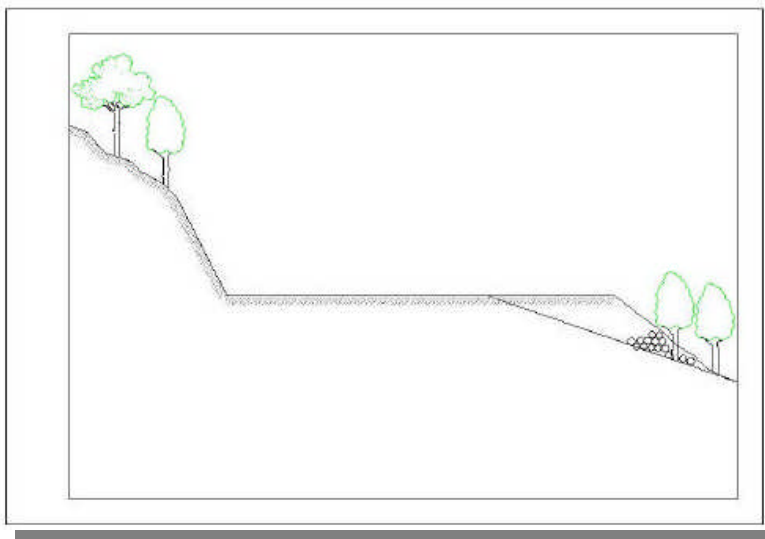
En la construcción, pendientes empinadas excesivas ocasionan problemas en el movimiento de equipos, almacenamiento de materiales y tendido, así como hacen que la tubería tenga que adoptar un doblamiento excesivo y esfuerzos a los que estaría sometida permanentemente. Aparte aumenta el número de codos con ángulos más cerrados, por lo que una buena nivelación, aplanamiento y movimiento del terreno, combinado con variaciones en las profundidades de enterramiento de la cañería ayudan a reducir los cambios abruptos de nivel.

Inicialmente se cuidará del “topsoil” o capa superficial del terreno, la que contiene los nutrientes necesarios para el crecimiento de la futura vegetación y no debe ser perturbada ni mezclada con la tierra extraída de capas subyacentes; poner atención sobretodo en áreas de terrenos de cultivo de los nativos porque se puede dañar la capacidad productiva de sus parcelas. Para una adecuada disposición, dividiremos el espacio de DDV en:

- Área de almacenamiento de la capa superficial.
- Área provisional de disposición de las tierras excavadas.
- Área para movimiento de vehículos, transporte pesado y personal.
- Área para tuberías y trabajos de zanja.

En pendientes empinadas (PK 2+300 – 8+500) las topadoras y las retroexcavadoras trabajarán para proporcionar una pendiente menor que haga más fácil el tendido, elimine futuras curvas y codos en el trayecto y mejore el contorno o relieve. El movimiento de tierras de las áreas superiores puede ser aprovechado en las inferiores para rellenar y modelar el relieve, estabilizarlo y compactarlo firmemente; lo que sobre debe ser transportado a los botaderos para que no estorbe. Los montículos de tierra serán acumulados provisionalmente a un costado del DDV, dejando sectores libres para el tránsito siendo luego adecuadamente distribuidos donde se le requiera. La idea básica es llegar al mínimo movimiento de tierras / máximo aprovechamiento de lo movilizado, para ser colocado de relleno en otro lugares.

En laderas que lo permitan, el DDV debe ser tallado como una repisa para



crear una franja de superficie de trabajo. Para proporcionar estabilidad se pueden usar los troncos de árboles cortados en el desbroce, realizando un corte en la ladera hasta un nivel o franja a partir del cual se empezará a rellenar el sector opuesto o inferior de la ladera, colocando los troncos talados que servirán

como vigas de apoyo o sostenimiento del material que rellenará y aumentará el ancho del DDV, dejándolo firmemente asentado sobre los mismos. El material que sobre de la nivelación en ningún caso será arrojado ladera abajo o a las quebradas circundantes. Es necesario cerciorarse por seguridad que el DDV quede firmemente asentado en las laderas y no vaya a ser derruido por la erosión del agua o por el uso constante como tránsito de cargas pesadas.

Un problema serio a considerar es el paso sobre crestas o líneas superiores de relieve de montes o cerros altamente disectados. Considerando la geomorfología de cerros y colinas, usualmente las laderas no son lo suficientemente estables ni de suave pendiente para el trayecto del DDV. El DDV tendrá que apoyar su trayecto en las crestas de los cerros, por ser una de las zonas de más difícil tránsito así como de mayor desafío para la construcción y el tendido. Las crestas no ofrecen mayor espacio por donde

transportar los equipos ni para la construcción por lo que el DDV se torna bastante angosto (anchos de 5 m.) y limitado por abismos. Las topadoras deben pasar inicialmente despejando la vía, para que luego las excavadoras y el equipo de trabajo formen la mayor superficie de vía por el acomodo de troncos y pequeños muros de contención a ambos lados. Acciones previsoras se planificarán para el mantenimiento de la vía ya que en las crestas, las aguas de lluvia erosionan rápidamente y destruyen la vía, teniendo que maximizarse los trabajos de control de erosión.

Para poder conservar mejor la superficie del DDV se usará de cobertura material competente, material rocoso o grava servirá para mantener el estado de la vía y contrarrestar en un cierto porcentaje la acción de las aguas de lluvia; puede extraerse producto del corte del movimiento de tierras o de las canteras a orillas del río Camisea.

Durante todas estas tareas factores que no debemos olvidar son los cursos de agua y el drenaje natural. De manera natural el agua y el terreno de la selva han creado un equilibrio, que al someterse a los movimientos de tierra es alterado y que el constructor debe restablecerlo a la brevedad. Primero se identifican los cauces de drenaje natural de las aguas de lluvia; durante la nivelación estos serán cortados el menor tiempo posible para su restauración rápida y conexión con las diferentes quebradas a lo largo de la traza. De ser imposible el no alterar permanentemente el drenaje y diques naturales, nuevos drenajes y diques serán construidos para reemplazar los anteriores y así restablecer las condiciones de flujo de agua originales. Pareciese de poca importancia, pero la erosión fluvial sin drenajes y no tratada apropiadamente pueden arruinar la estabilidad del DDV fácilmente.

La cuadrilla para la nivelación consistirá de un capataz y varios operadores, los equipos que se usarán serán cargadores frontales, tractores, arados, etc. La inspección en esta fase de trabajo supervisará y gestionará que:

- La capa superficial del terreno y tierra removida serán colocadas en un lugar escogido y no en terrenos fuera del DDV. No se mezclará con otros desechos ni se dispersará.
- La tierra no será colocada en el curso de canales. Para el cruce de arroyos y canales (PK 9+100, 17+100) se usarán puentes temporales debidamente acondicionados que soporten el peso de los vehículos. Previo a las labores de movimiento y nivelación, cualquier desacuerdo con los dueños de las tierras será allanado.
- Finalizado el movimiento y nivelación, los topógrafos supervisarán que el perfil topográfico logrado es el requerido para proceder al tendido y doblado de tuberías.
- En los lugares donde vayan a existir estaciones de medición, válvulas, lanzadores de chanchos, etc., se observará que el terreno haya sido nivelado a la cota especificada en planos.

- Los amontonamientos de tierras estarán adecuadamente restringidos al DDV evitando que se deslicen y causen accidentes desde su posición.
- Las camionetas y vehículos pesados pueden moverse por las pendientes sin peligro de deslizarse, caer o rodar cuesta abajo. En pendientes muy empinadas el operador tendrá sumo cuidado en la maniobra o se procederá a construir vías alternas.

En el cálculo de recursos a usarse en los trabajos de limpieza “clearing” y nivelación “grading” presentamos los siguientes cuadros, indicando el número de diferentes equipos involucrados para diferentes anchos de vía, en un tiempo de trabajo de 10 horas y tipo de servicio:

Descripción de equipos	Número de unidades para											
	50 pies lineales				80 pies lineales				100 pies lineales			
	L	M	MH	H	L	M	MH	H	L	M	MH	H
Tractor D8 con topadora	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3	3
Tractor D8 con topadora	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Camión para desmonte de 2 1/2 ton	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Camioneta pick up	1	1	2	2	1	2	3	3	2	3	4	4
Arado	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Para el número de personal utilizado, mostramos la siguiente tabla:

Descripción de personal	Número de personal para											
	50 pies lineales				80 pies lineales				100 pies lineales			
	L	M	MH	H	L	M	MH	H	L	M	MH	H
Capataz	1	1	2	2	1	2	3	3	2	3	4	4
Operador	1	1	2	2	1	2	3	3	2	4	5	5
Mecánico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Canales	1	1	2	2	1	2	3	3	2	4	5	5
Conductor de camión	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Obreros	10	15	20	30	15	25	30	40	20	35	40	50
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>21</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>21</b>	<b>34</b>	<b>42</b>	<b>52</b>	<b>29</b>	<b>49</b>	<b>58</b>	<b>68</b>

En ambas tablas:

L = “light”, arbustos ligeros y pasto, no árboles.

M = “médium”, arbustos más tupidos y de mayor tamaño.

MH = “medium heavy”, arbustos de buen tamaño y pequeños árboles.

H = “heavy”, arbustos y árboles de pequeño tamaño con árboles grandes que hacen la zona espesa.

#### IV.- Apertura de zanjas (ditching)

En la prospección y replanteo se definió la línea eje de la zanja, trabajando en esta línea se define un mínimo ancho y mínima altura de cobertura teniendo en cuenta el número y diámetro de las tuberías a enterrar; el número influenciará en el ancho de la zanja, y, el diámetro tanto en el ancho como en la profundidad.

Para proceder a señalar tales parámetros primero debemos definir algunos términos:

**El mínimo ancho de zanja**, es el ancho medido en un plano horizontal que pasará por el eje de la cañería ubicada en el lecho de la zanja; la dimensión dependerá del diámetro del tubo que está siendo enterrado y como estándar para una zanja de un solo tubo de tamaño intermedio el ancho estará entre las 14 y 28 pulgadas.

**La mínima cobertura** será aquella distancia que vaya desde el tope de la tubería enterrada hasta la superficie del terreno. Se deduce que para un mayor diámetro de tuberías e igual requerimiento de cobertura la zanja tendrá que ser más profunda, la dimensión de la cobertura puede variar según el proyecto y dependerá del área urbana o rural que se esté atravesando, los requerimientos de las entidades gubernamentales y los accidentes morfológicos a lo largo de la zanja. Una cobertura típicamente establecida en muchos proyectos es de 3 pies, aunque esta no es constante en toda la ruta y varía cuando la zona que atravesamos es más poblada, cuando vamos por debajo de una carretera o de un curso constante de agua; usualmente cuando vamos debajo de tales obstáculos la cobertura aumenta.

La siguiente tabla muestra anchos y coberturas mínimas. Para 2 o más tubos nos podemos guiar de la misma tabla y hacer los cálculos del ancho dejando un mínimo espaciamiento entre tuberías:

NPS	Mínimo ancho (pulg.)	Mínima cobertura normal (pulg.)
4	22	36
6	26	36
8	26	36
10	26	36
12	30	36
14	32	36
16	36	36
18	38	36
20	40	36
24	44	36
30	50	36
36	52	36
42	58	36

La zanja comienza a ser excavada una vez que su ancho y recorrido han sido totalmente definidos, la velocidad de avance dependerá de la clase de terreno al que nos estemos enfrentando. En el lote, normalmente encontramos terrenos deleznable y poco consolidados tales como arcillas, fáciles de excavar; El material extraído es normalmente colocado en el costado más estrecho del DDV y se usará como relleno de zanja debidamente seleccionado.

Las dimensiones de la zanja se basan en la tabla de arriba y las condiciones presentes en el lugar. El principio guía es que la zanja será lo suficientemente amplia y profunda para que las tuberías puedan ser tendidas sin que tomen contacto con cuerpos y objetos cuya dureza de piedras, estratos rocosos y/o terrenos duros vaya a dañarlas de alguna manera. En ciertos puntos específicos el contacto podría someter a la tubería a esfuerzos para las cuales no está diseñada y dañarla permanentemente. Para el cálculo del ancho de zanja nos valemos de los diámetros de los tubos que son de 20" y 16", el espacio dejado entre ellos es de aproximadamente 40 cm. y espacios a ambos costados entre tubos y zanja 15 cm. que impidan el contacto de las tuberías con la pared de zanja durante el descenso:

$$\text{Ancho} = 15\text{cm} + 20'' + 40\text{cm} + 16'' + 15\text{cm} = 15\text{cm} + 50.8\text{cm} + 40\text{cm} + 40.64\text{cm} + 15\text{cm}$$

$$\text{Ancho} = 161.44\text{cm}$$

Para calcular la profundidad total primero se toma la longitud mínima de cobertura, se agrega el diámetro de la tubería más grande y debajo de ésta se deja un espacio de aproximadamente 4". Este espacio de fondo puede aumentar en lugares donde se encuentre curvas pronunciadas para la cañería (cambios topográficos de nivel) y llegar a 12". Similarmente para el ancho de zanja en curvas horizontales "sidebends", habrá un espacio de 12" entre el interior de la curva de la tubería y la pared de la zanja. Tomando las 36" de mínima cobertura, las 20" del tubo más grande y las 4" por debajo del tubo, llegamos a una profundidad típica de:

$$\text{Profundidad} = 36'' + 20'' + 4'' = 60'' = 152.4\text{cm}$$

Variaremos la profundidad en cruces de quebradas que tendrán una cobertura de 1.2 m. a 1.9 m. (arroyos) o inclusive hasta 3 m. (ríos) para dar un curvado gradual a la cañería, tanto a la llegada como la salida del obstáculo. Profundizaremos también en picos de montes, donde es recomendable para obtener un más suave relieve en la cañería y graduar el ángulo agudo formado por las crestas de los cerros donde la zanja puede tener varios metros de profundidad. De haber intersecciones entre las 2 tuberías, la profundización sigue la especificación de proporcionar un espacio vertical de separación entre tubos de al menos 12" o el diámetro de la cañería más grande que se está interceptando (20"). Para espacios muy cerrados, el criterio dictará cuándo se tendrá que acercar más la intersección.

Los fondos de las zanjas serán recubiertas con tierra suelta libre de rocas que pudieran dañar la integridad mecánica de las tuberías. Esta tierra suelta cubrirá totalmente los espacios dejados entre la cañería y el fondo de la zanja y la podemos obtener de la separación de la tierra excavada con los guijarros y rocas que acompañan.

El equipo de trabajo se compondrá de un capataz, los operarios de las máquinas, los ayudantes y los obreros. La supervisión velará el:

- Correcto dimensionamiento de la zanja, incluyendo la adecuada profundización en lugares donde se requiera.
- Separación de la capa superficial de terreno del resto de terreno excavado y colocación de los detritus en un lugar de donde puedan ser transportado para su disposición.
- Adecuada estabilidad de la zanja para que no se derrumbe en terrenos fácilmente deleznable
- Excavación a mano y no con maquinaria en lugares donde se tenga conocimiento o se presuma de instalaciones subterráneas u otras cañerías.
- Alineamiento correcto de la zanja.
- Lugares por donde pueda haber libre tránsito tanto para el personal de obra como para nativos o colonos que requieran cruzar el DDV.
- Control en la disposición de los detritus fuera de cursos de agua y canales.

## **V.- Tendido de ductos a lo largo del derecho de vía (stringing)**

Después de haberse transportado las cañerías u otros accesorios hasta sus centros de acopio en los campamentos, el contratista las trasladará hasta

los diferentes frentes de trabajo cuidando de no dañarlas para no correr con el costo de reparación y reemplazo. De acuerdo a las características topográficas, el reparto en gran parte de la traza se hará por vía terrestre usando tractores portatubos (maquinaria pesada con vigas portatubos a los costados, con orugas o llantas de cocadas) al ser muy difícil maniobrar camiones por las pendientes y caminos desnivelados; los tractores son capaces de llevar hasta 4 tubos o juntas por vez. Por vía fluvial el principal centro de acopio estará en Malvinas y de ahí se puede llevar a las playas próximas al campamento de la PK 10+500.

Antes de proceder a desfilas las tuberías en la traza se revisa su estado, el deterioro de las cañerías se identifica por abolladuras, huecos, abrasiones, doblamientos y problemas de curvatura que afectan cualquier parte del tubo y muy específicamente los extremos biselados (zona de soldadura). Para evitar daño en la manipulación las cadenas y ganchos que levantan o sostiene las tuberías, deben estar forradas de goma o ser hechas de algún material resistente pero a la vez suave en el contacto con la pared externa y biseles de la tubería, como cuerdas, goma o lonas gruesas. En caso de ocurrir alguno de estos problemas la parte dañada debe ser retirada por corte y realizar un nuevo biselado a usarse en la futura soldadura, pues la tubería al estar debilitada por el daño o deformación infringida ya no podrá soportar las presiones a las que se le someterá, porque su pared no tendrá el mismo espesor de antes. Por lo que la reparación también debe evitar ciertas prácticas como el calentamiento de los puntos dañados, martilleo de las zonas dañadas, soldado de puntos dañados o reparación con el uso de parches internos o externos.

Durante el desfile nos guiaremos de las planialtimetrías donde figuran datos de la cañería a tenderse en cada tramo. En toda la traza no se colocan tubos de un mismo espesor porque en los cruces de quebradas y ríos se usan de mayor espesor como refuerzo (protección mecánica). De las quebradas que vamos a cruzar y contabilizando como longitudes tendremos la siguiente distribución de tuberías en total:

<b>Tramos de tuberías según su espesor</b>			
<b>20"</b>			
<i>Espesor</i>	<i>Lugar de tendido</i>	<i>Recorrido (m.)</i>	<i>% del total</i>
0,732"	Sectores normales de la traza	23662,39	88,64
0,804"	Cruces especiales (quebradas, ríos, secciones aéreas)	3032,1	11,36
<b>16"</b>			
<i>Espesor</i>	<i>Lugar de tendido</i>	<i>Recorrido (m.)</i>	<i>% del total</i>
0,726"	Sectores normales de la traza	23715,99	88,92
0,859"	Cruces especiales (quebradas, ríos, secciones aéreas)	2955,89	11,08



Durante el desfile deben evitarse que tuberías de 2 o más fabricantes se mezclen. Teóricamente no deberían ocurrir problemas en este punto, pero es mejor separar las cañerías de un fabricante con respecto a otro.

Las tuberías se alinean a lo largo del DDV a un costado de la zanja. Para evitar que se puedan deteriorar por contacto con aguas de lluvia, suelo húmedo, que tierra o algún otro desperdicio se acumule dentro del tubo mientras no sea soldado, éstos descansan sobre sacos de tierra apoyados en vigas de madera; los tubos serán alineados o desfilados formando un pequeño ángulo de separación entre ellos que permita a la cuadrilla de soldadura revisar el estado de los biseles, las longitudes de tendido son calculadas para no dejar espacios entre frentes de tendido que tendrían que ser completados con pedazos de tubos de menor longitud que el estándar (12 m.). Para lugares como ríos, pendientes empinadas o quebradas, las tuberías serán acomodadas en puntos de acopio estables y cercanos, en cantidad suficiente calculada de las planialtimetrías o de manera práctica para cubrir el espacio a cruzar. El desfile debe ser hecho respetando un espacio por el cual puedan transportarse las provisiones y materiales así como el personal sin correr riesgos.

En resumen, el transporte de tubos y su adecuado alineamiento necesitará de equipos como grúas, tiendetubos y portatubos. El personal involucrado serán operadores, obreros, capataz y conductores de la maquinaria pesada. La inspección revisará que:

- La manipulación de las tuberías impida daño a la pared, cobertura protectora y biseles. Cualquier daño será marcado para ser reparado.
- Sea correcta la distribución - alineación de las tuberías, dependiendo de su espesor y grado en las planialtimetrías.
- La tubería no sea colocada sobre el terreno o arrastrada.
- Los lugares donde la tubería se apila sean seguros y estables.
- Los ganchos usados para maniobrar en los extremos de la tubería estén forrados o sean de un material suave para no dañar la tubería y sus biselados.
- De tramo en tramo sean dejados espacios pequeños para permitir el paso a través del DDV.

## **VI.- Doblado de tubos**

Para superar cambios de altitud u obstáculos se recurre al doblado de tubos mediante curvas tanto horizontales, verticales y combinadas; con tal fin se usan máquinas de doblado de tubos en frío que permiten obtener el ángulo deseado y son muy versátiles en campo. Para cambios más pronunciados donde no se pueda adaptar el contorno del terreno por nivelación al máximo doblado permitido, las curvas tendrán que ser elaboradas en taller.

En ciertos casos, cuando los cambios de nivel o dirección son bastante ligeros se puede permitir que la tubería misma se vaya adaptando a la forma de la zanja que la va a contener. Las tuberías tienen una longitud relativamente larga (40 pies) y pueden curvarse ligeramente hacia los lados de la zanja, pero siempre limitado a pequeños ángulos dependiendo mucho del diámetro y espesor de pared de la tubería.

Primero se evalúa si el lugar donde se va a colocar la curva es un terreno firme en que la zanja se pueda mantener sin derrumbarse. Si es así, se excava la zanja a las dimensiones que se requiera y luego se realiza la labor de doblado a la medida de la zanja excavada. En caso que el terreno sea inestable se procederá a la inversa, primero el doblado, soldado y recubrimiento de las curvas para luego adaptar la zanja a la curva fabricada.

Las medidas del doblado las proporcionará el topógrafo, quién en el lugar confirmará y dará las medidas de la curva requerida con las que se determinará cuales serán las longitudes de las juntas a doblar y su ubicación, junto con una señalización de los lugares del terreno donde irán colocadas. Los tipos de curva son: curva vertical hacia arriba “sag”, curva vertical hacia abajo “overbend”, curva horizontal “sidebend” y combinaciones que en conjunto servirán para superar el cambio de nivel o dirección. Durante el descenso de la curva en zanja los supervisores deben asegurarse que esté uniformemente acomodada sobre el colchón de fondo de la zanja, por ejemplo: en “sag”, la tubería debe descansar sobre su sección convexa en contacto con el terreno, mientras que en “overbend” debe descansar en posición cóncava.

El doblado de tubos estará sujeto a ciertas normas técnicas para evitar sobredobleces y debilitamientos por hundimiento de uno de los lados en la curva o someter a esfuerzos excesivos a la pared del tubo:

- No se permite el hacer doblado de tubos usando calor. La forma más confiable es en frío porque el doblado en calor debilita las propiedades mecánicas del tubo, alterándolo permanentemente y haciendo peligroso el tenerlo como parte del ducto. Asimismo el tubo no debe de sufrir en el proceso alteraciones en su diámetro.
- Usualmente las tuberías son fabricadas por soldadura continua, longitudinal y paralela al eje de las mismas. La costura no debe ser afectada en el proceso de doblado, por lo que debe ser colocada en una posición neutral, la cual se ubica perpendicularmente al radio de curvado. Para curvas de tipo vertical la costura estará a un lado, para las horizontales cerca del tope; en el caso de una combinación de curvas se colocará la costura en el cuadrante superior.
- Controlando el grado de curvado de las cañerías en función de su diámetro, ninguna cañería será curvada más allá de 1.5° para un arco que tenga una longitud igual al DE de la cañería en proceso; la curvatura debe estar bien distribuida a lo largo del arco para evitar acumulación de esfuerzos en ciertas secciones más que en otras. Como mínimo, debe de

haber 3 pies de tangencia hacia ambos extremos de la cañería y la sección curvada debe de permitir el paso de un limpiatubos o chanco de dimensiones estándar para la cañería.

- Luego el doblado se evalúa en su calidad, en caso se compruebe mediante inspección visual que la tubería ha sido deformada más allá del límite, así como aplastada y presenta líneas de doblez o sólo puede ser colocada en la zanja forzándola sin respetar los espacios mínimos de cobertura ni separación de fondo y costados, entonces será desechada.

Para realizar la operación se usa la máquina de doblado de tubos hidráulica “hydraulic bending machine” junto con un mandril interno. Con ayuda de los tiendetubos se levanta el tubo elegido a la altura de la máquina de doblado, se inserta el tubo por fuera del mandril, se sostiene los extremos de la futura curva con abrazaderas hidráulicas (las áreas en contacto deben estar forradas o el tubo protegido), se selecciona e inserta el grado de la curva que se requiere y se inicia el doblado (en frío estirando y forzando lenta y constantemente al tubo para que adquiera la forma deseada) de forma continua y gradual a una velocidad constante de doblado. Luego de haber terminado el doblado se libera la presión de las abrazaderas, se retira la curva y se introduce una nueva sección o se continúa con otra sección recta del mismo tubo.

La cuadrilla de trabajo estará a cargo de un experto en doblado de tubos, operadores del mandril, capataz, topógrafos que tomen las medidas, otros operadores y obreros. Los equipos usados son los tiendetubos para elevación del tubo y máquina de doblado con mandril y fijadores. La inspección estará atenta a que:

- La tubería sea doblada de tal manera que su integridad y recubrimiento no sean afectadas.
- Se respete que la máxima curvatura de 1.5 grados por longitud lineal de arco igual al DE no sea excedida.
- Las curvas sean lisas y estén libres de arrugas, abolladuras y puntos planos; la máxima diferencia entre máximo y mínimo diámetro no excederá el 5% del diámetro nominal del tubo, en inglés “nominal pipe size” o “NPS”.
- En los extremos la tubería no será curvada. Algunas especificaciones mencionan un límite de 6 pies y otros de 3 pies, pero por lo menos debe de haber una longitud recta de un DE hacia los extremos de unión con otro tubo que impida ovalamiento en los extremos de la junta en proceso de doblado.
- Las soldaduras de fabricación de cañerías estén colocadas en un eje neutral de esfuerzos o en el que el menor esfuerzo sea generado.

## **VII.- Soldadura (welding)**

El proceso de soldadura involucra la labor más grande, importante y central de toda la construcción de los ductos. El éxito de un ducto bien construido se resume bastante en esta actividad que significará el acoplamiento de varios cuerpos de tubería para crear una continuidad sin fugas.

Para el control de calidad en soldadura de tuberías para transporte de hidrocarburos, el estándar más difundido es la norma API 1104, norma referida a todos los tópicos de soldadura de tubos. Los tres tópicos principales de inspección en soldadura como homologación de soldadores, calificación de procedimientos de soldadura y evaluación de la calidad son tratados por esta norma. Aunque podemos evaluar la soldadura estableciendo estándares particulares más rigurosos, el punto de partida es siempre el API 1104

Como requerimientos generales del trabajo de soldadura podemos enumerar los siguientes:

- La reparación de tuberías antes y después del proceso de soldadura será evaluada y supervisada, los defectos de soldadura a ser reparados serán aprobados por la supervisión para ejecutarse. Los defectos en la tubería tales como aplastamientos y abolladuras no son arreglados en base a martilleo, cobertura interna o aplicación de calor; otros defectos como laminaciones o extremos de tubería cortados serán cortados y maquinados.
- Los electrodos de soldadura usados tendrán que ser evaluados y aceptados por la supervisión.
- Se establece un rango de amperaje para el trabajo de soldado, rango que esta basado en lo establecido por el fabricante de electrodos de soldadura o por el procedimiento de soldadura.
- Tanto el proceso de soldadura así como la soldadura producida serán evaluados completamente, primero visual y luego mediante radiografías (medio usual) u otros métodos. Sin embargo, si la inspección requiere una más profunda evaluación o no está satisfecha con el método evaluativo se debe seguir evaluando hasta comprobar que la soldadura tenga una adecuada calidad y haya sido realizada bajo condiciones óptimas de trabajo.

Los soldadores deben tener un adecuado entrenamiento y haber pasado diferentes pruebas que certifiquen su rendimiento según los procedimientos de soldadura aplicados al proyecto:

- Sólo aquellos soldadores que hayan pasados las pruebas estarán calificados para soldar y sus certificados deben ser entregados como parte de la documentación del constructor a la operadora. De preferencia

algún representante de la supervisión presenciará las pruebas de evaluación de los futuros soldadores.

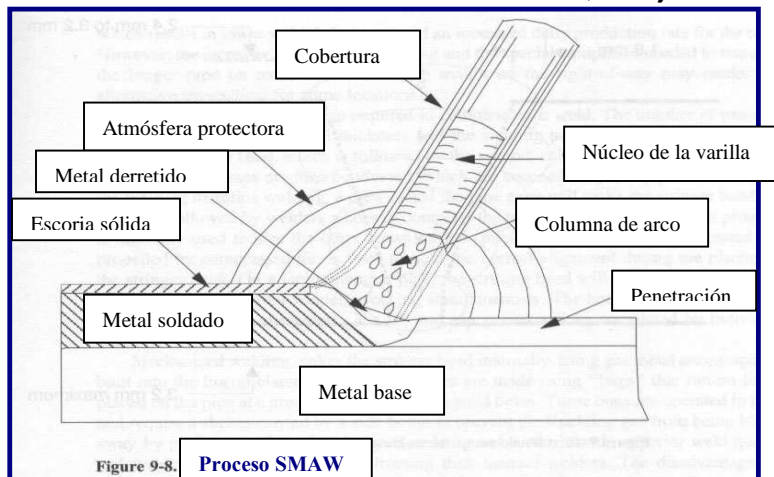
- Durante todo el proyecto la capacidad de los soldadores será evaluada, tanto en la calidad de la soldadura depositada como en el respeto de los parámetros de trabajo, es decir: adecuada posición del soldador, de los electrodos, velocidad de pasada del electrodo, limpieza y seguimiento de normas de seguridad.

Antes de comenzar las labores los equipos y materiales usados serán evaluados para asegurar su buena condición y óptimo estado, así:

- Los equipos y materiales que no estén en adecuadas condiciones para iniciar las labores serán o reparados o cambiados. Luego de cambiados serán nuevamente puestos a evaluación para mostrar que se encuentran en óptimo estado.
- Se pondrá especial atención el estado en que se preservan los electrodos de soldadura, dado que conforman el metal de aporte y material de protección durante la soldadura y no deben presentar deterioro. Debido a la humedad de la selva deben estar en un almacén o área fresca, fuera del contacto con agua o algún otro medio de contaminación que incida a su deterioro mecánico o al de la caja que los contiene. En caso de encontrarse electrodos defectuosos o cajas en mal estado se rechazará su uso y procederá al reemplazo con nuevos electrodo en buen estado.

La supervisión también debe estar segura de que las condiciones de trabajo serán adecuadas para una labor óptima. Mucho influyen las condiciones ambientales en la calidad de la soldadura, el viento que acarrea detritus, arena y polvo y que pueden contaminar el metal de aporte en estado fundido o disipar los gases de protección de la soldadura en ese estado, dejándola químicamente expuesta al aire y sus componentes (oxígeno principalmente). Por lo tanto la presencia de fuertes vientos en el área de soldado hace que se suspenda el trabajo, que se use protectores contra el viento como carpas. Aparte del viento otro enemigo es el altísimo contenido de humedad,

la misma que se adhiere a la tubería y tiene que ser removida con un adecuado precalentamiento. La humedad actúa como un agente que afecta la calidad de la soldadura, pero es invisible y por lo tanto puede pasar fácilmente inadvertida.



Por las características descritas en el ambiente de trabajo, los procesos de soldadura a aplicar deben de soportar vientos al aire libre con presencia de polvo y a la vez ser muy versátiles para soldar en toda posición (horizontal, vertical, de cabeza), asegurando una producción continua de 20 soldaduras por día por cada tubo con el uso de equipos pequeños. Tales características las reúnen los procesos “SMAW” y “FCAW”. “SMAW” es un proceso estándar de amplio uso y de probada eficiencia en trabajos de unión de tubos adaptándose a todas las posiciones de trabajo, por lo que se le usará como base. “FCAW” queda como proceso auxiliar sobretodo para pasadas de raíz por su gran calidad de deposición y control de la suavidad y uniformidad que se necesita en la primera pasada. Los parámetros de trabajo quedarán bien establecidos en las especificaciones de soldadura y los datos que se enlistan normalmente son:

1. Procesos de soldadura: cuántos y cuáles se usarán, dependerá del cordón de soldadura que se está realizando.
2. Material base: el material base de las cañerías para el que se aplica la especificación (ej. API 5L Gr. X-70).
3. Diámetro: “NPS” o DE de las cañerías para las que se aplica la especificación.
4. Espesor de la cañería a emplearse.
5. Diseño de junta: indica la geometría de la junta a soldar con un esquema de la misma con las distancias y ángulos.
6. Metal de aporte: clase del metal de aporte, número de cordones o pasadas en la soldadura, etc.
7. Características eléctricas: corriente alterna o continua, rango de tensión (V), rango de corriente (A), polaridad CC +/-.
8. Posición del caño: fijo, horizontal, vertical, según corresponda.
9. Progresión de la soldadura: ascendente o descendente, en otros casos se indica en dirección del reloj o en contra.
10. Número de soldadores: son la cantidad de soldadores que deben participar en la ejecución de cada cordón de soldadura.
11. Tiempos de espera entre pasadas: son los tiempos máximos que se puede esperar entre cada cordón de soldadura.
12. Tipo de alineador: normalmente el más usado es interno y neumático “CLAM”, que permite facilidad de maniobra para tuberías pesadas, pero en empalmes se usarán alineadores externos o grapas. Con el uso de “CLAM” se logra una mayor rapidez en la maniobra, pero está restringido a  $\varnothing > 14$ ”.
13. Remoción del alineador: después de que tiempo se removerá el alineador.

14. Limpieza: qué métodos pueden usarse en la limpieza de los cordones de soldadura (dependiendo del proceso) antes de continuar con el que va encima (disco abrasivo, cepillo, etc.)
15. Precalentamiento - alivio de tensiones: la forma por la que se realizará el precalentamiento y temperaturas límites (máximas y mínimas) que se usarán para tal fin.
16. Variables de soldadura: son una serie de parámetros con los que se trabajará y serán respetados. Tales variables son clases de pasadas, número de cordones, diámetros de los cordones, procesos de soldadura que se usarán (uno o más), parámetros eléctricos, velocidades de alimentación del alambre (si corresponde por el método), avance de velocidad del electrodo o alambre por parte del soldador, etc.
17. Otras características: dependiendo de qué proceso de soldadura se está usando, si es un proceso con protección de gas, que tipo de gas y boquillas se usan, si es con fundente protector cual es, etc.
18. Observaciones: son anotaciones especiales que no se mencionan con anterioridad en las características enumeradas.
19. Gráficos: muestran la distribución de cordones, separación de tubos, número de cordones, espesores, etc.

Las especificaciones de soldadura basarán sus parámetros en las mejores prácticas y experiencias reflejadas en los códigos API 1104, ASME B31.8 (para tuberías de gas) o ASME B31.4 (para transporte de hidrocarburos líquidos). Las especificaciones se dan para todos los diámetros y clases de tuberías involucradas en el proyecto y todos sus procedimientos, estarán apoyados en registros de calificación con procedimientos de soldadura, que son documentos que enumeran las características citadas en el procedimiento y los resultados de las pruebas hechas a probetas soldadas con base en los procedimientos. Las pruebas que normalmente se hacen son inspecciones visuales, radiográficas, y las destructivas como, de tensión, de doblez lateral, de ensayo de doblez (quiebre), etc.; que demuestran que la soldadura soporta los límites de tensión, doblado y quiebre a las que estarán sometidas en su vida operativa.

5.3.2.1	Proceso (s) de soldadura: .....	<b>SMAW</b>
5.3.2.2	Material base:.....	<b>CAÑO API 5L Gr. X70</b>
5.3.2.3	Diámetro nominal de la cañería: .....	<b>16" a 24"</b>
5.3.2.3	Espesor de la cañería: .....	<b>ESPEORES MAYORES A 19,1 mm</b>
5.3.2.4	Diseño de junta: .....	<b>A TOPE EN "V" DE ACUERDO A ESQUEMA HOJA 2</b>
5.3.2.5	Metal de aporte: 1) raíz: .....	<b>E8010-G - AWS A5.5 - GRUPO 2 DE TABLA 1</b>
	y N° de cordones 2) caliente: .....	<b>E9010-G - AWS A5.5 - GRUPO 2 DE TABLA 1</b>
	3) relleno: .....	<b>E9010-G - AWS A5.5 - GRUPO 2 DE TABLA 1</b>
5.3.2.6	Características eléctricas: .....	<b>CORRIENTE CONTÍNUA. (VER HOJA 2)</b>
5.3.2.7	Características de la llama:.....	<b>N.A.</b>
5.3.2.8	Posición: .....	<b>CAÑO EN POSICIÓN HORIZONTAL - FIJO</b>
5.3.2.9	Progresión de la soldadura: .....	<b>DESCENDENTE</b>
	N° de soldadores: .....	<b>DOS O TRES EN LA PRIMERA – DOS EN LAS RESTANTES</b>
5.3.2.10	Tiempo máx. entre 1ª y 2ª pasada: .....	<b>10 MINUTOS</b>
	Tiempo entre 2ª pasada y restantes:.....	<b>15 MINUTOS MÁXIMO</b>
5.3.2.11	Tipo de alineador: .....	<b>INTERNO - NEUMÁTICO</b>
5.3.2.11	Remoción del alineador: .....	<b>LUEGO DE COMPLETADA EL 100 % DE LA PRIMERA PASADA</b>
5.3.2.12	Limpieza: .....	<b>DISCO ABRASIVO Y/O CEPILLO ROTATIVO</b>
5.3.2.13	Precaentamiento / alivio de tensiones:....	<b>120 °C MÍNIMO(1). MÉTODO: SOPLETES O SOPLÓN</b> <b>MÁXIMA TEMPERATURA ENTREPASADAS: 200 °C</b>
5.3.2.14	Gas protector (tipo y caudal):.....	<b>N.A.</b>
5.3.2.15	Fundente protector: .....	<b>N.A.</b>
5.3.2.16	Velocidad de avance: .....	<b>VER VARIABLES DE SOLDADURA EN HOJA N° 2</b>
	Gas de plasma (tipo y caudal):.....	<b>N.A.</b>
	Diámetro del orificio del gas de plasma:..	<b>N.A.</b>
	Esquemas y tablas: .....	<b>VER HOJA N° 2</b>
	Observaciones: .....	<b>(1) REALIZADAS LAS DOS PRIMERAS PASADAS MANTENER LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO A 100 °C MÍNIMO HASTA TERMINAR LA JUNTA. NO SUSPENDER LA SOLDADURA HASTA COMPLETAR AL MENOS EL 70 % DEL ESPESOR. AL RETOMAR CALENTAR LA JUNTA A LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO.</b>

<b>ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b>	Welding of Pipelines and Related Facilities <b>API STANDARD 1104 - 99</b>
--	--

**Diseño de la unión**

**Secuencia de pasadas**

VARIABLES DE SOLDADURA				
Espesor	Cordón N°			
T: 19,1 mm. a 25,1 mm	1	2		
PASADA	<b>RAIZ</b>	<b>CALIENTE</b>	<b>RELLENO</b>	<b>COBERTURA</b>
N° CORDONES	1	1	15 MÍNIMO	
PROCESO	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>
CLASIF. AWS	<b>E8010-G</b>	<b>E9010-G</b>	<b>E9010-G</b>	<b>E9010-G</b>
DIAMETRO (mm)	4,0	5,0	5,0	5,0
CORRIENTE (A)	<b>110 - 145</b>	<b>170 - 210</b>	<b>160 - 190</b>	<b>140 - 180</b>
VELOCIDAD DE ALIM. ALAMBRE (in/min)	—	—	—	—
TENSIÓN (V)	<b>24 - 32</b>	<b>24 - 32</b>	<b>24 - 32</b>	<b>24 - 32</b>
AVANCE (cm/min)	<b>25 - 40</b>	<b>25 - 38</b>	<b>20 - 35</b>	<b>20 - 35</b>
POLARIDAD CC (+/-)	(-)	(+)	(+)	(+)
PROGRESIÓN	<b>Descendente</b>	<b>Descendente</b>	<b>Descendente</b>	<b>Descendente</b>

ANTES DE COMENZAR A SOLDAR LIMPIAR BIEN TODO RESTO DE ÓXIDO, CASCARILA, PINTURA, REVESTIMIENTO, ACEITE, ETC



Durante la soldadura, para asegurar la calidad de la operación se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para tuberías fabricadas a partir de costura longitudinal, las costuras deben quedar ubicadas en el cuadrante superior del tubo y no deben quedar alineadas formando una línea continua que recorra todo el ducto, sino estar desfasadas al menos unos 20 grados una con respecto a la siguiente.
- Es de suma importancia contar con los biseles o bordes de soldaduras perfectamente limpios y libres de tierra, grasa o algún otro resto que pudiera contaminar el metal de aporte. Del procedimiento de soldadura tomaremos la separación, tolerancias y geometría definida en el espacio de soldadura. Se logrará un alineamiento concéntrico con la ayuda de abrazaderas internas que impedirán una excesiva expansión de la tubería; si hay problemas con el alineamiento podemos ayudar a que las juntas se alineen definitivamente con un ligero martilleo, sin exagerar ni deformar los extremos. Si se llegase a detectar deformación por exagerado martilleo los tubos tendrán que ser reemplazados por secciones no deformadas.
- El precalentamiento de los extremos de la tubería es esencial para darles la temperatura necesaria previa a la soldadura, la temperatura dependerá del método y será especificada en los procedimientos de soldadura, aplicándose hacia una distancia de al menos un diámetro desde los bordes biselados. Para revisar la temperatura se usarán termocuplas o algún otro medio de medición que constate el haberla alcanzado y que sea mantenida durante toda la soldadura. El precalentamiento se aplica a todos los grados de tuberías.
- Durante la soldadura, un tiempo límite entre cada pasada queda establecido especialmente luego que el primer cordón ha sido terminado. Se limpiará cada cordón terminado con el uso de cepillos o por suave martilleo, se debe respetar el número de pasadas o cordones a colocarse en el círculo de soldadura, no olvidando que un menor número es una disminución del espesor y una reducción en propiedades mecánicas y de resistencia, ya que en caso haber algún tipo de fallas no detectadas el incremento de espesor de soldadura ayudará como un reforzamiento. Dentro de las posible fallas que se pueden encontrar a simple vista durante o luego de terminada la soldadura están las roturas o pequeñas fracturas de superficie, pues siempre van a existir pero no deben de exceder en cantidad ni tampoco en longitud que comprometa gran parte del cordón de soldadura. Si se detectan grandes fracturas la reparación queda desechada siendo la única solución proceder al corte y separación de una sección cilíndrica completa. Si la soldadura no parece tener mayores defectos aguardará la evaluación que mostrará con mayor exactitud su calidad, mientras tanto será limpiada de escorias y cualquier otro componente que muestre en su superficie como preparación para el recubrimiento.

Cuando se tiene que soldar 2 tuberías con diámetros internos distintos, se plantea un nuevo problema debido a la manera en que interactúan las tuberías cuando se ven sometidas a esfuerzos longitudinales. Tales transiciones las veremos en las cercanías a arroyos y cruces de quebradas por el requerimiento de tener una tubería de mayor espesor o también en soldaduras de tubería-accesorios (válvulas, bridas, etc.). En tales casos:

- Si la diferencia de espesores no excede los 3/16" (4.7mm) se procede a la soldadura normal porque los esfuerzos a producirse son mínimos y se buscará colocar las tuberías en perfecto alineamiento concéntrico.
- Si la diferencia es mayor se debe usar transiciones especiales prefabricadas, donde la sección a usarse cumplirá las especificaciones de medida estándares para la transición. También se puede adaptar el tubo para que adquiera internamente una forma deseada que sirva como transición (biselado interno, ahuecamiento y transición a ensanche), pero tales adaptaciones deben ser hechas en taller cumpliendo medidas específicas y no en campo donde no hay facilidades de preparación.

Calculando la diferencia de espesores de los tubos de 20" y 16":

**20" - Diferencia de espesores: 0.804" - 0.732" = 0.072" < 3/16"**

**16" - Diferencia de espesores: 0.859" - 0.726" = 0.133" < 3/16"**

En ambos casos se calcula una diferencia de espesores menor que el límite establecido, por lo tanto se puede proceder a una soldadura normal sin el uso de transiciones.

Durante las primeras labores de soldadura con fines de pruebas, secciones soldadas pueden ser cortadas para probar la calidad del trabajo mediante pruebas destructivas. En tal caso, diversas secciones de soldadura, cada una identificando el trabajo de un soldador se cortarán para probarlas. Luego que los cortes han sido realizados se verá la posibilidad de jalar las secciones separadas para reunir el ducto, si esto no es posible, el cilindro de prueba cortado será de suficiente longitud como para permitir su reemplazo por otra sección de tubería del mismo material y especificaciones, con longitud de al menos 3 veces el diámetro nominal y permitir las 2 soldaduras que subsanen el corte.

Inspeccionado el estado de las tuberías podemos encontrarlas con ciertos defectos como cortes en los biselos, pequeñas fracturas o biselos doblados por mala manipulación que imposibiliten el alineado. La única solución es proceder al corte y rebiselado o maquinado para obtener nuevamente las dimensiones de bisel especificado (no se permite hacer los cortes a mano, no aseguran las adecuadas dimensiones). Durante la soldadura pueden producirse puntos de quemadura en la superficie del tubo por contactos con el circuito de soldadura, los puntos de quemadura son en los que el tubo ha adquirido un defecto que es irreparable por lo que debe ser eliminado y cortado definitivamente, procediendo como en el anterior caso.

Para mantener la limpieza en el trabajo, los restos de electrodos de soldadura y escoria serán colocados en bolsas de limpieza para no dejar rastros en el DDV o en la zanja. Las secciones abiertas de tubería tendida o soldada son tapadas al concluir la jornada laboral para evitar la intrusión de cuerpos extraños y sobre todo de agua, la que almacenada dentro de la tubería sin un adecuado tratamiento químico puede resultar corrosiva.

La cuadrilla de trabajo incluirá un capataz general para todas las labores, un capataz especializado en soldadura, sub capataces, soldadores capacitados cada uno en una o varias clases de procedimientos de soldadura, soldadores para labores de reparación, ayudantes de soldadores, operarios de abrazaderas, obreros y operadores de equipos de apoyo. La maquinaria a usarse son tiendetubos, abrazaderas internas y externas más repuestos y tractores

El inspector de soldadura tendrá múltiples funciones y tareas:

*Para la soldadura:*

- Conducir las pruebas de calificación de soldadores
- Verificar la calificación de cada operador de pruebas radiográficas de soldaduras.
- Antes de iniciar las operaciones verificará las condiciones de los equipos constatando su estado óptimo.
- Inspeccionar las condiciones de los productos consumibles (electrodos) antes de iniciar labores.
- Asegurarse que el trabajo sea realizado de acuerdo a las especificaciones de soldadura y condiciones de contrato establecidas por el cliente (revisar amperajes, velocidad de recorrido de electrodos, voltaje, etc.).
- Asegurarse que el número de soldadores y frente (progresiva de avance) sigan un adecuado y esperado progreso de labores.
- Distinguir si es que algún soldador es responsable por un número considerable de reparaciones en las soldaduras que ha elaborado.

*Para los materiales usados:*

- Cada una de las tuberías debe ser cuidadosamente inspeccionada con el fin de encontrar algún defecto como roturas, laminaciones, abolladuras, ranuras y huecos.
- En los bordes biselados podemos encontrar traslapes, costuras e incrustaciones. En caso que se encuentren en la cara de raíz (la parte que limitará el cordón de raíz), ésta será refilada o amolada hasta lograr sus originales dimensiones. El área a refilar no deberá superar el 1/32" en

espesor y los  $\frac{3}{4}$ " en longitud y las dimensiones cumplirán con los requerimientos enlistados en las especificaciones.

- Si se identifica una tubería conteniendo en exceso los defectos antes citados no será acoplada. Si se detectan los defectos luego de la soldadura, se le removerá como un cilindro cortado del ducto.
- Antes de acoplar una junta al ducto debe asegurarse que por dentro se encuentra limpia y libre de detritus y materiales extraños.
- Si se usan materiales y tubería de diferente grado y dimensiones se registrará el lugar donde están siendo acoplados al ducto de acuerdo a los planos aprobados.
- Mantener cerrados los extremos abiertos de tubería cuando paren las labores o cuando no se esté trabajando.

### **VIII.- Pruebas de calidad de soldadura (radiografía, gammagrafía) y reparación (quality testing)**

Como en todo trabajo la soldadura debe ser evaluada en su calidad para corrección de defectos, recurriendo a métodos de prueba no destructivos in situ como la radiografía que es el más usado. Dependiendo del área donde se trabaje y del fluido transportado la evaluación radiográfica se aplicará en un porcentaje variable de soldaduras. Por el transporte de gas a altas presiones en un área de significativo impacto ambiental y para constatar la continuidad en el transporte del gas, se justifica radiografiar el 100% de las soldaduras para constatar su solidez y calidad y que durarán tanto o más que la vida operativa del proyecto.

La radiografía usa fuentes de radiación bastante peligrosas para la salud de las personas por lo que las medidas de seguridad deben ser altas, pero deben seguir al ritmo de producción de soldaduras para impedir retrasos, sin dejar de cumplir con altos estándares de calidad y precisión. Se estiman 3 frentes de trabajo en línea regular, 2 frentes en reparación y 1 en cruces especiales y empalmes. Al tener tubos de DE > 14" y en zonas de poca pendiente podemos usar equipos de inspección interna Crawler, pero en las pendientes de más de 45° se usarán equipos externos manuales por la dificultad del equipo interno en superar pendientes. Por la lejanía del proyecto la longitud de tramos a evaluar y la necesidad de disponibilidad permanente, los equipos serán portátiles, transportados por vía fluvial y permanecerán todo el tiempo que se les necesite hasta terminar la construcción y aseguramiento de calidad de las soldaduras.

Las fuentes de radiación generan ondas electromagnéticas como los rayos X y gamma que atraviesan los objetos sin dañarlos, permitiendo sensibilizar una placa fotográfica colocada adecuadamente para dejar un registro fotográfico. Se necesita una cierta cantidad promedio de actividad de la fuente que permita dejar registro del interior de la soldadura (huecos, discontinuidades, etc.), ni muy baja que sea poco dañina pero no registre las

fallas, ni muy alta que exponga al personal y vele la película. Para esto se usan fuentes de diversos radioisótopos dependiendo de la cantidad de energía que se requiera, el material y el espesor de soldadura a evaluar. El radioisótopo más usado para soldaduras de línea es el iridio 192 (Ir 192) de energía promedio, con tiempo de vida de 74 días que evalúa soldaduras entre 10 mm. a 70 mm. de espesor.

Las calificaciones del personal y de los equipos para este trabajo son:

*Del personal:*

- Habiendo tres niveles de calificación para identificar a un evaluador de radiografías, al menos uno de los evaluadores en cada unidad de radiografiado disponible en campo deberá tener un nivel II o III. Las calificaciones de cada evaluador junto con una descripción de su experiencia laboral y entrenamiento quedan a consideración de la inspección (API 1104).
- Los evaluadores con el más alto nivel son los responsables de la calidad de trabajo así como de la seguridad y salud del personal en cada una de sus unidades portátiles o laboratorios, es decir la protección adecuada y el monitoreo constante de la exposición a la radiación a que esté sometido cada individuo. La protección y evaluación de la exposición van de acuerdo a las normas establecidas por el ente regulador en trabajos con material radiactivo, en este caso el IPEN (IPEN IR.002.01).

*De los equipos:*

- Un equipo alterno completo y operativo será mantenido en reserva.
- El equipo en uso debe estar en buen estado y listo para ser usado sin inconvenientes.
- Las luces usadas para la evaluación de las películas reveladas tendrán siempre una protección de vidrio absorbente de calor para las películas. Aquellos visores de punto caliente o los de luz brillante no son aceptados.
- El almacenamiento de las películas impedirá su contacto permanente con la niebla, la humedad y la exposición directa a fuentes de calor, luz solar o artificial y radiación.
- Para proceder a la producción en gran escala de radiografías que detallen la calidad de las soldaduras elaboradas, son necesarios cuartos oscuros y el equipo típico dentro de los mismos.
- Las películas serán iluminadas adecuadamente para impedir la formación de “niebla de revelado”, almacenadas limpias y en buen estado.

- Las pantallas usadas en la evaluación de las radiografías estarán limpias y libres de roturas y rayaduras que impidan una adecuada visualización.
- Todos los equipos que no cumplan con los requisitos de seguridad requeridos serán retirados y/o reemplazados para cumplir el trabajo a tiempo y con la calidad esperada.

Como una lista ilustrativa de los equipos que se usan:

#### *Equipo De Línea Regular*

- 6 equipos internos Crawler más una fuente de 50 curies como mínimo (para operación y reserva).
- 6 equipos externos con fuentes de 50 curies como mínimo (para operación y reserva)
- Camionetas pick-up / todo terreno para transporte de equipos.
- Un típico equipo de inspección interna o Crawler se compondrá de:
  - a) Un contenedor de plomo con la fuente de Ir 192.
  - b) Una unidad de comando con fuente Cs 137.
  - c) Un carrito con batería recargable que viaje dentro del ducto.
  - d) Un gamma lux.
  - e) Un medidor de radiación Geiger - Muller.
  - f) Un dosímetro de película y uno de lapicero para c/operario.
  - g) Una alarma sonora para radiación para c/operario.
  - h) Carteles y señales de seguridad.
  - i) Películas.
  - j) 2 operarios por equipo.
- Un típico equipo externo tendrá:
  - a) Un contenedor de plomo con la fuente de Ir 192.
  - b) Un cable comando.
  - c) Un tubo guía.
  - d) Un colimador direccional.
  - e) Los requerimiento mencionados para el equipo Crawler de la e) a la j).

### *De los laboratorios*

- Los laboratorios se colocarán en lugares estratégicos con el fin de minimizar las distancias de transporte entre ellos y el sector donde se realizan los ensayos.
- Para la manipulación de material radiactivo el personal debe portar:
  - a) 1 contador Geiger por equipo.
  - b) 1 alarma dosimétrica audible por operador.
  - c) 1 dosímetro de película por operador :
- Puesto que la labor involucra el recorrido de grandes distancias, todos los equipos y laboratorios serán portátiles y totalmente transportables. Deben estar completamente equipados con un sistema de secado rápido de películas, procesador manual o automático y facilidades para el evaluador, con capacidad de revelado de 40 placas / día promedio
- Una descripción aproximada de los equipos en un laboratorio de revelado (la lista no es excluyente), instalado en un cuarto oscuro de procesamiento de radiografías habrá:
  - a) Tanques de procesamiento de películas con tapas para asegurar los baños durante el traslado al laboratorio.
  - b) Protección contra la luz para suministrar un medio ambiente adecuado para el procesamiento de la película radiográfica.
  - c) Aire acondicionado adecuado y calefacción en perfecto estado.
  - d) Equipo de secado de película radiográfica automático y autosuficiente para mantener la producción requerida.
  - e) Negatoscopios con control de intensidad lumínica apto para densidades de 4, con un mínimo de 500 w de potencia.
  - f) Densitómetros con certificado de calibración.

Como parte del aseguramiento de la calidad del trabajo, el contratista del trabajo debe presentar:

- Calificación del procedimiento radiográfico.
- Procedimiento de seguridad radiológica.
- Certificados de habilitación de los equipos de gammagrafiado y del personal asignado a la obra.

- Certificado de las fuentes de iridio, cesio y/o selenio asignados a la obra donde deberá constar la siguiente información:

Fecha de fabricación o alta de la fuente.  
Actividad en curies correspondiente a la fecha de alta.  
Número de serie de la fuente.  
Símbolo del radioisótopo y su masa.  
Dimensiones de la fuente.  
Ensayos de contaminación y fuga.

- Organigrama para la obra.
- Lista del personal profesional y técnico con niveles III, II o I vigentes en las fichas técnicas solicitadas.
- Lista de vehículos de doble tracción y estado.
- Procedimiento de ensayo con tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido.
- Procedimiento sobre gestión y acopio de residuos, metodología de tratamiento posterior para los mismos, debidamente registrados.

Acerca del trabajo a realizarse:

- La mecánica de trabajo en campo hace necesaria que la evaluación de radiografías sea una labor a realizarse rápidamente, puesto que hay que descartar o aceptar la calidad de las soldaduras recientes antes de que se avance hacia nuevos frentes de trabajo. Las radiografías y sus evaluaciones deben estar listas lo más pronto posible para no causar retrasos en la soldadura y subsiguientes labores. La empresa evaluadora de las radiografías debe estar en constante comunicación y coordinación con la contratista, así como con la inspección por parte del cliente.
- Las radiografías serán presentadas de acuerdo a lo pedido a lo coordinado entre las partes. Las tomas deben ser claras y mostrar con nitidez las fallas, en caso contrario deberán ser hechas adicionales tomas.
- Los reportes deben ser significativos, concisos y consistentes, con conclusiones sustentadas que revelen con claridad si se rechaza o se acepta la soldadura evaluada. La calidad del trabajo del evaluador será probada conforme se produzca un número significativo de aciertos – errores en la evaluación.

Una vez descritos los requerimientos para que el personal evaluador proceda, el procedimiento de trabajo será determinado basado en el espesor de pared, diámetro y clase de tubería. Existen 2 técnicas para la toma de películas, la interna y la externa; la interna es la preferida porque solo requiere



de una sola toma o exposición acortando el tiempo de radiografiado por junta y disminuyendo la cantidad de radiación que pueda recibir el operador. Sin embargo el procedimiento de toma interna no puede ser usado para pendientes pronunciadas (mayores de 45°) ni tampoco para sectores donde se hace la unión de tramos grandes (empalmes), lugares donde se usa la toma externa con 3 o 4 exposiciones y mayor tiempo de radiografiado por junta.

El procedimiento definirá el método de producción de radiografías detallando la clase de película a ser usada, los químicos, las pantallas, fuentes de energía y tiempos de exposición. Para asegurar la eficacia y calidad de las radiografías futuras se efectuarán pruebas sucesivas hasta lograr el perfeccionamiento del método:

- Cada evaluador probará un método de radiografiado, por lo que previamente se le informará las características de la tubería.
- La prueba de evaluación de los procedimientos de radiografía normalmente se lleva a cabo en conjunto con las pruebas de soldadores, con tuberías de las mismas características en las que se trabajarán. En caso contrario, la primera radiografía producida con cada método en campo será el modelo.
- El modelo prueba será guardado y tomado siempre como base del método para las futuras radiografías a producirse.
- El uso de penetrómetros en el modelo prueba será igual al que se tiene señalado en las radiografías de producción.
- Por seguridad usar métodos y equipos de radiografía interna siempre que se pueda.
- Los tipos de filtros para pantalla y su colocación serán determinados en el procedimiento de radiografía.
- Usar pantallas con intensificación de películas de plomo, a menos que otras pantallas sean especificadas.
- El tipo de toma interna o externa será definida por el evaluador dependiendo de las pendientes, ubicación de la junta soldada, etc.
- La geometría de exposición se definirá dependiendo de las facilidades y características de la muestra de trabajo. Son usadas la de fuente interna (una sola exposición por toda una soldadura), y la externa (3 o 4 exposiciones homogéneamente espaciadas).
- En el procedimiento figurarán los tiempos de exposición, los de lavado, de secado, de fijación, etc., de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de películas y que permitan una duración de almacenamiento de las películas de al menos 6 años.

Los penetrómetros cumplen la función de medir la sensibilidad de la fuente radiográfica y del método usado. Sensibilidad es el mínimo porcentaje expresado en diferencia de espesor de soldadura, que es posible de ser detectado por el método de exposición. Dando un ejemplo, un 2% de sensibilidad indica que discontinuidades o vacíos más grandes en espesor que el 2% del espesor total de soldadura pueden ser detectados. La sensibilidad y el espesor de soldadura determinarán el espesor del penetrómetro (la medida 2% del espesor de soldadura como medida de sensibilidad es un estándar en la industria), por lo tanto a una soldadura más gruesa corresponde también un penetrómetro más grueso. Para mostrar la calibración o sensibilidad el penetrómetro vendrá con huecos de diámetros 1T, 2T o 4T (T=2%) que según se revelen como áreas negras en la radiografía indicarán que el método es capaz de detectar discontinuidades de al menos tales diámetros.

La producción de abundantes radiografías (una al menos por cada soldadura) hará que se deba implementar un adecuado sistema de archivo de las mismas:

- Usar letras de plomo o marcador para películas que mostrarán el nombre del proyecto, número de orden de trabajo y número de radiografía.
- Las radiografías serán numeradas en orden correlativo, ejemplo XR1, XR2, etc.
- Cuando haya una reparación, la numeración de la radiografía reparada será XR256R1, si se repara de nuevo será XR256R2.
- Si una soldadura es totalmente descartada, será recortada y una nueva soldadura es reelaborada en su lugar la que tendrá un nuevo código de identificación aunque se deba referenciar en los registros con la anteriormente descartada.
- Para aquellas soldaduras que han servido de modelo para la evaluación de los procedimientos de radiografía, al código de identificación se le agregará al final la letra Q (calificación). Por ejemplo XR78Q, si en la soldadura 78 cambiamos de espesor de pared, un nuevo procedimiento es usado.

Obtenidas y clasificadas las radiografías el personal se encargará de evaluarlas:

- Las radiografías deben estar libres de niebla y/o irregularidades de procesamiento que puedan enmascarar defectos, que sí se verían en una radiografía impecable.
- El nivel de sensibilidad debe ser el requerido. Si el penetrómetro falla en mostrar que la sensibilidad es la requerida la radiografía se rechazará. Si es que se muestra muy tenue se evaluará el espesor del penetrómetro y la calidad de la película para detectar la falla.

- Las evaluaciones serán realizadas, revisadas y aprobadas por el evaluador de mayor nivel (nivel 2 o 3) quién será responsable de sustentar en caso que surja algún conflicto de interpretación con la inspección.
- Si surgen problemas en la interpretación, se tratará de resolver a la brevedad el conflicto entre las partes y en caso que sea imposible llegar a un acuerdo, se consultará a terceros entendidos en la materia que puedan expresar una opinión final.
- La capacidad de trabajo de la contratista será tal que permita tener un muestreo de los resultados el mismo día en que se ejecuten las soldaduras, y de interpretar, elaborar y presentar un informe consistente y preciso de la calidad de las mismas.

Uno de los objetivos más importantes es asegurar la salud del personal y la integridad del medio ambiente, para lo cual se tomarán varias medidas preventivas que eviten accidentes:

- Las áreas expuestas a radiación deberán ser vigiladas y mantenidas bajo estricto control.
- El personal que manipule los materiales radiactivos será el responsable de una adecuada señalización de las áreas expuestas a radiación.
- Tanto el personal directamente responsable así como de apoyo o terceros designados en alguna de las labores de radiografiado estará protegido. La responsabilidad de tal protección corre a cargo de la contratista, siguiendo las normas sobre dosis de exposición emitidas por el IPEN.
- Como instrumentos de medición a la exposición, todos los operadores contarán con una película dosimétrica registrada y dosímetro óptico tipo lapicera. Como alerta contarán con una alarma sonora individual.
- Para casos de emergencia se contarán con medidores Geiger de escala adecuada.
- Se harán las coordinaciones necesarias para proveer de un almacén aislado en el cual se coloquen las fuentes radiactivas. El manejo de tal almacén estará a cargo de personal entrenado y con experiencia y su ubicación contará con todas las medidas de seguridad que eviten la contaminación de áreas adyacentes.

Las situaciones de emergencia se clasifican como aquellas en que se pierde el control sobre la fuente de radiación, habiendo la posibilidad de radiación en niveles altos, peligrosos y no permitidos. Para contrarrestar la radiación hacia seres vivos y medio ambiente se pone en conocimiento de todo

el personal los planes de contingencia – emergencia con medidas explícitas. Básicamente tales planes contemplan la utilización de contenedores que reduzcan el peligro de exposición a niveles aceptables hasta el momento en que medidas de mayor seguridad puedan ser aplicadas. Se enfatiza de como manipular las fuentes de radiación con instrumentación especial, medidores de la radiación producida y diagramas de comunicación con personal de apoyo del operador (canales de auxilio y evacuación) para actuar lo más pronto posible y disminuir el peligro. Estas medidas siempre deben figurar por escrito en lugares accesibles para todo el personal durante los trabajos, para saber como actuar en emergencias sin perder mayor tiempo. La normatividad de IPEN se aplica para estos casos.

Igualmente para el transporte se adoptan planes de contingencia, disponiendo de todos los elementos de protección y de emergencia, como compartimientos para almacenamiento de las fuentes, calcomanías indicadoras, equipos de reemplazo para casos de averías en la unidad y equipos antiincendios. En la normatividad del IPEN se agrega la licencia para transportar isótopos, el adecuado trabado del contenedor de la fuente que amortigüe cualquier golpe o movimiento brusco en el transporte, etc. La contratista es la responsable de tramitar todos los permisos, procedimientos, cursos y evaluaciones para poder manipular los materiales descritos.

Para no contaminar el medio ambiente son elaborados procedimientos de tratamiento que prueben el sistema de disposición de residuos químicos peligrosos, como los usados en la revelación de películas (liquido revelador, fijador) y otros materiales de desperdicio. Los residuos serán acopiados y rotulados en los frentes de obra, protegidos del Sol, la lluvia y deterioro externos hasta que se proceda a su recojo. Por su contenido químico peligroso deben ser tratados como residuos especiales y se debe indicar las cantidades dispuestas en cada frente de trabajo.

Métodos alternos de evaluación de soldaduras aprobados por el API 1104 son las evaluaciones ultrasónicas, las por partículas magnéticas y por líquidos penetrantes. El método ultrasónico es un buen sustituto de las radiografías cuando éstas no pueden ser utilizadas por alguna restricción, pero son más caras en su ejecución y requieren de un tiempo más largo de evaluación, por lo que sólo se usan como sustitutos o cuando en zonas urbanas por el peligro de exposición a radiación no podemos usar el método radiográfico. Los otros 2 métodos sólo ofrecen evaluación de fallas en la superficie de la soldadura. Ninguno de estos métodos deja un registro permanente que permita evaluar a posterioridad la validez de la prueba.

Como un breve resumen de las labores que el supervisor ejecutará para pruebas radiográficas o NDT de cualquier tipo están el:

- Asegurarse que todas las pruebas van de acuerdo con los requerimientos del cliente, las especificaciones contractuales y las normas sobre la materia.

- Supervisar el trabajo del operador de radiografías para asegurarse que cumplan con la cantidad y calidad requeridas, ya que éste emite en primera instancia los informes de interpretación de radiografías e identificación de posibles fallas, teniendo la responsabilidad inicial de que los informes cumplen las normas y especificaciones API 1104 y las que se consideren aplicables al proyecto.
- Asegurarse que todas las soldaduras que hayan sido señaladas como defectuosas sean cortadas o reparadas para ser nuevamente evaluadas por una NDT. Cuando pasen la prueba recién serán aceptadas.
- Permanecer en constante alerta de cualquier posible peligro durante la operación y manejo de las fuentes. En caso de que haya peligro lo reportará para proceder a la corrección inmediata.
- Observar que los registros de las soldaduras (películas y reportes) se encuentren completos y reflejen con precisión la calidad de las soldaduras evaluadas durante todo el proyecto.

## **IX.- Revestimiento de las soldaduras (coating & wrapping)**

Casi toda la tubería se encuentra protegida por el recubrimiento de material anticorrosivo que aísla al metal de ser consumido o corroído por el ambiente; igual cuidado se toma con los cordones de soldadura desnudos. Terminada la evaluación de soldaduras hay que protegerlas y aislarlas permanentemente del medio ambiente y de agentes externos que las puedan corroer. Para proporcionar la protección las juntas serán cubiertas por una cobertura, que uniéndose con la protección del resto del cuerpo de la tubería completará el recubrimiento anticorrosivo, no dejándose punto alguno sin protección. Cualquier método de cobertura de juntas debe ser hecho con materiales compatibles con el recubrimiento principal de la cañería; de lo contrario pueden producirse rechazo y huecos. Aparte y al igual que el recubrimiento principal el recubrimiento de juntas debe soportar la temperatura operativa del ducto (110 °F).

Varios métodos son aplicados para proveer la protección, los más conocidos son los de mantas termocontraíbles “shrink sleeves” y el de adherencia por fusión epóxica “fusion-bonded epoxy” o “FBE”. Las mantas (muy prácticas) son colocadas en las juntas, calentadas a una cierta temperatura (proporcionada por el fabricante) y encogidas por efecto del calor. El encogimiento adhiere la manta fuertemente a las uniones soldadas cubriéndolas completamente y uniéndola con el revestimiento del tubo, formándose así en una barrera impenetrable y aislando la cañería del contacto con el terreno.

El procedimiento de aplicación de las mantas termocontraíbles es el siguiente:

- 1) Limpiar el área de acero y del revestimiento integral de la cañería con solvente para erradicar la presencia de aceite, grasa u otros elementos contaminantes.
- 2) Proceder con el cepillado de la cañería.
- 3) Precalentar con soplete el área a una temperatura entre 70°C y 100°C.
- 4) Calentar el adhesivo de la manta en un área de 150mm desde el borde de la manta y aplicar con firmeza ese extremo sobre la parte superior de la cañería.
- 5) Colocar la manta alrededor del caño y calentar suavemente la parte interna de la zona a solapar y luego presionar firmemente.
- 6) Calentar el sello del lado del adhesivo y colocarlo sobre la unión de la manta.
- 7) Evitar la formación de bolsas de aire con un rodillo o guante moviéndolo del centro hacia fuera en ambas direcciones. Calentar nuevamente el sello si es necesario.
- 8) Aportar calor de llama con el soplete (uno para  $\varnothing < 8"$  y dos para  $\varnothing > 10"$ ) desde la parte central en forma circunferencial. Al realizar el trabajo con dos operadores deberán aportar calor de llama de cada lado de la tubería.
- 9) El proceso de encogimiento habrá terminado cuando se observa fluir el adhesivo a los lados de la manta en toda su circunferencia. Finalizar el proceso aportando calor sobre toda la manta para lograr una adherencia uniforme.
- 10) Aplicar el rodillo suavemente para eliminar cualquier bolsa de aire atrapada en la misma.

Respecto al "FBE", este método es similar en aplicación a la protección primaria de capa de polietileno extruido con que vienen las cañerías. Inicialmente se limpia el área a ser cubierta de cualquier desperdicio o rastro de suciedad y aceite empleando cualquier método conocido, luego se deja libre de puntas filosas, óxido y dientes procedentes de salpicaduras de soldadura (por abrasión con arena) y se procede a la limpieza del polvo por aplicación de aire comprimido. Para realizar el calentamiento se utiliza una bobina de inducción de calor que elevará lentamente la temperatura en la junta hasta por encima de los 475 °F para evitar dañar el recubrimiento adyacente. Calentada la junta se aplica el FBE en forma de polvo epóxico, tanto en la base como en las demás capas, cubriendo totalmente la junta hasta un razonable traslape con el recubrimiento de polietileno.

Aplicaciones especiales se usan para recubrimientos de uniones, válvulas y accesorios, juntas de transición entre tubería de menor a mayor diámetro o alguna otra de carácter especial. Dada la geometría variable y distinta que

poseen estas juntas, la aplicación de mantas o inclusive de “FBE” resulta impracticable, por lo que se pueden usar otros métodos como cinta plástica. Se prevé que aquellas juntas y en general cualquier superficie de tuberías, válvulas o accesorios que queden por encima de la superficie expuestos al Sol y agentes atmosféricos, será protegido además con pintura especial la que cubrirá totalmente el área expuesta.

Otra aplicación especial por el daño mecánico al que pueden ser expuestas las juntas son los cruces de obstáculos sin protección de forros. La tubería va a ser jalada (método “trenchless”, para cruzar obstáculos sin usar zanja), y los esfuerzos pueden hacer que se desprenda el recubrimiento. La dirección de jalado será tal que permita la adherencia de la cobertura y presionará el traslape entre manta y recubrimiento de polietileno. La operación de recubrimiento será hecha con suficiente anticipación al menos unas 20 horas antes, para asegurar una adherencia completa.

La inspección asegurará que:

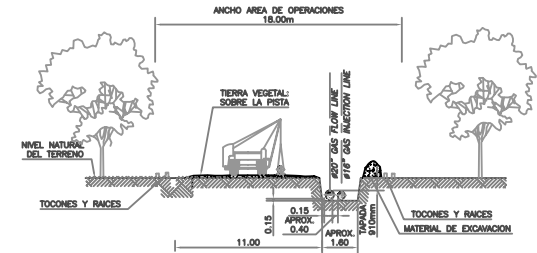
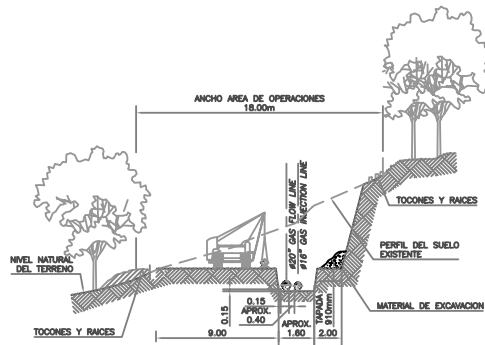
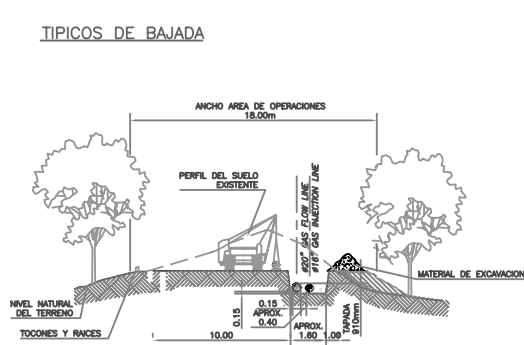
- Antes que la tubería sea bajada en la zanja, el recubrimiento protector será inspeccionado con un detector de fallas electrónico ajustable “holiday detector”. El detector funciona pasando un electrodo de contacto (tipo resorte o paleta) a la junta en circuito cerrado. La inspección se hará al 100% de las juntas.
- La preparación de la superficie donde se aplicará el recubrimiento, el precalentamiento y aplicación se harán de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y/o vendedor.
- Las soldaduras hayan sido apropiadamente limpiadas antes del recubrimiento.
- Las coberturas de junta hechas por adherencia de fusión epóxica cumplirán los requerimientos mínimos de espesor.
- Los datos de soldadura y número de tubería hayan sido registrados antes de recubrir las juntas.

## **X.- Descenso de las tuberías a la zanja (lowering-in)**

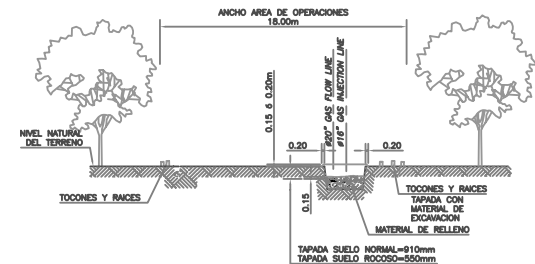
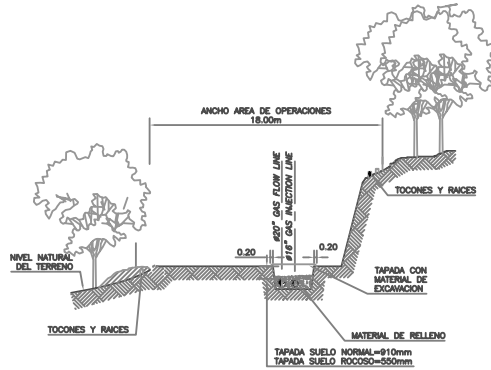
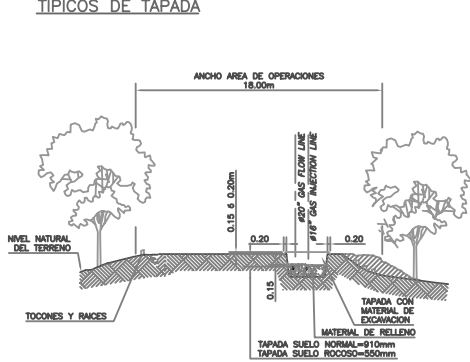
Teniendo un tramo totalmente soldado, evaluado y recubierto, la tubería será descendida “lowering-in” en una labor coordinada de varios tiendetubos protegiendo la integridad del tubo, colocándolo adecuadamente en el fondo de la zanja y evitando deformaciones.

Primero se inspecciona el fondo de la zanja y el terreno en el que descansará la tubería. Los terrenos en selva no son normalmente rocosos ni duros, son arcillosos o arenosos, apropiados para acoger el tubo; pero como norma general una cama de arena proveniente de los ríos circundantes o de tierra seleccionada de grano fino es distribuida en la zanja. El espacio que se proporciona entre la base del tubo y fondo de la zanja (4” - tramo normal y 12”

TÍPICOS DE BAJADA



TÍPICOS DE TAPADA



*Dimensiones de operaciones en el derecho de vía*



para curvas pronunciadas de la cañería y cambios de nivel en la topografía) será ocupado por el colchón de arena compactado hasta asegurarse que no ceda por el peso del tubo. Antes de proceder el fondo será limpiado de rocas sueltas, raíces o cualquier desperdicio que pudiera dañar la cobertura y al tubo.

Los tubos se levantarán usando cunas de llantas o neumáticos para no dañar su integridad. En el caso de usarse cuero, eslingas o lona no abrasiva, el ancho del material impedirá cualquier contacto del tubo con alguna parte metálica. Cuando se libere la tubería en zanja se dejará debajo del contacto tubo – cuna un espacio que permitirá soltarla sin levantarla. Para cualquier caso el material en contacto con el tubo no será abrasivo.

Analizando el posicionamiento de la cañería en la zanja debemos entender cuales son los esfuerzos a los que se someterá durante su vida operativa. Existen esfuerzos verticales que provienen de cargas de enterramiento y muy eventualmente por cargas de maquinaria en tránsito (en etapa de construcción, después no hay tránsito en la traza). Los esfuerzos axiales adquieren importancia en curvas y en locaciones donde la tubería emerge a superficie y deben ser restringidos al mínimo con el uso de anclajes de concreto; los cambios de relieve producirán esfuerzos de compresión en las partes bajas de las pendientes y por último están los esfuerzos inducidos por cambios de temperatura (expansiones y contracciones). Para todos estos esfuerzos la tubería debe asumir posiciones de menor tensión – compresión que asegure su no fatiga. El colchón que rodea al tubo debe asimilar los esfuerzos y los amortiguará dejando a la tubería libre de ellos.

El acolchonado lateral de la tubería proveerá apoyo para los esfuerzos verticales y cargas de enterramiento. El probable ovalamiento de la tubería será impedido por el material que se coloque a los costados y actuará en curvas horizontales restringiendo movimientos axiales, donde debe haber un espacio de 12” entre el interior de la curva de la tubería y la pared de la zanja. Otras restricciones de movimientos axiales se aplicarán en cambios de longitud por temperatura, en zonas de compresión por relieve así como de elevación de la cañería por encima de la superficie. El acolchonado brindará apoyo en todos estos puntos luego de haber sido compactado.

La inspección asegurará que:

- En el descenso se manipulará secciones de tubería de no más de 1 km. de longitud, impidiendo ejercer esfuerzos excesivos que dañen la tubería o sus soldaduras.
- La manipulación de la tubería no cause daño permanente en el cuerpo y el recubrimiento.
- El recubrimiento sea inspeccionado durante el descenso y luego que la tubería haya sido bajada.
- Haya un número adecuado de tiendetubos trabajando en la operación. El tiendetubo es la maquinaria principal de trabajo para el descenso y

debe estar adecuadamente espaciado proporcionando suficiente soporte para que la tubería no se flexione por insuficientes apoyos. Durante el descenso la tubería no deberá tocar las paredes de la zanja o el suelo.

- La tubería se acomode perfectamente a la forma de la zanja y la holgura necesaria “slack” sea dejada para las futuras uniones, evitando que la tubería adquiera dobleces o arrugas y se ajuste perfectamente en curvas.
- Mínimos requerimientos de acolchonado sean cumplidos.
- Para el caso de lastrado en zonas donde haya cuerpos de agua, los contrapesos sean correctamente colocados respetando un espaciamiento calculado.

## **XI.- Tapado o cubierta de las zanjas (backfilling)**

Colocadas las tuberías en posición y definidos los puntos donde se dejarán extremos abiertos y sin relleno para futuros empalmes finales se procede al relleno de las zanjas. Ésta irá al rezago del descenso en un tramo corto para evitar que las tuberías permanezcan expuestas mucho tiempo, ya que las variaciones de temperatura pueden contraer – expandir la tubería sometiénola a esfuerzos longitudinales. Se estima que la separación entre tareas no debe ser mayor de una milla (1.6 km.) y se revisa que los tramos estén limpios de cualquier desperdicio que haya podido caer en las zanjas después del descenso. En la zanja no permanecerán en contacto con los tubos rocas pequeñas, pedazos de tela u objetos duros y puntiagudos de cualquier clase.

Luego de revisar el estado de las zanjas el primer relleno sobre los tubos será de tierra suave o arena, libre de rocas u objetos duros, cuya altura será de aproximadamente 30 cm. o 12” y sirve de tope acolchonado para los tubos. A continuación vendrá una combinación de rocas pequeñas y tierra seleccionada, casi siempre proveniente de la misma zanja; las rocas que acompañen no tendrán más de 10 cm. de diámetro y deben estar completamente rodeadas por la tierra seleccionada. Tal cobertura dejará un resto entre 6” en terreno forestal o 15” en tierras de cultivo, a rellenarse con material común y no seleccionado extraído de la excavación; cubierta completamente la zanja hasta el nivel del suelo, las aplanadoras compactarán el terreno y luego el material que sobre será colocado por toda el área donde existió la zanja (coronación) hasta llegar a tener una altura entre 8” a 12”, para evitar una futura erosión de la línea eje en superficie y poner al descubierto las tuberías y si aún sobrara tierra será esparcida por el derecho de vía. Para distinción del eje de las tuberías se usarán marcadores en tramos donde no se utilice la coronación (pendientes empinadas, orillas del río y quebradas de amplio curso).

En pendientes empinadas el curso de aguas de lluvia podría afectar severamente la estabilidad del terreno y erosionar la zona donde estaba la zanja. Se colocarán terrazas y trampas para los cursos de agua y desviaciones

para llevar los torrentes fuera de la zona trabajada hacia los drenajes naturales. Si es imposible desviar los torrentes y cursos fuera de la zona de la zanja, ésta puede ser usada como drenaje en sí proporcionando los medios suficientes para evitar su erosión. Sacos llenos de tierra serán colocados en intervalos como rompedores de la continuidad del flujo reduciendo la erosión, mientras montículos de tierra compactada controlarán y direccionarán el agua, los que en conjunto alejarán y drenarán el torrente de la zona de la zanja.

La inspección observará que:

- El material de relleno sea el adecuado para proteger las tuberías, que las medidas de las capas sean respetadas y colocadas uniformemente sobre los tubos para protegerlos permanentemente.
- El tamaño y cantidad de rocas que entren en zanja sea el adecuado.

### **XIII.- Cruce direccional en el río Camisea**

De la traza escogida se necesitará un cruce direccional en el río Camisea. Será direccional para no afectar el medio ambiente del río y alrededores, por la extensión del trabajo y por la estabilidad que ofrece la perforación asegurando un medio en el cual las tuberías no serán afectadas ni perturbadas por el curso del río. La zona donde se realizará el cruce ofrece facilidades al presentar orillas de suave pendiente, un trayecto de amplio ancho y poca profundidad, playas de arena y cantos rodados y espacios para la colocación de equipos de perforación. Las coordenadas del cruce serán N = 8693500 y E = 731 500 (PK 10+200) y para facilitar el trabajo debemos asegurar un sitio de fácil acceso hacia ambas orillas desde el DDV y una comunicación a través del río con la instalación de un puente que lo cruce y soporte el paso de la maquinaria.

#### **1) Estudios preliminares:**

Previo a la perforación del túnel, algunos estudios deben ser llevados a cabo para demostrar que el área escogida asegura la estabilidad y duración del túnel. Se efectuará un estudio de tipo geotécnico que evalúe el terreno tanto en la superficie como en el subsuelo para conocer que clase de estratos habrá, si hay presencia de rocas, terrenos deleznable, que clase de brocas a usarse, los tiempos de duración para la perforación, etc.

En la margen derecha del sitio escogido se encuentra una playa de cantos rodados, plana y de fácil inundación en estación de creciente, luego de la cual la orilla presenta un talud con 26° sin mayor presencia de vegetación; en la margen izquierda existe sólo un talud de 23° y 8.5 m de altura, cubierto de vegetación. El río fluye sin turbulencias con un ancho de 100 m. en época seca y alcanza los 230 m. época de lluvias, con una diferencia de niveles entre ambas épocas de 7 m. en la zona del cruce. Analizando geomorfológicamente en el río se encuentra material de origen aluvial (gravas y arenas con piedras redondeadas de deposición reciente y largo trayecto de transporte) y las márgenes son planas correspondiendo a antiguas llanuras de inundación de suelos finos de baja resistencia (arcillas, limos y arenas). Bajo estos suelos

estudios posteriores encuentran terrenos altamente consolidados de arenas, arcillas y limos, favorables para la estabilidad del túnel.

La dinámica externa en la zona del cruce es determinada por la potencia de erosión del río, sobretodo en época de lluvias cuando el nivel sube notablemente y hace que el río tenga el suficiente alcance para erosionar los pies de los taludes. La margen derecha tiene una mayor protección por la presencia de la playa de piedras que puede ser erosionada ligeramente pero de fácil recuperación; en avenidas extraordinarias, para evitar la erosión de las partes altas se debe colocar protección de taludes. El río presenta un cauce recto sin curvas agudas que puedan producir meandros a futuro.

Para realizar la investigación geotécnica se perforan pozos de poca profundidad en las orillas que dependen de la profundidad esperada del túnel entre los 20 m. y 25 m., y su número va en aumento conforme el cruce es más largo o se encuentran disconformidades o terrenos difíciles de atravesar que requieren mayor estudio. Para la investigación se estiman 2 pozos en ambas orillas y uno más para el estudio de la playa de piedras. Las perforaciones se alinean cercanamente a la línea eje del túnel (25 pies fuera de la línea eje) y una vez terminadas son cementadas.

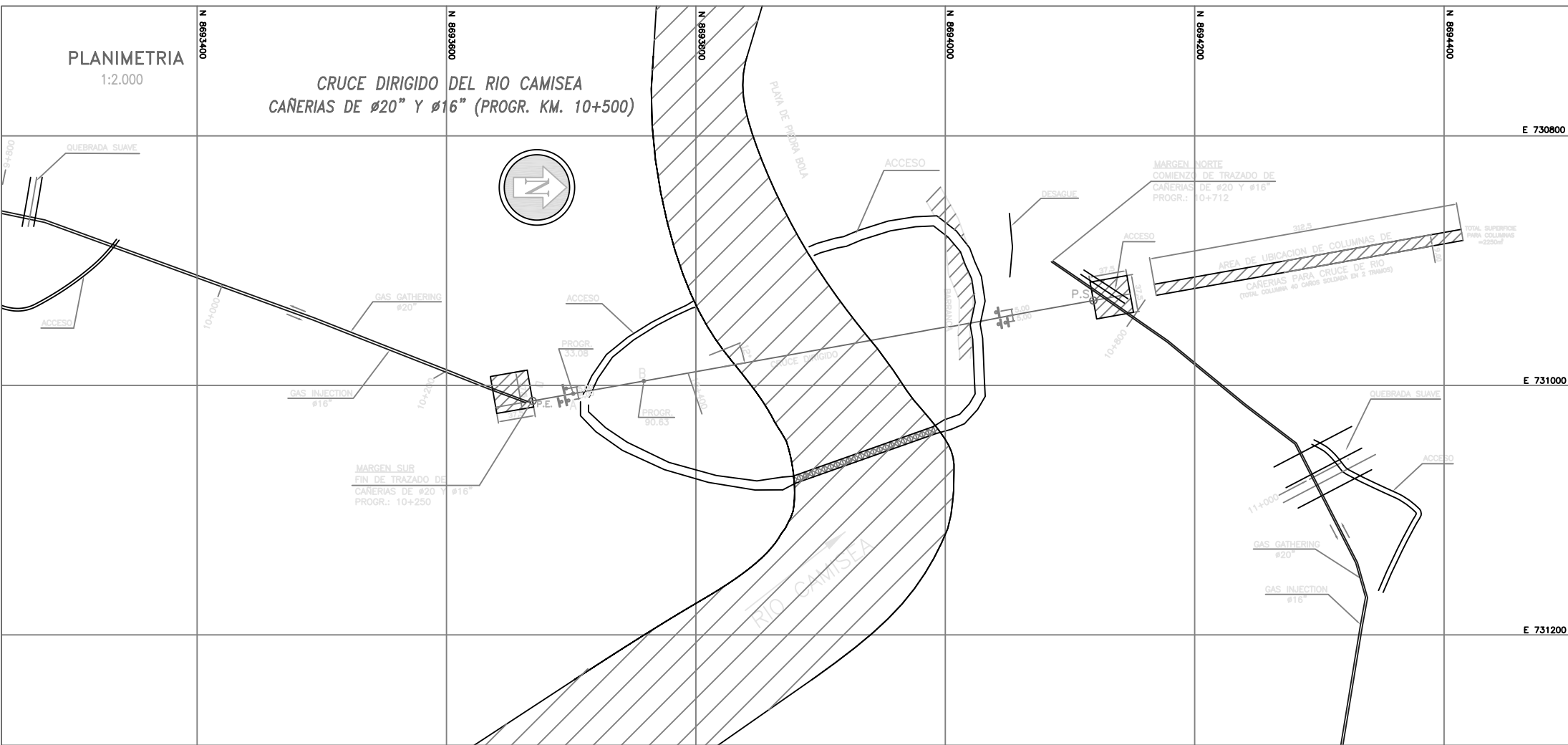
Durante las perforaciones se toman registros con los cuales el geólogo inicia la clasificación e identificación de suelos. La tarea implicará la clasificación de los materiales recolectados de las muestras de suelo así como la interpretación de los terrenos que se atraviesan. Pruebas adicionales para obtener más datos son las de penetración del suelo destinadas a definir la densidad como consistencia de los materiales granulares. Si se desean obtener muestras del subsuelo o “núcleos” el método de muestreo por tubo de pared delgada permite obtener pedazos cohesionados de roca o terreno para posterior análisis. Averiguaremos el tipo de roca, relativa dureza y resistencia compresiva no confinada; estos resultados son compilados en la designación de calidad de roca. Con todos estos datos determinaremos la clase de broca a usar, los tiempos de perforación, posibles problemas en el proceso de perforación del túnel, se confeccionan perfiles estratigráficos detallando la profundidad de los estratos, su espesor y similitudes que presentan en ambas orillas.

Los tipos de suelos encontrados son:

- Arcilla limosa de plasticidad media a compacta.
- Arena fina medianamente densa.
- Arcilla limosa dura de plasticidad media.
- Un estrato de grava arenosa mal graduado medianamente densa, saturada, marrón con grava redondeada de 2,5" de tamaño máximo entre 6.25 m. y 9.15 m en la costa sur del río.

PLANIMETRIA  
1:2.000

CRUCE DIRIGIDO DEL RIO CAMISEA  
CAÑERIAS DE  $\varnothing 20''$  Y  $\varnothing 16''$  (PROGR. KM. 10+500)



E 730800

E 731000

E 731200

De los resultados extraídos, la zona escogida del río es adecuada para el cruce por la estabilidad que se presenta en sus orillas, aumentada por la protección de los taludes. La perforación direccional es también posible por la consolidación que presentan los suelos, siendo la única desventaja el estrato de grava arenosa por la presencia de bolones y piedras redondeadas, que debe ser evitado.

## 2) Determinación de parámetros para la perforación

**Profundidad de cobertura:** La profundidad es determinada a partir de los estudios preliminares que proporcionan datos respecto a los estratos y suelos y de las características del río (ancho, profundidad) para diseñar el perfil del túnel. Se recomienda tener una cobertura mínima de 15 m. a 20 m. al punto más profundo del lecho para evitar conexiones entre el agua del río y el lodo de perforación, y sumando la profundidad por el cauce y creciente del río, la profundidad será entre 25 m. a 30 m. con respecto al punto de entrada.

**Ángulos de penetración y radios de curvatura:** Tanto en la entrada como en la salida del túnel escogemos un ángulo de 12° que va a permitir suave entrada y salida del túnel. Los ángulos de penetración iniciales permitirán controlar la profundidad y los futuros radios de curvatura que se dispondrán para la cañería; como parámetro, los ángulos iniciales son escogidos entre 8° a 20° de inclinación, para que los primeros tramos del túnel sean rectos y después recién iniciar la curvatura. En su salida el túnel debe adquirir un ángulo entre 5° a 12°, apropiado para poder manipular la cañería entrante al túnel una vez que comience la operación de jalado. La curvatura del túnel posibilitará que las cañerías puedan adaptarse a la forma pero sin esfuerzos que permitan la aparición de fatiga por doblado, por lo tanto la curvatura estará determinada como mínimo por el radio libre de curvado de la cañería; como regla practica, el radio de curvatura aumenta 100 pies / 1" de DE; dando valores para el tubo de 16" sería 1600 pies ≈ 500 m. y para el de 20" sería 2000 pies ≈ 600 m. escogiéndose entonces un radio de curva de 700 m.

Mínimo radio de curvatura (pulg.)				
Esfuerzo de cedencia (psi)	F = 0.72	F = 0.6	F = 0.5	F = 0.4
35000	863D	1036D	1243D	1553D
42000	719D	863D	1036D	1295D
46000	657D	788D	946D	1182D
52000	581D	697D	836D	1046D
56000	539D	647D	777D	971D
60000	503D	604D	725D	906D
65000	465D	558D	669D	836D
70000	431D	518D	621D	776D
80000	377D	453D	544D	680D

La fórmula para deducir los valores arriba enlistados es:

$$R = \frac{3EI}{2ZS_A}$$

Donde:

- E = modulo de elasticidad para el acero  $29 \cdot 10^6$  psi
- I = momento de inercia
- Z = modulo de sección
- $S_a$  = máximo esfuerzo permitido =  $SMYS \cdot F = 70000$  psi \* F
- F = factor de seguridad

En la tabla buscamos el mínimo radio de curvatura para las tuberías que cruzarán el túnel, ambas con  $F = 0.6$  (por ser cruce de río).

$$R_{\min} 20" = 518 \cdot 20" = 10360" = 863.3 \text{ pies} = 263.14 \text{ mt} < 700 \text{ mt}$$

$$R_{\min} 16" = 518 \cdot 16" = 8288" = 690.66 \text{ pies} = 210.52 \text{ mt} < 700 \text{ mt}$$

Ambos tubos cumplen con un radio de curva en el túnel mayor que el radio mínimo de curvado

**Instrumentos de medición:** alojados en la sarta piloto van las herramientas de medición de la trayectoria que sigue el túnel en perforación, tales herramientas son instrumentos electrónicos que proporcionan 2 datos importantes: el azimut magnético (control hacia la derecha o izquierda) y la inclinación (control hacia arriba o abajo); como complemento pueden usarse localizadores en superficie. La precisión de los instrumentos dependerá de las variaciones del campo magnético terrestre y se verá afectada por la presencia de estructuras de metal (puentes, otras tuberías, etc.) o por fuentes y líneas de transmisión eléctricas. Como regla general, un aproximado cálculo del punto de salida de la sarta de perforación estará entre los 10 pies hacia izquierda-derecha y  $-10$  pies  $+30$  pies en la longitud.

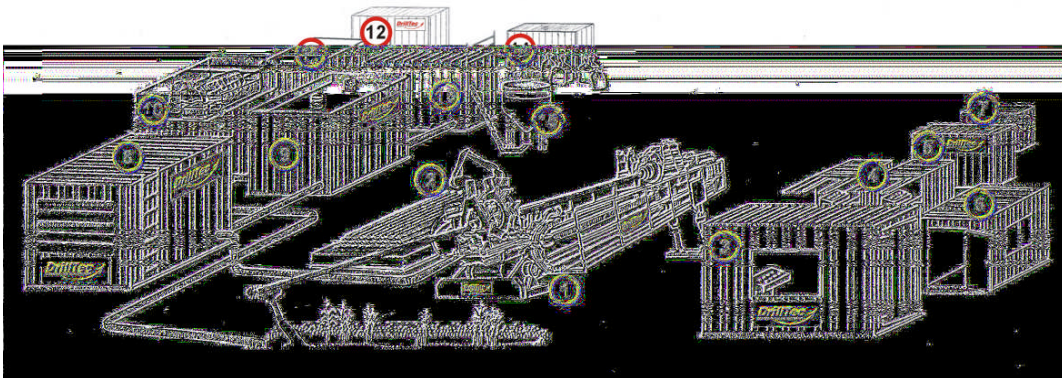
**Parámetros conforme a obra:** se refiere a la determinación de las distancias en el recorrido del túnel y que se reflejarán en los planos, normalmente las mediciones del trayecto se realizan cada 30 pies. Como métodos alternativos o complementarios están el giroscopio y el radar de penetración de terreno, usados en los tapones o "chanchos" inteligentes.

Dando medidas a la trayectoria del cruce se tiene que aproximadamente será de 456 m., la profundidad por debajo del lecho será de unos 18 m y en su mayor parte habrá material fácil de perforar (arcillas, arenas), notándose la ausencia de rocas excepto en el estrato de grava y en las playas por las capas de cantos rodados acumulados que no afectan la performance de la perforación

### 3) Requerimientos de espacio

El espacio de trabajo para el equipo de perforación más las unidades auxiliares (oficinas, almacenes) será de aproximadamente 100 pies de ancho

por 150 pies de largo; toda esta área en la margen izquierda del río debe ser nivelada, apisonada y cubierta de cantos rodados o ripios que proporcionen estabilidad inclusive en días de lluvia. La colocación de las partes del equipo, más las oficinas y accesorios no tienen una forma predeterminada, pero respetará el adecuado funcionamiento de todos los sistemas de perforación y operación. Al requerirse gran cantidad de agua para perforar el túnel así como para el consumo humano, se instalarán bombas sumergibles y pequeñas tuberías para extraer agua desde el río. El gráfico de abajo muestra un arreglo de las partes del equipo para la operación.



1. Perforadora.
2. Lugar para la tubería de perforación.
3. Cabina de control.
4. Motores.
5. Taller.
6. Vestuario y oficina.
7. Depósito de herramientas y materiales eléctricos.
8. Bomba de lodos.
9. Tanque de reciclado.
10. Equipo de reciclado de lodo.
11. Tanque de agua.
12. Depósito para repuestos equipo de lodos.
13. Tanque de mezcla.
14. Depósito para repuestos en general.



#### 15. Silo para bentonita.

Al otro lado del río habrá una zona de similares requerimientos (100 pies de ancho por 150 pies de largo, áreas niveladas y apisonadas) para los trabajos complementarios de perforación y para prefabricar la sarta de tubería que cruzarán el respectivo túnel en proceso. La sarta de tubería prefabricada para cada diámetro debe ser una sola, pero por la longitud de 456 m. puede fraccionarse en 2 o más secciones que faciliten su prefabricación así como la operación de jalado, debiendo reducirse al mínimo el número de secciones en que se divida la sarta pues el jalado interrumpido de tubería para realizar uniones aumenta las posibilidades de atasco en el túnel.

1. Fosa de asentamiento de recortes.
2. Fosa para contención del lodo en la salida del túnel.
3. Rodillos para la columna de tubería prefabricada.
4. Columna de tubería.
5. Equipos auxiliares para diferentes tareas.
6. Lugar para la tubería de perforación.
7. Almacenamiento de partes y repuestos.

#### **4) Proceso de perforación**

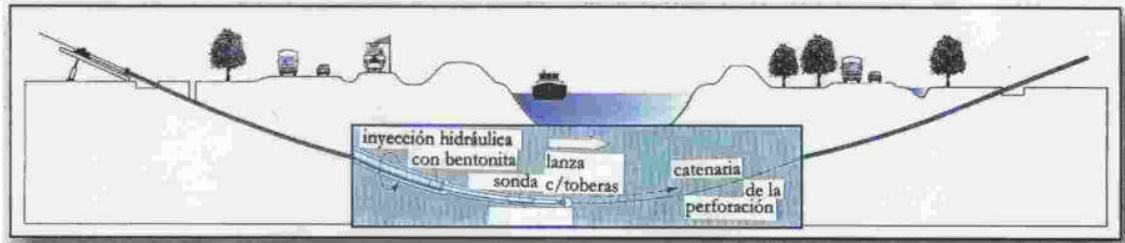
El proceso de perforación direccional se divide en 4 etapas básicas:

- 1) Perforación de túnel piloto.
- 2) Ensanchamiento o rectificación del túnel.
- 3) Acondicionamiento del túnel.
- 4) Inserción de la cañería.

#### **Perforación del Túnel Piloto**

El túnel piloto es un túnel inicial de pequeño diámetro que seguirá una trayectoria predeterminada y estrictamente controlada, como base para luego ensancharse a un túnel más grande que será el que aloje permanentemente a las cañerías, trabajándose con una torre de perforación bastante inclinada que nos otorgará el ángulo de entrada de 12°. Se perforará con lanza hidrocínética dirijible o con motor de fondo de 6 ¾" y broca de 9 7/8" (el Ø del túnel piloto será menor que la futura tubería a jalarse) avanzando por el desgaste hidráulico del lodo de perforación y/o trabajo mecánico de la broca. La trayectoria que seguirá el túnel perforado es primero recta para después adquirir la curva suave de radio de 700 m. hasta llegar a la profundidad

deseada en trayectoria horizontal y de ahí repetir el proceso inversamente (primero curva y luego recto) pero hacia arriba en búsqueda de la salida en la orilla contraria. La sarta es adicionada continuamente y dirigida en su desviación con el uso de una curva ubicada justo detrás de la broca, la que irá quebrando poco a poco el trayecto del túnel; avanzando de esta manera la sarta piloto no es rotada excepto para orientar la adecuada desviación de la curva cuando se necesite

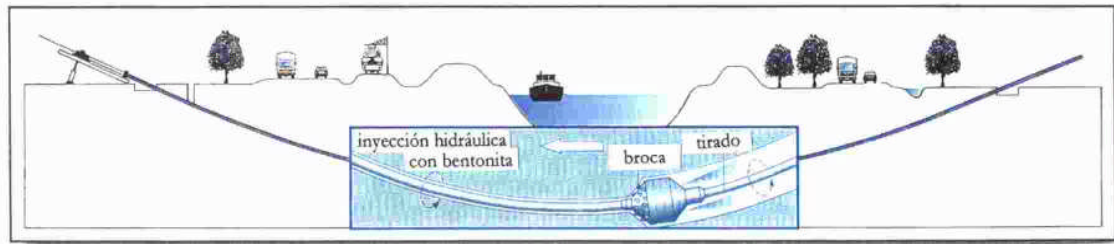


Para dirigir correctamente la trayectoria, en la sarta irá insertado un instrumento medidor del ángulo de inclinación como el azimut que basa su funcionamiento en el campo magnético terrestre; mientras se realiza la perforación el instrumento envía señales constantes que en superficie son traducidas y se calcula la nueva posición tomando como base la anterior medición para efectuar las correcciones necesarias. La posición es dada en coordenadas horizontales y verticales a lo largo del hueco piloto y son relativas al punto inicial de entrada en superficie.

De ser necesario, se puede proceder a un ensanchamiento inmediato del hueco mientras se perfora el piloto; la sarta piloto es seguida de una sarta más grande con rimador en la unión de ambas que permite que el hueco piloto sea ensanchado poco después de haber sido perforado; la sarta más grande también actúa como tubo conductor proveyendo rigidez a la sarta piloto. Como en toda perforación se aporta lodo para limpieza, refrigeración, desgaste hidráulico y estabilidad del pozo, con aditivos para: limpieza del túnel, mejora de penetración, lubricación, viscosidad, control de pérdidas por circulación y mejoradores de gel. La preparación del lodo dependerá de la naturaleza de los estratos que se atraviesen, los suelos de grano grueso (arena y grava) se controlarán fácilmente con lodo bentonítico, los de grano fino (arcillas, lutitas, limos) necesitarán de polímeros.

### **Rectificación del Túnel**

Perforado el túnel piloto y contándose con el tren de barras pasando el punto de salida, se instalará en la otra orilla un ensanchador de tamaño y diámetro adecuados que se jalará desde la perforadora, rectificando el túnel a un diámetro superior. Por detrás de esa herramienta se colocan nuevas barras de perforación, de tal manera que cuando lleguen al pie de la máquina de perforación haya un nuevo tren de barras montado dentro del túnel; por pasajes sucesivos se logrará la rectificación hasta un diámetro superior en aproximadamente 50 % del diámetro del caño a insertar. Para la tubería de 20", el túnel será de 30", para la tubería de 16", de 24".



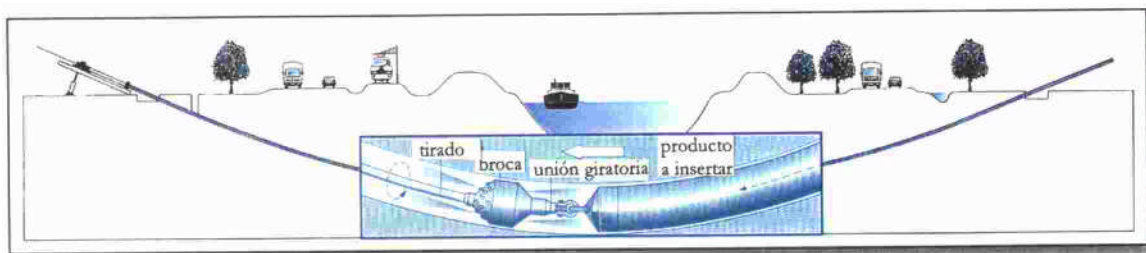
### Acondicionamiento del Túnel

Esta etapa consiste en un pasaje adicional con barril o ensanchador del último rectificador pasado, mientras se bombea gran cantidad de lodo para asegurar la limpieza del túnel; la presión de bombeo será mínima y a solo efecto de permitir la recirculación del lodo. Completada la perforación, en ambas bocas del túnel la presión será atmosférica.

### Inserción de la cañería

Es la etapa final del trabajo en la cual se toma la tubería que quedará permanentemente en el túnel por medio de un cabezal de tiro “pullhead” y se le conecta a través de un gancho y unión giratoria “swivel” al rimador y sarta de perforación, de manera que permita insertar el caño por jalado dentro del túnel sin que el mismo gire pero permitiendo que el rimador sí rote; en la otra orilla estará ya listo el tramo de tubería para ser jalado desde la torre de perforación.

Como efecto de la inyección de bentonita en una cantidad mínima de cuatro veces el volumen final del túnel, se crea una presión positiva de lodo que además de limpiar el túnel ejecutado, permite que la inserción sea suave porque el caño viene flotando en un lecho bentonítico con poco esfuerzo de tracción (ver esfuerzo necesitado en la sección de cálculos).



### Tratamiento de lodos

Debido a la gran cantidad de lodo bentonítico necesario para la operación, los retornos de barro son reenviados a una planta de tratamiento donde se procede a la separación de los residuos estériles por medio de zarandas, luego se procede a su filtrado y reciclado para su nuevo aprovechamiento una vez que el lodo esté limpio; a tal efecto se tiende una cañería para vincular la zanja de salida de la perforación (zanja de inserción) con la planta de reciclado de lodos (al costado de la máquina). La operación se puede observar con mejor detalle en el gráfico de distribución de equipos de arriba.

## **5) Preparación de la columna de tubería.**

La preparación de la columna (o columnas) involucrará varias tareas sucesivas y similares a las vistas en tierra, se adicionan precauciones y materiales más resistentes para un tubo que tendrá que resistir esfuerzos de tracción y rozamiento. Las labores son:

- Soldadura de las cañerías y evaluación según procedimientos y estándares.
- Pruebas hidrostáticas dependiendo de las longitudes y diámetros.
- Revestimiento de juntas soldadas.
- Disposición de las columnas sobre rodillos cada 12 metros.

Conforme avancen las tareas de soldado la cañería irá siendo colocada cuidadosamente sobre rodillos espaciados, siendo evaluada en sus uniones soldadas, recubierta y probada hidrostáticamente; se le coloca el recubrimiento protector especial y queda lista para ser jalada dentro del túnel. Perforado el túnel, un tiendetubos es situado en el extremo de la tubería que entrará primero, que con ayuda de una cuna de apoyo se hace que la tubería adquiera la forma característica del cuello de cisne que permitirá al tubo iniciar la entrada. Otro tiendetubos irá en el otro extremo sosteniendo la punta para que no sea arrastrada por el suelo entre los espacios de rodillos, los que serán dispositivos de caucho o un material que no cause abrasión y que protejan el revestimiento, facilitando el jalado.

Para las uniones terminada la inserción del primer tramo, se procede a la unión y nivelación con el segundo, luego a la soldadura y pruebas (ensayo con líquidos penetrantes) y finalmente se aplica el revestimiento; insertada la unión, el jalado continúa hasta tener el primer extremo en el inicio del túnel, en la orilla donde se encuentra la máquina de perforación. Llegado a este punto podemos concluir que prácticamente la maniobra ha sido exitosa, procediéndose a pruebas de calibración e hidrostática final para confirmar totalmente la integridad del cruce.

## **6) Revestimiento de la tubería:**

La tubería que realizará el cruce poseerá una protección capaz de resistir esfuerzos muy severos de tracción y abrasión que se producirán en todo el trayecto, por lo tanto el revestimiento especial que se coloque debe poseer las siguientes características:

- Ser compatible con los recubrimientos primarios (cuerpo y uniones de tubo).
- Tener una excelente adherencia.

- Resistir las tensiones del contacto directo con el terreno en situaciones de arrastre.
- Tener una superficie lo más suave y lisa para no generar mayores tensiones durante el jalado, pero a la vez dura para resistir fricción y mantener la barrera anticorrosiva.

El medio ambiente que enfrentará la tubería durante el jalado lo deducimos de los estudios geotécnicos y estará rodeado de arcilla, arena y grava y además la presencia de piedras sueltas. El revestimiento debe resistir la fricción en todos estos casos, para tal fin podemos usar un polímero concreto con base epóxica, fácilmente aplicable en taller o en campo con la ayuda de una maquina portátil. Otro procedimiento es la aplicación de una protección mecánica que circunde totalmente a la tubería con un material como fibra de vidrio que es fácilmente adherido a la superficie externa usando resina, dejando secar el material se obtendrá una protección dura y a la vez lisa.

Equipo a usarse para la perforación direccional:

- Máquina de perforación de 100 Ton de fuerza de tracción equipada con bomba y motores eléctricos.
- Equipo de filtrado, reciclado y retorno de lodos, equipado con equipo de bombeo de lodos.
- Sistema de dirección digital, punto a punto.
- Sistema de calibración y verificación por triangulación.

#### **XIV.- Cruces aéreos**

Los cruces aéreos son secciones de tubería que no van enterradas sino colocadas por encima de la superficie y soportadas por parantes. Los cruces aéreos se realizan cuando es imposible enterrar la tubería porque existe una quebrada demasiado profunda o porque el obstáculo a cruzar hace muy difícil el excavar una zanja, pudiéndose afectar más el ambiente o generar curvas demasiado pronunciadas; por lo que no es solución muy bien vista desde la posición ambiental ya que siempre existe el temor de que el tubo expuesto al aire libre es más vulnerable a accidentes o impactos. Probables cruces aéreos se tendrán en las quebradas Purocari y Sachavacay con cursos de agua permanente y otras quebradas que sin tener agua, son muy profundas como para ser excavadas y cruzadas subterráneamente.

#### **XV.- Uniones y empalmes finales (tie-ins)**

Conforme va terminado la construcción del ducto muchos sectores son dejados sin completar porque el lugar es de difícil acceso, corresponde a una quebrada o cruce aéreo, es la unión de 2 frentes de trabajo o sartas de tuberías de 1 km (longitud que permite la manipulación para el descenso a zanja), es emplazamiento de futuras instalaciones de superficie y presenta mayor

complejidad en su construcción o se necesita dejar espacio libre para permitir el paso del personal. Estos lugares son denominados puntos de unión o de empalmes finales “tie-ins”, donde las cañerías se unen para completar la unidad del gasoducto.

Para hacer buenas uniones es necesario tener medidas bastante aproximadas de las longitudes que serán unidas o de los espacios que se dejan entre frentes de trabajo. Anteriormente se indicó que los extremos sueltos eran dejados con una cierta holgura que permite manipularlos fácilmente aun cuando el resto de la tubería ya ha sido enterrada. Las uniones no serán necesariamente múltiplo de la longitud de un tubo (12 m.), en consecuencia habrá que cortar pedazos de tubo para completarlas pero sin exagerar su número, los pedazos de tubería a colocar deben tener al menos una longitud equivalente a 3 DE de la tubería.

Similares tareas esperan en los empalmes que son también puntos de unión de dos sectores de tubería, pero a diferencia de las uniones aquí no hay hueco ni sección dejada sin completar sino 2 extremos de tubería próximos para unir. La cuadrilla que dejó los extremos sueltos ha de haber calculado con bastante precisión que estos empaten con holgura y no sea necesario completarlos con pedazos de tubo ni cortar el exceso de tubería que pueda haber. Durante el descenso de uniones y empalmes, se controla que la temperatura sea estable o esté en incremento y al mismo tiempo que el tubo tenga cierto estado de compresión que permita que los extremos unidos no sufran los esfuerzos de tensión por futuros cambios de temperatura y en consecuencia efectos de dilatación - contracción.

Una vez acopladas y descendidas las tuberías deben quedar sin sufrir esfuerzos que causen tensiones excesivas y con el suficiente acolchonado de tierra alrededor. Las tareas de unión son casi en todo sentido iguales a las normales del resto de la traza, con la excepción que alinearemos los extremos de los tramos con alineadores de tipo externo en lugar de los internos y la evaluación de la soldadura será realizada por técnica de doble pared o exposición externa. La cuadrilla designada a trabajar las uniones estará conformada por los trabajadores más experimentados que realicen la labor de unión sin sobreesforzar la tubería en la soldadura y el descenso, pero al mismo tiempo elaborando uniones seguras que satisfagan las pruebas radiográficas y pruebas de detección de fallas en el revestimiento.

Los supervisores en las uniones revisarán que:

- La soldadura se haya realizado según los procedimientos establecidos.
- La manipulación de la tubería y extremos sueltos de los tramos sean satisfactorios, impidiendo el daño a la tubería y al revestimiento.
- Los extremos son alineados y soldados sin ejercer excesiva fuerza, dejándolos con suficiente holgura tras completarlos.

- Las demás tareas (revestimiento, radiografiado, relleno, etc.) sean realizadas conforme a las estipulaciones. La integridad de la tubería debe estar garantizada y cualquier daño reparado antes del relleno.

## **XVI.- Trampas de raspadores - limpiadores e instalaciones y accesorios**

Las trampas son instalaciones de lanzamiento y recepción de raspadores - rascadores o chanchos, ubicadas en superficie al inicio y final de la línea o de tramos en lugares que dividan la continuidad del ducto. Son pedazos de tubo con accesorios (niples, válvulas, bridas, venteos) que se usan en:

- La limpieza de la tubería incrementando la eficiencia de la línea.
- La medición y registro de cualquier restricción o deformación del tubo como dobleces o abolladuras.
- La remoción del agua después de una prueba hidrostática.
- La inspección de la tubería internamente para la detección de cualquier pérdida de espesor.

Se colocan trampas al inicio y al final de las líneas, tanto en la planta de separación como en los pozos, siendo primordial la colocación de trampas en el control de tacos para la línea de recolección por la presencia de líquidos que acompañan al gas.

Los principales componentes de un ensamblaje de trampas son:

- a) Barriles para los chanchos que pueden ser usados como lanzadores o receptores. Cuando son lanzadores deben tener al menos 1 ½ veces la longitud del chancho más largo a enviar (limpieza, inspección), escogiendo el diámetro entre 1 a 2 medidas más del Ø nominal “NPS” y se les equipa con una serie de conexiones bridadas para válvulas de entrada de gas (impulso) y drenaje (líquidos). Las bridas para gas están en el lado cercano a la entrada del chancho y las de drenaje en la parte inferior (por gravedad), otras bridas son dispuestas para medición, purgado, venteo en la parte superior y cercana a la entrada; cerca a la brida de la línea se coloca una reducción con terminación en el “NPS” de la línea de gas con un indicador de pasaje del chancho “pig sig”. Los tubos escogidos para la fabricación del barril son usualmente sin costura y soportan los requerimientos de presión del ducto.

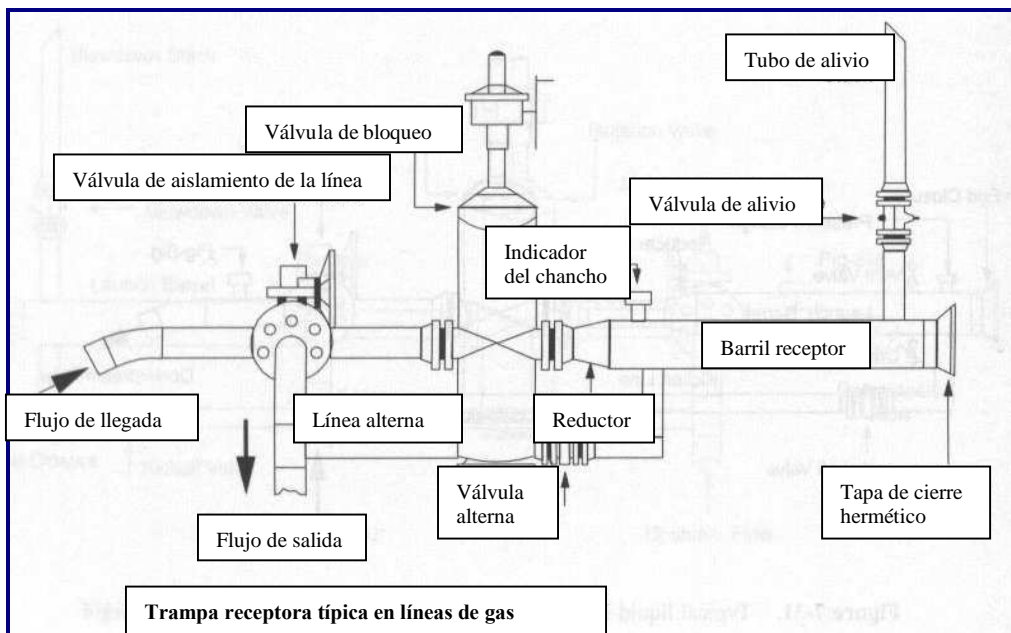
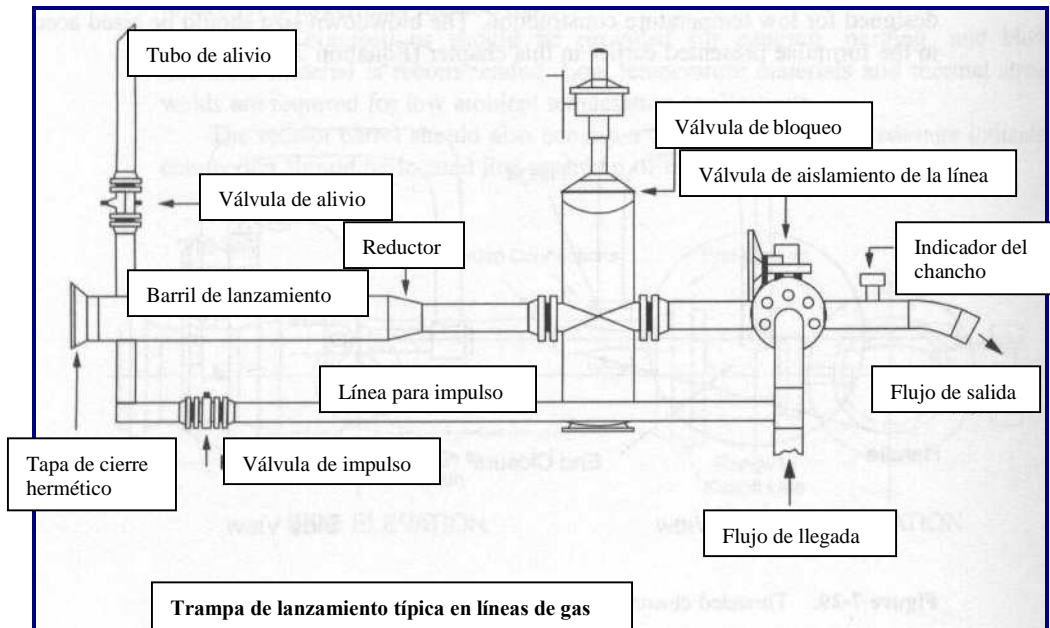
En el caso de los receptores deben ser al menos 2 ½ veces más largos que el chancho más grande, en previsión de correr chanchos en serie o para limpieza por la cantidad de desperdicio recolectado. Al igual que los lanzadores tienen 1 a 2 medidas más de “NPS” y son equipados con bridas para líneas de by-pass (salida de gas cerca a la entrada desde la línea principal), drenajes, medición, purgado, venteo e indicador a la entrada del chancho. Para ambos casos se coloca en los extremos

opuestos a la línea, una tapa de cierre rápido para colocación - extracción de los chanchos con seguro en caso que el barril se encuentre presurizado.

- b) Válvula de aislamiento que debe ser de bloqueo para aislar el barril de la línea principal con sello hermético. Para efectos de protección catódica la brida de la válvula hacia la línea debe separar eléctricamente el cuerpo del barril del resto de la línea (brida de aislamiento eléctrico).
- c) Válvula de entrada de gas que se usa para lanzar al chanco y por lo tanto ubicada cerca de la entrada, controlada manualmente para lanzar el chanco lentamente.
- d) Válvula de salida de gas, similar a la de entrada pero instalada en el receptor. Debe estar colocada en un punto cercano al reductor de manera que permita el paso del chanco hacia el barril y luego reduzca la presión, no siendo estorbada por el chanco y reduciendo su velocidad.
- e) Válvula principal de aislamiento usada en las conexiones entre receptor y lanzador en estaciones con barriles intermedios. La válvula permite cortar el flujo en una situación de emergencia aislando un tramo de tubo.
- f) Válvula de venteo y ensamblaje.
- g) Válvula de drenaje localizada en la parte inferior de los barriles y conectada a un tanque, usada en líneas de líquidos como también para líneas de gas con contenido de líquidos, siendo pequeñas (2" - 4").
- h) Curvas en el ensamblaje de trampas que deben cumplir los requerimientos para la circulación de chanchos con un radio mínimo de tres veces el DE de la tubería (chanchos de limpieza o de baches), pero para chanchos con instrumentos electrónicos el requerimiento puede ser mayor.

Medidas de las trampas: la tubería de 20" estará compuesta de 2 cuerpos de tubería uno menor de 20" próximo a la brida que lleva a la tubería seguido de un cuerpo de 24" (barril), para el ducto de 16" el cuerpo menor será de 16" seguido por otro de 20" (barril). El cálculo de los espesores de ambos cuerpos se verá en la sección correspondiente.





## XVII.- Limpieza de traza (clean-up)

Antes de terminar las labores de construcción se procede a la limpieza de todas las áreas por donde se ha trabajado abarcando desde la restauración del DDV, de los espacios de trabajo y rutas de acceso utilizadas, remoción de tierras, rocas y desperdicios luego del relleno, remoción de puentes y campamentos, medidas para control de erosión hasta la recolocación de la capa superficial del suelo. Algunas de estas labores (como la remoción de puentes y campamentos) son llevadas a cabo después de las pruebas de presión en las tuberías y junto con la limpieza dejamos marcadores indicando progresivas y señales para ubicar el tubo o particularidades del mismo como cruce entre tubos, protección mecánica adicional, mayor profundidad, etc.

La inspección asegurará que:

- Los sobrantes de rocas y tierras y los detritus sean removidos y colocados en los botaderos.
- El movimiento de desmonte y su acumulación en botaderos deben ser aprobados por las CCNN, colonos y autoridades.
- La capa superficial de terreno sea distribuida en toda la traza para propiciar su revegetación.
- Las medidas de control de erosión de la vía y específicamente del área en donde se trabajó la zanja sean llevadas a cabo.
- Los árboles dañados, podridos o inclinados con tendencia a caer sean removidos.
- Cualquier material de desecho relacionado a la construcción (herramientas, pedazos de tubería, etc.) sea removido, no dejando ningún desperdicio que pudiera perturbar o generar algún tipo de impacto ambiental.

#### **XVIII.- Control de erosión:**

Una de las labores que tiene mayor significado en la restauración y limpieza es el control de erosión, que es paulatino y comienza con un cuidadoso planeamiento en las primeras fases de construcción, continúa durante el desbroce y nivelación de terrenos y adquiere mayor importancia en la parte final para dejar el DDV lo menos perturbado y más estable posible.

Como objetivos prioritarios, el DDV al final debe presentar buenas condiciones estéticas y estabilidad y a la vez asegurar una adecuada protección de los tubos tendidos. Igualmente los cruces de cuerpos de agua o algún otro obstáculo notable serán restaurados de manera que las actividades de construcción antes realizadas no afecten el libre curso o relación con el medio en el que se ubican. Para este fin:

- Se asegurará que la nivelación suficiente se logre en pendientes empinadas para su estabilidad.
- Se determinará la ubicación de diques de contención en zanja, subdrenajes, canales transversales y laterales y otros trabajos de control.
- Se evaluará la colocación de gabiones en cursos rápidos de agua.

Algunas pautas generales en el diseño de trabajos se presentan a continuación

**Diques de contención:**

INCLINACION LONGITUDINAL DE LA PISTA (°)	DIQUES EN EL INTERIOR DE LA ZANJA				
	DISTANCIA (m)	DIMENSIONES (m)		ESPECIFICACION	
		F	E	TIPO DE SUELO	MATERIAL DEL DIQUE
> 10 a 15	30	1,60	-----	Local seleccionado	Suelo seleccionado compactado o bolsas de suelo cemento SC-3
> 15 a 20	25	1,60	-----	Local seleccionado	Suelo seleccionado compactado o bolsas de suelo cemento SC-3
> 20 a 25	20	1,60	0,30	Local seleccionado	Bolsas de suelo cemento SC-2 ó SC-3
> 25 a 30	15	1,80	0,30	Local seleccionado	Bolsas de suelo cemento SC-2 ó SC-3
> 30 a 35	10	2,00	0,30	Local seleccionado	Bolsas de suelo cemento SC-2 ó SC-3

NOTAS:

- 1) La construcción de diques debe ser justificada en función de las condiciones locales.
- 2) Suelo local: es el proveniente de la excavación de zanja.
- 3) Suelo seleccionado: idem, zarandeado y libre de piedras.
- 4) SC-2: suelo cemento elaborado con suelo seleccionado utilizando un mínimo en volumen de 12 %.
- 5) SC-3: suelo cemento elaborado con suelos locales seleccionados, utilizando un mínimo en volumen de 8%.
- 6) Para declives iguales o inferiores a 10° no es necesaria la construcción de diques.
- 7) Para declives superiores a 35° se requerirá un estudio específico de la cobertura de zanja.

OBSERVACIONES:

Los diques serán encastrados aproximadamente 30 cm. en las paredes laterales de la zanja.

Cuando haya drenajes no serán interrumpidos por los diques.

Para la ejecución de los diques, serán utilizadas bolsas de malla abierta para suelo cemento.

### **Canales transversales:**

Son aquellas que cumplen con la recolección y conducción de aguas de las partes superiores de taludes y subsuelo a las canaletas longitudinales. La pendiente de las canaletas no será mayor a 10°.

Los tipos de canaletas de drenaje y sus respectivas dimensiones surgen en función de la inclinación de la rampa, según se indica en la siguiente tabla:

INCLINACION DE RAMPA (°)	TIPO	DIMENSIONES MINIMAS		DISTANCIA ENTRE CANALETAS TRANSVERSALES (m)
		ANCHO (cm)	ALTO (cm)	
Menor a 20 en suelo no erosionable	Moldeada en terreno revestido en suelo local seleccionado	60	30	12
Entre 20 y 30, y menor a 20 en suelo erosionable	Moldeada en terreno revestido en suelo cemento	60	30	9
Mayor a 30	Premoldeada	30	30	6

Como complemento a estas labores se escogerán especies de la zona, pasto natural o vegetación que cubra rápido el terreno en reemplazo de la vegetación preexistente.

Las labores de control de erosión que se aplicarán según las zonas serán:

- En toda la traza, la reconstitución de la capa superficial del suelo para recuperar la capacidad productiva de los suelos y promover una rápida reforestación.
- En quebradas, se requiere de drenajes, desagües escalonados, canales longitudinales que transporten agua hacia las quebradas y diseño de alcantarillas que eviten la profundización gradual de los cauces de las aguas.
- En zonas de pendientes, se construirán cortacorrientes, canaletas transversales a la pista que recolecten el agua de lluvia (forma V para pistas en media ladera y entre laderas), desagües escalonados que quiten energía a la corriente para acarrear finos cuesta abajo y badenes como zonas de tránsito en pista que permitan la recolección de aguas.
- En zonas de abismos para ayudar al mantenimiento del ancho del DDV, entablillados que ayuden a la estabilidad de pista a los costados, canaletas para drenaje longitudinal hacia los costados, cajas de pasaje, salida y amortiguación de flujo y trincheras con protección de mantas y/o geomembranas a los bordes de los abismos que no se erosionen ante el

rápido flujo de las aguas de lluvia, estableciendo el medio de transporte del agua hacia las partes más bajas.

- En la zona de eje de las tuberías para protección de lo que fue la zanja, se construirán diques de suelo cemento, cortacorrientes y canales transversales con base de suelo cemento u hormigón pobre que transporten el agua fuera de la pista.
- En ríos y arroyos de curso permanente, al haber constante erosión de taludes se colocarán diques de contención de aguas y gabiones

## **XIX.- Pruebas de presión:**

La prueba final que demuestra la calidad del sistema construido es la prueba de presión. Revelará si hay fugas que corregir y dejará los ductos listos para la fase de operación luego que hayan sido limpiados y secados.

### **1) Instrumentos, equipos y materiales:**

La siguiente es una lista no excluyente pero representativa de una serie de equipos, instrumentos y materiales a usarse en pruebas hidrostáticas. Los equipos son proporcionados en un número que dependerá de la cantidad de tramos y líneas a probar y del margen de equipos de reserva e instrumentos y materiales de repuesto. Todos los equipos deben estar debidamente certificados y calibrados asegurando así una precisión en la medición, registro y operación de la prueba, según se indica:

- Materiales de limpieza, raspado y separación de fluidos, son los que se encargan de la limpieza y raspado para descongestionar la tubería en su total extensión, despojarla de desperdicios y pequeños materiales y servir como bache de separación entre aire y agua en la fase de llenado; para descongestión, medición de diámetros y separación usamos chanchos, para raspado y rascado, raspadores “scrappers”. Seleccionados al tamaño del tubo pueden incluir instrumentos especializados como calibradores, medidores de diámetro y espesores y sensores para la localización que recolecten datos y ayuden a conocer la posición del chanco mientras se mueven a lo largo del tubo.
- Conexiones temporales, son todas las uniones, tubos, centralizadores, válvulas, medidores de presión, accesorios, trampas, etc. que ayudarán a la ejecución de las labores.
- Bombas de presurización, son bombas tipo pistón que irán elevando la presión desde los cabezales presurizando la línea a un ritmo planificado, la bomba debe poseer un contador de golpes o pulsos que ayudará a registrar el aumento de presión por volumen de inyección a cada golpe, por lo que las dimensiones de sus pistones así como carrera son conocidos con precisión y no deben tener fugas que distorsionen datos. La presión máxima que pueda proporcionar la bomba debe exceder la presión de prueba al menos en 100 psi o ser un 20% superior, como

medida de seguridad se usan válvulas de alivio para limitar la presión que se aplicará a la tubería.

- Bomba de llenado, permitirá el llenado de agua en la tubería a flujo constante y sin interrupciones, la velocidad de llenado se estima en 0.35 km./hora y proporcionará una presión que supere la altura entre el punto de llenado y el punto más alto del tramo.
- Bombas de extracción, colocadas en las fuentes de agua son sumergibles y aseguran un caudal constante de entrega a la bomba de llenado.
- Tanque de agua, sólo en caso que no haya fuentes de agua se proporcionará como fuente de abastecimiento continuo, no será necesario por la cantidad de fuentes de agua que hay en la traza.
- Balanza de pesos muertos, es instrumento de medición y calibración para otros instrumentos de medición de la presión, se necesita uno adecuadamente calibrado y certificado y debe permitir lecturas con precisión por debajo de 1 psi (pesas calibradas para tal fin) y con un rango mayor que la presión máxima a producirse en la prueba. La precisión de medición debe ser de 0.1% entre los 10°C a 30°C.
- Instrumento registrador de la presión, es un disco que registra la presión con respecto al tiempo en hojas circulares usualmente graduadas para un tiempo de 24 horas, la graduación de la presión en la hoja permitirá lecturas visibles y entendibles por lo que registrará como mínimo 125% y como máximo 200% de medición en exceso a la máxima presión esperada. Adecuadamente calibrado su fiabilidad será puesta a prueba por la balanza de pesos antes y después de la prueba.
- Manómetros, instrumentos de medición de la presión para el rango esperado de prueba, normalmente se escoge del tipo Bourdon de 6" de diámetro, con divisiones de 10 psi a menos y deben tener 25% de presión superior (como mínimo) a la presión de prueba.
- Medidor de caudal, destinado a la medición de caudales de llenado en la tubería
- Termómetros, son para registrar la estabilización de las temperaturas en las tuberías, se usan del tipo de vidrio para laboratorio graduados entre 30°F a 120°F con 3" de inmersión. Por su uso en campo se recomienda los protegidos en armadura.
- Termómetro de lectura remota, es un instrumento especial tipo Bourdon de dimensiones especificadas que mide la temperatura con un bulbo de gran longitud (5') para lugares de difícil acceso, se usará en la medición de la temperatura del terreno en profundidad a la cual está enterrada la tubería. Son de gran precisión, amplio rango (ejemplo, graduaciones de 1°F con rango de -49°F a 150°F) y registran lo medido.

- Compresores de aire, usados para impulsar chanchos limpiatubos y bombas. El aire para impulsar los chanchos debe estar libre de aceite.
- Filtros de agua, son usados a la entrada o recepción de agua, especialmente aquella que viene de fuentes naturales (ríos, arroyos) y que pueda traer algún desperdicio que estorbe la acción de los equipos y accesorios. Normalmente se escogen filtros de 100 mesh para la remoción de sólidos, aunque dependiendo del grado de control podemos elegir filtros más pequeños.
- Inhibidores, son químicos usados para inhibir ciertas propiedades químicas que pueden afectar la tubería, la clase y cantidad dependerá de las características del agua.
- Inyector de inhibidores, es una bomba que en cantidades controladas inyecta las cantidades requeridas de inhibidores en el agua.
- Equipos de comunicación, que permitirán la comunicación de extremo a extremo de la cañería en prueba, debe probarse su estado óptimo para cualquier comunicación y emergencia que pueda surgir.
- Agua para la prueba, será obtenida de alguna fuente natural y en la selva las fuentes de agua son abundantes por lo que el agua puede ser obtenida del río o arroyos, con el suficiente caudal que asegure constante abastecimiento sin tener que transportarla (se pide que el caudal de llenado sea menos de 1/3 de la fuente para no secarla). El agua de prueba requiere cierto tratamiento químico que inhiba sus propiedades corrosivas dañinas para la tubería.

## **2) Tratamiento químico:**

El tratamiento químico propuesto para el agua de prueba prevendrá dañar la tubería y evitará cualquier daño ambiental producto de la descarga a la naturaleza. Las bombas que inyectarán los inhibidores lo harán en contra del flujo antes de la entrada a las bombas de llenado para así permitir una mezcla homogénea en toda la longitud del tramo a probar. Cuando se tiene que probar varias líneas sucesivamente y evitar tener que extraer más agua de la fuente de abastecimiento se reutiliza el agua, antes de trasladarla de una línea a otra se hace el análisis químico que pruebe que las propiedades brindadas por los inhibidores se mantienen o de lo contrario se inyectarán nuevamente; revisando además que los desperdicios del primer ducto no sean transferidos.

El agua de prueba debe estar libre de partículas más grandes que los 50 micrones y debe tener un pH entre 7 y 8, en caso contrario el agua no podrá ser usada; previo a las pruebas un análisis del agua medirá las concentraciones de químicos que pudieran producir corrosión bacteriana y acción biológica sobre las paredes internas del tubo que no tienen revestimiento. Se busca encontrar bacterias del hierro que lo usan como combustible metabólico, creando huecos y a la larga reducción localizada de espesores, y/o del sulfuro,

porque tales bacterias reducen varios tipos de sulfuros a sulfato de hidrógeno causando similares problemas a los anteriores por deposición de biomasa.

Los constituyentes analizados y sus cantidades superiores límites deben ser: concentración de sulfatos hasta 42 ppm, concentración de ácidos grasos hasta 14 ppm y concentración de amonio hasta 3 ppm. La corrosión por oxígeno disuelto en agua al ser despreciable se considera aceptable.

Una comparación de las calidades de agua de llenado es la siguiente:

Tipo de fuente	Agua fresca				Agua de mar		
<b>Actividad biológica</b>	Dentro de límites especificados		Fuera de límites especificados		Siempre fuera de los límites especificados		
<b>Son aceptables los productos de corrosión</b>	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO
<b>Duración de contacto</b>	< 24 meses	< 24 meses			< 1 mes	> 1 mes y < 24 meses	< 24 meses
<b>Biocida / secuestrante de oxígeno</b>	Ninguno	Ninguno			Ninguno	100 ppm de glutaraldehído o 100 ppm de THPS con 100 ppm de bisulfito de amonio y sin secuestrante de oxígeno	100 ppm de glutaraldehído o 100 ppm de THPS con 100 ppm de bisulfito de amonio y sin secuestrante de oxígeno
<b>Ajuste de pH</b>	Ninguno	Hidróxido de sodio Bicarbonato de sodio			Ninguno	Ninguno	Ninguno

### 3) Tipos de prueba para tuberías de gas:

La tubería es expuesta a 2 tipos de pruebas:

**Prueba de resistencia:** somete a la tubería a la mayor presión de prueba de tal manera que genere un esfuerzo del 90% del límite elástico de deformación “SMYS” o 1.25 la máxima presión de operación permitida “MAOP” en el punto de mayor cota altimétrica. Se especifica que debe durar 8 horas y probará que el tubo tiene la resistencia suficiente para aguantar las presiones de operación más altas sin deformarse ni debilitarse.

**Prueba de hermeticidad:** es realizada a continuación y a una presión 10% menor que la anterior, la prueba dura el doble (16 horas) y comprueba que la tubería bajo servicio continuo soportará esfuerzos que a la larga no degenerarán en roturas.

### 4) Ejecución de la prueba:

Los pasos de desarrollo son:

1. Preparación de la prueba.

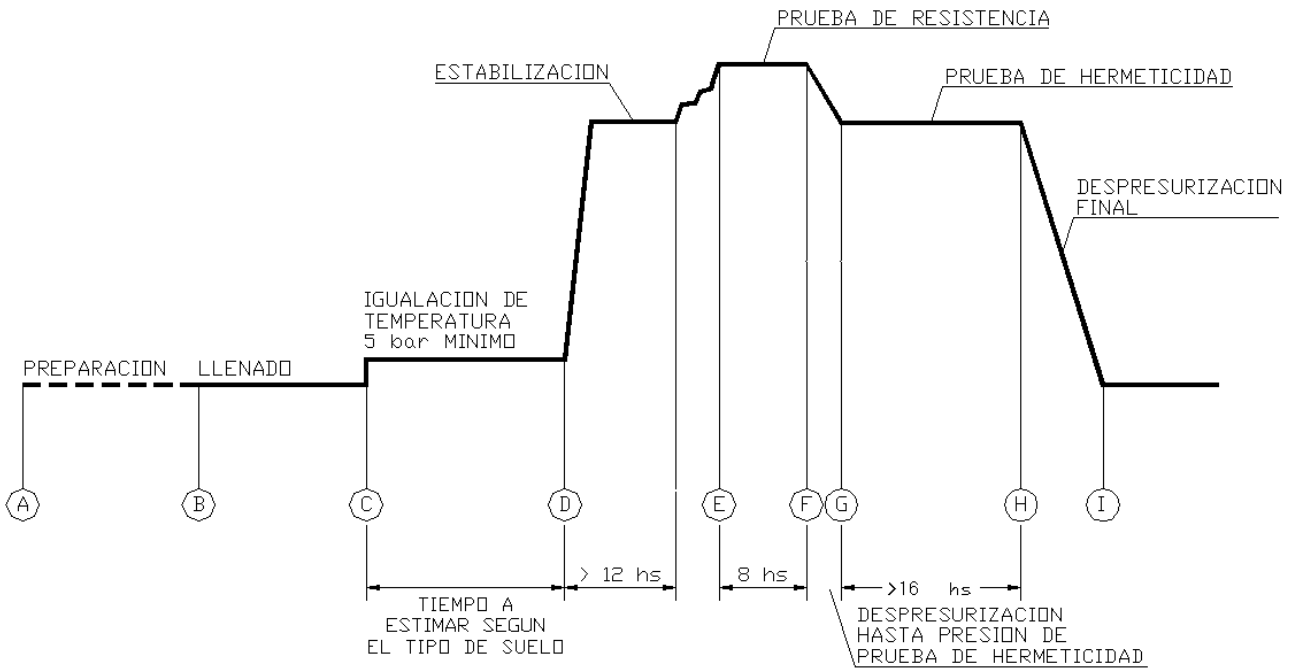


2. Limpieza interna de la cañería.
3. Llenado de la cañería.
4. Igualación de temperatura.
5. Presurización – estabilización de la presión.
6. Prueba de resistencia.
7. Prueba de hermeticidad.

***Preparación de la prueba:***

Son las actividades previas que abarcan la planificación, preparación y coordinación con anticipación de 2 ó 1 día como mínimo; con planes detallados de cómo se efectuará la prueba, las distancias a evaluar, perfiles de presiones, los equipos, materiales e inhibidores y las fuentes de donde se obtendrá el agua.

Para la prueba, los extremos a ser probados han sido dejados libres por la cuadrilla de uniones con el resto del gasoducto descendido y tapado, excepto los sectores donde existan válvulas que serán probadas separadamente, tramos finales del tubo conteniendo trampas de chanchos y válvulas de bloqueo. El resto de tramos que van por debajo de quebradas, ríos y arroyos así como los cruces aéreos son probados y tratados sin separación en la prueba final. Los tramos aéreos recibirán protección para minimizar los efectos de fluctuación térmica ambiental e igualar las temperaturas que se experimentarán en el resto del ducto enterrado una vez que se haya estabilizado la temperatura. En el presente caso se usarán 2 trayectos para la prueba, ambos separados por el río Camisea (al no haber válvulas intermedias) que servirá para el abastecimiento del agua; las trampas en planta como en pozos y sus accesorios serán probados separadamente. Los cálculos para justificación de la prueba se encuentran en la sección de cálculos.



Todos los accesorios adicionales para la prueba (bridas, válvulas, conexiones, lanzadores, etc.) deberán resistir presiones mayores que la línea, los cabezales requieren especial atención y deberán ser cuidadosamente probados previos a su colocación al 140% de su presión de diseño, y la presión equivalente al 90% de su límite elástico debe superar a la presión de prueba máxima en la línea; similares medidas se tomarán con los accesorios que acompañan al cabezal.

Las actividades en la preparación son: la colocación de bombas de llenado y de extracción en posición que impida recoger detritus y a un desnivel tal que impida la succión de bolsas de aire, tendido de líneas, filtros y mangueras para la conexión de las partes por donde circulará el agua desde su punto de extracción hasta los cabezales, instalación de los cabezales temporales con niples para válvulas e instrumentos, calibración y colocación de instrumentos medidores de presión y temperatura. El bulbo del termómetro de lectura remota irá enterrado cerca de la tubería a su mismo nivel o más profundo, a una distancia de al menos 50 m. de donde la tubería se adentra en el terreno y donde está la demás instrumentación.

### **Limpeza interna de la cañería**

Para esta actividad enviamos los primeros chanchos que cumplirán diferentes funciones como dimensionamiento, medición de la geometría interna y limpieza de la tubería. Para el dimensionamiento se usan chanchos especiales con discos de aluminio frontales alrededor del cuerpo, de hasta el 95% el DI del tubo que serán evaluados si retornan con abolladuras o marcas significativas que indiquen puntos salientes de contacto (de pedazos de soldadura, angostamiento del tubo por mala manipulación, doblado exagerado, etc.), como estos chanchos son susceptibles de quedar atascados se les envía con detectores o sensores. Los chanchos de medición de geometría interna

“caliper” poseen marcadores o pequeñas palancas fuera del cuerpo montadas en copas que envían señales a un registrador, midiendo las irregularidades en el DI del tubo con precisión; al tener marcadores sensibles éstos se adaptan a la forma de la superficie interna permitiendo el paso fácil del chanco. Los chanchos de limpieza o rascadores llevan cepillos raspadores en su superficie que: removerán las partículas y desperdicios de óxidos, pedazos sueltos de tierra y en toda su longitud, cepillarán áreas en corrosión que impidan una adecuada acción de los inhibidores (si un sector ya está corroído se necesita de otros químicos) y para liberar de irregularidades la superficie interna del tubo que puedan inducir a acumulación de impurezas donde la corrosión se puede concentrar o el flujo ser alterado.

Los instrumentos a enviar están en función del grado de limpieza que se quiera obtener, pero típicas prácticas de limpieza son el envío de raspadores con baches de agua que al raspar el tubo permiten que parte del agua vaya hacia adelante del raspador, manteniendo en suspensión relativa los desperdicios raspados (flujo turbulento) y llevándolos fuera por acción repetida. Si se quiere mayor efectividad se usarán geles con retención en suspensión mayor que el agua y con el uso de solventes se removerán cualquier rastro de ellos. Cabe resaltar que también el simple llenado de agua puede ser suficiente para aproximarnos a una buena limpieza previa a la prueba hidrostática.

### ***Llenado de la cañería***

El llenado sólo procederá cuando no haya ningún chanco enviado en el tubo, antes de iniciar se mide y registra la temperatura tanto del tubo como del agua (datos iniciales).

La idea básica es impedir la acumulación de burbujas de aire en el frente de agua que llena la tubería y que haría que el agua sobrepase al aire sobretodo en cuestas abajo, acumulándose bolsas de aire en las crestas y puntos altos, impidiendo una adecuada presurización de la tubería y pudiendo ocasionar accidentes por re presurización de las bolsas en puntos susceptibles de fugas. Podemos eliminarlas con válvulas de venteo en puntos altos, pero en líneas de larga longitud y topografía accidentada serían demasiadas y quitarían integridad al tubo. Con un adecuado empuje de chanchos guías frontales a la columna de agua expulsaremos el aire del caño.

Se colocan 3 chanchos en el punto de llenado, 2 para purgado y 1 para desagüe, luego primero se inyecta un volumen de 100 m. de agua para lubricar la entrada del 1er chanco, a continuación bombeamos otros 100 m. de agua detrás del cual viene el segundo chanco que es empujado por la columna de agua que llenará la tubería expulsando el aire, la columna de agua es impulsada por la bomba de llenado a velocidades de 0.5 milla por km; el 2<sup>do</sup> chanco no debe separarse de la columna de agua sobretodo en cuestas empinadas hacia abajo, ya que el peso del agua puede empujar al chanco creando una zona de baja presión y la posterior acumulación de burbujas de aire, la línea de venteo en el cabezal receptor estará abierta parcialmente creando una contrapresión que empujará al chanco hacia la columna de agua impidiendo separaciones y permitiendo el llenado a caudal y presión constante

por lo que la alimentación de agua debe ser constante, estable e ininterrumpida.

Las temperaturas son registradas progresivamente en el tubo y en el agua, en los cabezales las líneas de purgado se mantienen abiertas para la salida del aire y así continúan algún tiempo después de la llegada de los chanchos purgadores comprobándose que no sale más aire por la línea. Como medida de limpieza el agua que entra debe ser tan clara como la que sale y ser almacenada en un tanque para evitar contaminación. Cerrada la línea de venteo el tubo se presuriza hasta 5 bar con el uso de la bomba de llenado, se cierra la válvula de entrada, se retira la bomba y procedemos a conectar la bomba de presión conjuntamente con los instrumentos de medición de la presión y el registrador en cabeza de entrada.

### ***Igualación de la temperatura***

Determinado por las mediciones de temperatura, se espera un tiempo prudente en donde se observa la igualación de temperaturas a lo largo del ducto; el proceso de igualación de temperaturas se justifica porque sus variaciones podrían conducir a registrar valores erróneos en las presiones porque inducen a variaciones de volumen.

La igualación es registrada por los termómetros colocados uno en contacto con el tubo por lo menos a 50 m. de donde entra en contacto con el terreno y otro en un punto separado al menos 50 cm. del tubo a la misma profundidad de tapada. Inicialmente se toman 3 lecturas en intervalos de una hora y se considera lograda la igualación cuando la diferencia de lecturas simultáneas entre termómetros llega a ser menor de 1°C a una presión de 20 bares en el ducto, luego la presión se reduce a 5 bares desde donde comenzará el proceso de presurización.

### ***Presurización - estabilización de la presión***

Luego de igualar las temperaturas se prepara la estabilización de presiones y se evalúa y elimina las cantidades de aire que pudieran existir en la línea y que no expulsó el llenado. La bomba elevará la presión en el tubo hasta un 80% la presión de la prueba de resistencia gradualmente con incrementos de 5 bares (1 bar = 14.53 psi), registrando el incremento en función del volumen agregado al tubo basado en el conteo de golpes que generó la bomba para alcanzar la presión. La teoría indica que en el tiempo y con el incremento gradual y homogéneo la tubería sufrirá deformación elástica la que es proporcional al volumen inyectado. Por lo tanto de los datos de conteo de golpes que se recolectan cada 5 bares un gráfico volumen (golpes) contra presión debe ser lineal. Al haber incrementos de presión el aire que ha quedado atrapado será disuelto e inicialmente el gráfico tendrá un aspecto curvo que se irá normalizando hasta alcanzar la recta deseada. Cuanto más grande es la parte curva mayor es la cantidad de aire atrapado y según el especialista, se tendrá que eliminar con el pasaje de un chanco adicional o se dejará porque es insignificante; usualmente con 500 o 600 psi bastará para alcanzar la recta en la gráfica.

Otro método más cuantitativo es la evaluación de volúmenes a inyectar por medio de fórmulas, calculando los volúmenes a adicionar hasta las presiones requeridas o el número de golpes por cada bar de presión y se comparan con los resultados. Una diferencia notable indicará que algo anda mal, si el volumen adicionado excede con notoriedad lo calculado el aire atrapado está reduciendo primero su volumen antes que se ejerza suficiente presión sobre las paredes del tubo, requiriéndose más volumen para llegar a la presión planeada. Si lo adicionado es menor a lo calculado indica un error en este y hay que proceder a la revisión de datos y cálculos. Las fórmulas utilizadas son explicadas con amplitud en la sección de cálculos.

Al exponer el tubo por primera vez a presiones notables cualquier falla o defecto que pudiera inducir a su ruptura será notado. De romperse la línea entrará aire y el agua escapará evitando la presurización, por lo que se debe ubicar la ruptura, proceder a su reparación y volver a repetir los procesos hasta asegurar un satisfactorio purgado de la línea.

### ***Prueba de resistencia***

Con la tubería a un 80% de la presión de prueba adecuadamente purgada, todos los instrumentos en posición, las temperaturas estabilizadas y los registros con todos los datos, se dará inicio a la prueba de resistencia que llevará al tubo a resistir la máxima presión en su vida operativa y comprobar su integridad y buena construcción.

En el transcurso de la prueba la seguridad es una prioridad en previsión de las altas presiones que se manejarán y que podrían causar accidentes, por lo tanto los avisos de las operaciones a realizar serán coordinadas con los colonos, campesinos y nativos que pudieran transitar en alguna de las progresivas del tramo en evaluación. Algunas de las medidas que se pondrán en práctica no permitiéndose el paso de gente ni de tránsito, serán restricciones en el DDV y señales de aviso indicando explícitamente el manejo de altas presiones. Sólo personal a cargo de la prueba podrá transitar por el derecho de vía correspondiente al tramo presurizado.

Como primer paso se registran las temperaturas del medio y de la tubería y presión manométrica en el ducto, comenzando la presurización con la balanza de pesos muertos, los manómetros y el registro automático de presión registrando datos de ahí en adelante; se presuriza paulatinamente en volúmenes y presiones controladas, pequeñas y de valor constante que no permitan surgimientos repentinos. Al respecto se propone bombear la cantidad necesaria para elevar la presión en un valor constante entre 10 psi a 30 psi y contar el número de golpes usados para tal fin, registrando la presión mediante la balanza de pesos (el más preciso de los instrumentos) después de 5 minutos de parar la bomba; sucesivamente se continúa y recolectando datos se va configurando el gráfico volúmenes – presiones (anotando el tiempo) que debe revelar una recta. En todo momento se revisa que las conexiones en cabezales y bombas estén en perfecto estado sin fugas que alteren datos.

La bomba se detiene cuando se requiere más volumen de bombeo para llegar al incremento de presión planificado (indicaría falla en el sistema, fuga, aire atrapado o deformación excesiva del tubo) o cuando finalmente se llega a alcanzar los 1.25 de la presión de diseño (presión de prueba de resistencia). Habiéndose llegado a la presión de prueba, se toman medidas a los 10 minutos de parar la bomba para asegurar que la presión se mantiene y la temperatura es estable; se procede a cerrar todas las conexiones, buscar fugas, registrar inicio de prueba de resistencia en el disco de presiones y tomar el tiempo por las restantes 8 horas de duración de la prueba. En todo momento se registra la presión y temperatura y se revisa cada cierto tiempo el valor de presión con la balanza para comprobar la coherencia con los valores en registro.

Si hay aumentos o descensos en la temperatura cierta cantidad de agua (calculada) es desalojada o aumentada para mantener la presión de la prueba; si se recupera presión por este método el cambio se explica por variaciones de temperatura, de lo contrario algo está alterando la presión por lo que hay que buscar la causa. Las explicaciones a estas variaciones serán sustentadas y los volúmenes de agua usados así como los cambios de presión registrados.

Terminadas las 8 horas, se procede con la prueba de hermeticidad.

### ***Prueba de hermeticidad***

Reduciendo la presión aproximadamente el 10% la tubería es probada en su hermeticidad durante 16 horas, durante este lapso no se agrega ni se retira agua, pues interesa probar que la tubería no genera pérdidas por roturas que pudieran abrirse con el tiempo. Cada hora se registran los valores de presión en la balanza manométrica, presión manométrica y temperatura en la superficie del caño; las partes no enterradas y expuestas son vigiladas, igual que las conexiones para hallar fugas. Al cabo de las 16 horas, de no encontrarse pérdidas notables y significativas en la presión la prueba puede darse por terminada a satisfacción de ambas partes

Como evaluación de las pruebas hidráulicas queda el análisis final de las variaciones de la presión que pudieran haber ocurrido durante la prueba; de encontrarse fugas se procederá a su inmediata reparación. Comunes fallas como en el cordón de soldadura o en la costura longitudinal del tubo, son reparadas por la remoción total de una sección cilíndrica y su reemplazo con un pedazo de tubo de características técnicas similares; escapes en la superficie base del tubo serán cuidadosamente investigadas para detectar fallas en la fabricación de tubos y la remoción de la sección o del tubo entero será ejecutada. Para el caso de accesorios, válvulas y conexiones la completa separación del material es dispuesta por deducirse fallas mecánicas o metalúrgicas inherentes en la fabricación. Para todas las reparaciones, soldaduras, remociones se siguen los procedimientos de construcción, teniendo que superarse las inspecciones de soldadura y demás pruebas; la causa y ubicación de las fallas y el método de reparación serán ampliamente detalladas en registros e informes, los métodos de reparación como los parches no son considerados dentro de las buenas prácticas de reparación.

Luego de las pruebas un acta es levantada registrando el buen estado de las tuberías y su uso autorizado y certificado, por no encontrarse fallas y/o roturas o éstas haber sido reparadas.

## **XX.- Barrido de agua, limpieza y secado de tuberías**

Terminada la prueba la presión es lentamente liberada primero por medio de los venteos y luego por drenaje. Para tuberías de gas el barrido de agua se efectúa con el uso de aire comprimido o el mismo gas, como primer paso en la limpieza de un tubo que debe ser librado de cualquier rastro de líquido que vaya a contaminar el gas natural; la tubería no debe ser barrida con otros líquidos pues sólo reemplazaría un medio líquido por otro en un tubo que debe quedar seco. Al igual que la operación de llenado, el barrido debe evitar nuevamente la mezcla de agua y aire sobretodo en áreas de colinas como los de la traza. Un chanco irá guiando la columna de aire impidiendo que el aire escape por delante y llegue al agua que en tramos de descenso puede originar bolsas de aire; para que asegure total separación el sello entre tubo y chanco debe ser hermético, pero el chanco debe avanzar sin dificultad ni atascamiento siendo puntos críticos las curvas, los puntos con accesorios y secciones de tubería más gruesa (arroyos, ríos). Si la operación es bien planificada un buen barrido se obtendrá sin bolsas ni atasques, usándose varios chancos impulsados sin interrupción hasta que la cantidad de agua en el último sea mínima

Uno de los problemas a solucionar es qué hacer con el agua que ha resultado del barrido. Si el agua con aditivos químicos no va a ser reusada en otro tramo o tubo para otra prueba, tiene que ser dispuesta o removida de las tuberías hacia un lugar seguro donde no cause daño al medio ambiente o debe de probarse que los químicos fueron de acción temporal y se han degradado haciéndolos inocuos. El mayor peligro podría resultar en mezclar agua con aditivos y desperdicios de las pruebas con la de lluvia o de los torrentes que eventualmente llegarían a ríos y arroyos; otro impacto podría ser dejar charcos aislados de agua contaminada en contacto con especies de flora, fauna o inclusive nativos. Por lo tanto el agua será sometida a análisis de laboratorio que muestre si su contenido es peligroso y de serlo se buscará que remover los sólidos (con filtros o decantación en pozas) como sustancias dañinas (químicos), para neutralizar su efecto dañino; si no es posible, lo más probable es disponer del agua en contenedores y evitar cualquier contacto con el ambiente siendo una solución laboriosa por lo que siempre se busca usar aditivos inhibidores de rápido y fácil tratamiento. El análisis del agua como su disposición se hará siguiendo la norma ambiental aplicable.

La limpieza y el secado de las líneas son labores que se realizan de acuerdo a la clase del producto que transportarán las cañerías: los productos de destilación requieren altos estándares de limpieza por su uso y sus tuberías deben cumplir similar exigencia; crudo o productos refinados como diesel requieren simple barrido para evitar aumentar el contenido de agua; en el caso de tuberías de gas lo que se requiere es limpieza para evitar el óxido que aloje gotas de agua y secado que elimine gotas y reduzca los niveles de humedad para evitar formación de hidratos. Tanto la limpieza como el secado son

labores que se complementan y resultan de operaciones consecutivas o de una solamente.

Es un poco difícil definir que significa limpieza en una tubería como especificación general. En algunos casos se toman medidas del contenido de sólidos que acompañan a los chanchos y se fija un límite inferior a partir del cual el tubo se considera limpio, otros confían en la calidad de una buena limpieza química. En todo caso una buena limpieza debe poseer 4 cualidades:

- Mejorar la eficiencia del flujo proporcionando un tubo de paredes más lisas.
- Reducir la contaminación del gas transportado y evitar la formación de hidratos.
- Reducir el peligro de abrasión en instrumentos y accesorios.
- Facilitar el secado de las tuberías.

Hay 4 métodos principales de limpieza que se pueden usar combinados:

- a) Enviar un rascador con aire, gas o líquido; se usan varios rascadores impulsados con gas o aire para lograr un nivel aceptable de limpieza en un método que tiene la ventaja de ser barato, simple y dejar la superficie interior pareja y lisa o usando agua que es más efectivo (aunque deja al tubo mojado). Algo del agua hará bypass al chanco y mantendrá en suspensión los óxidos y desperdicios empujados; se pueden usar baches de agua (aislados por los chanchos) que moviéndose a una mínima velocidad de 3 pies/s asegurarán la remoción. Al igual que con el agua de pruebas se le debe dar un adecuado tratamiento; finalmente en vez de agua se puede usar gel que asegura una mayor suspensión.
- b) Limpieza por arena que desempeña a la vez funciones de limpiado y secado; ideal para tubos de pequeño diámetro, soplando primero arcilla en el tubo para absorber restos de agua y luego la arena para remover por abrasión todo resto de óxido y desperdicios. Se necesitan altas velocidades por lo que el limpiado sólo se efectúa en secciones cortas.
- c) Limpieza química; usado para líneas pequeñas produce una limpieza de muy buena calidad porque el químico entra hasta en los huecos más difíciles de llegar, usándose ácido clorhídrico, agua para remoción, un neutralizador y un lubricante (en ese orden) todos separados por chanchos. Requiere cuidado y medidas de seguridad especiales.
- d) Purgado con gas o aire seguido de un bache de líquido: se necesita gas o aire a alta velocidad y la remoción de desperdicios es pequeña, por lo que es poco aplicado.



Un método adecuado y simple es el de usar aire comprimido o gas con rascadores e ir observando cuidadosamente y pesando la cantidad de desperdicio extraída por vez hasta llegar al nivel deseado. La labor es minimizada si se realizó limpieza previa a la prueba hidrostática y si no se observan sedimentos expulsados con el agua de barrido.

El secado no significa sólo dejar la tubería sin agua sino el crear un ambiente seco y con un punto de rocío bajo, de manera que la humedad y la posterior operación con gas no generen gotas de líquido que en combinación producirán hidratos. Por su mayor presión, para la línea de inyección se escoge un punto de rocío de -40°F y para las líneas de recolección será de 0°F.

Los métodos de secado son:

- a) Aire seco: se usan primero chanchos de espuma que absorberán el agua remanente en la cañería y empujados por aire seco, para luego seguirles varios rascadores que removerán cualquier rastro de desperdicio conteniendo los últimos rastros de agua. Para remover el polvo dejado se usan nuevamente chanchos de espuma hasta que las cantidades de polvo con humedad remanente sean reducidos a un nivel aceptable, tomándose lecturas del punto de rocío. El secado con aire ofrece la ventaja de proteger al tubo de cualquier corrosión interna potencial si es que el tubo va a permanecer vacío por un cierto tiempo.
- b) Secado con metanol: se basa en el uso de las propiedades de absorción de la humedad que tiene el metanol, debiendo considerarse medidas especiales en su manipulación y disposición posteriores, además de ser costoso y peligroso por sus mezclas explosivas.
- c) Secado con nitrógeno: es similar al de aire seco.
- d) Limpieza con arena: ya descrito en la sección de limpieza.
- e) Secado con gas natural: su proceso es lento aunque económico porque el gas puede ser reusado para otros fines.
- f) Secado al vacío: es poco común y usado en operaciones costa afuera debiendo ser extraída de la tubería toda el agua antes de ser usado.

El método más indicado y simple es el de aire o de nitrógeno seco. Inclusive puede ser usado de una sola vez para dejar limpia y a la vez seca la tubería siendo además barato y de fácil manipulación. El aire introducido debe ser más seco que el punto de rocío esperado en la tubería y reflejar en el extremo de salida lecturas por debajo de lo requerido y con variaciones de punto de rocío no mayores a los 3° C. Si se requiere mayor grado de secado se puede usar aire superseco.

## **XXI.- Instalación de protección catódica**

Se coloca protección catódica a la tubería como sistema complementario de protección contra la corrosión en caso que el recubrimiento de polietileno falle en algún momento; se requiere de un sistema que pueda ser controlado periódicamente con salidas de corriente variables, por lo que el sistema más usado es el de corriente impresa. Los factores que debemos tomar en cuenta para la instalación de protección catódica son:

- a) Disponibilidad de potencia eléctrica.
- b) Disponibilidad de terreno.
- c) Resistividades del suelo.
- d) Planes futuros de expansión.

La disponibilidad de corriente debe ser evaluada en función de la lejanía a plantas o centros de generación eléctrica y puede ser realizada desde generadores termoeléctricos que requieren inspección y mantenimiento pero no constante abastecimiento de combustible. La resistividad del suelo afectará la performance del sistema directamente, una menor resistividad requerirá un menor voltaje de salida de la corriente impresa y proporcionará una mayor cobertura en términos de distancia. Por lo tanto terrenos húmedos clásicos en climas tropicales y de constante lluvia proporcionan un buen panorama para tener menores resistividades.

En el presente caso es fácil escoger las locaciones de los lechos anódicos y fuentes de corriente en los puntos de llegada y salida de los tubos (planta Malvinas, grupo de pozos) por la disponibilidad amplia de terrenos, la facilidad de mantenimiento – verificación (presencia de personal) y por sobre todo la disponibilidad permanente de fuentes de energía eléctrica, no teniendo que escoger puntos medios de la traza, alejados de campamentos y mantenimiento.

La instalación de un sistema de protección catódica tiene varias fases, siendo las siguientes:

1.- Instalación de equipos rectificadores.- Los rectificadores son equipos monofásicos manuales con alimentación de 220 V, permitiendo la salida de corriente continua; instalados próximos al lecho anódico deben estar resguardados de deslizamientos, agua de lluvia y otros movimientos, por lo que serán ubicados en un lugar seguro sobre una base de hormigón y tendrán una caja de interconexión que conectará los 3 componentes del sistema (tubería, rectificador y lecho anódico). Los cables provenientes desde el cátodo (tubería) tendrán aislamiento e irán enterrados desde el tubo hasta la caja de interconexión, usándose una zanja recubierta de tierra fina debajo y encima con protección de malla metálica para indicar la presencia del cable. Punto importante es la unión del cable al tubo, se hará con soldadura cuproaluminotérmica que permite tener una conexión muy segura y a prueba

de golpes. Este punto de unión – soldadura será recubierto luego para su protección.

2.- Instalación de lechos anódicos.- En el lugar de colocación para los lechos anódicos se realizará el marcado de la distribución de los materiales que yacerán, así como de las dimensiones de la zanja que irá a ser excavada; en los extremos del lecho anódico irán en la superficie dispersadores de corriente horizontal para drenar la corriente de alrededor del terreno hacia la superficie. Los ánodos preferidos para tuberías son los de aleación hierro - cromo – silicio en forma de varillones de 2” de diámetro y una longitud correspondiente al peso y volumen de consumo que se espera del ánodo (ver cálculos). Cada tipo de ánodo tiene un relleno recomendado que lo rodeará como el coque de petróleo calcinado; para proteger los ánodos de golpes y contacto con el terreno serán rodeados por el relleno y tubos camisa de mayor longitud. La conexión a los ánodos se hace por medio de cables que van conectados a uno de los extremos y de longitud suficiente para llegar al cable colector, debiendo la conexión cable – ánodo estar sellada con masilla; luego en la unión de los cables de cada ánodo con el colector se usarán grapas para asegurar la conexión y revestimientos de masilla para protección. El cable colector irá desde el dispersor hasta la caja de interconexión del equipo rectificador en una zanja con la misma protección de relleno en tierra y mecánica que la señalada para el cable catódico. Todos los cables deberán tener aislamiento con el exterior para evitar corrosión.

3.- Instalación de puntos de prueba.- Los puntos o estaciones de prueba son necesarios para el monitoreo o medición de los potenciales eléctricos en la protección catódica y ver si está siendo efectiva en toda la tubería durante su vida operativa. Las estaciones de prueba son colocadas cada cierto intervalo de la tubería (1.6 km.) y en lugares especiales (cruces de arroyos, ríos, etc.); las estaciones constarán de 2 cables para cada tubo (2 en caso que se desconecte 1) que irán conectados a un borne en cajas de medición permanente. Las mediciones que se tomen cada año revelarán con sus lecturas el estado del sistema; los cables conductores irán adjuntos a la tubería por medio de soldadura cuproaluminotérmica al igual que los cables catódicos en el sistema de rectificadores. Las cajas de medición serán colocadas sobre postes instalados en dados de concreto proporcionando estabilidad en su ubicación.

4.- Interconexiones de cañerías.- A efectos de realizar la mayor cantidad de interconexiones entre las tuberías para que el sistema se comporte como uno solo y proporcionar un solo sistema de protección catódica, se colocan cables de conexión entre cañerías en los lugares donde hay puntos de prueba (cada 1.6 km.).

5.- Pruebas y puesta en marcha.- Finalizada la instalación de todo el sistema debemos verificar si ha sido colocado apropiadamente y si funciona correctamente en la toma de medidas, comenzando con la verificación de las partes del sistema:

Rectificador y lecho anódico:

- a.-** Verificación de la alimentación al equipo rectificador.
- b.-** Corroborar el funcionamiento del equipo rectificador.
- c.-** Conexiones de entrada, salida y polaridad del rectificador.
- d.-** Valores de salida del rectificador.
- e.-** Verificar la resistencia eléctrica del circuito.

#### Aislamientos

Verificar el correcto funcionamiento de las juntas aislantes con el rectificador en funcionamiento, si el potencial a ambos lados es el mismo se tiene que reparar, también se podrá verificar el correcto funcionamiento del aislamiento por medio de un instrumento específico por radiofrecuencia.

#### Puntos de prueba:

- a.-** Verificar la numeración correcta de los puntos de prueba y posicionamiento con GPS.
- b.-** Mediante medición de potenciales ON se verificará que los cables estén correctamente soldados.

Una vez revisadas todas las partes del sistema se procederá a tomar medidas del potencial eléctrico antes de iniciar el sistema, es decir bajo condiciones naturales en que la tubería no está protegida por el sistema catódico.

#### Mediciones preliminares:

Antes de iniciar el sistema, en el ducto se realizarán las siguientes mediciones:

- a.-** Medición de potenciales naturales en todos los puntos de prueba del caño.
- b.-** En juntas aislantes se incluirá el potencial de ambos lados (protegido y aislado).

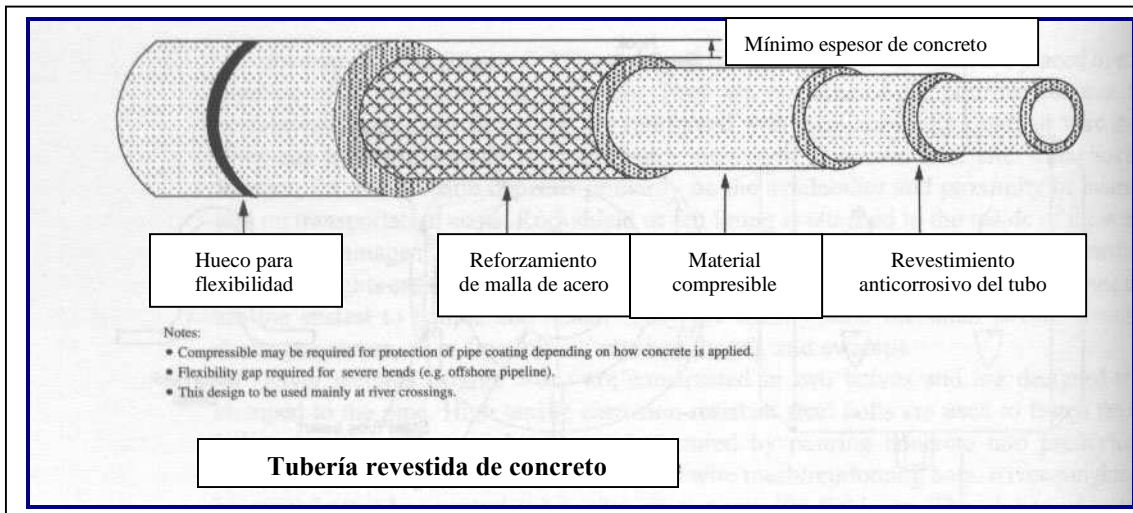
Realizadas las medidas procedemos a energizar el sistema que empezará a funcionar tan rápido como hayamos conectado la fuente de poder al rectificador, se tomarán nuevas lecturas de las diferencias de potencial y compararán con las anteriores tomadas sin el sistema a fin de saber si funciona y para regular la salida del rectificador.

#### Energización final del sistema:

- a. Se ajustará la salida del rectificador para obtener un potencial caño-suelo con sistema apagado ligeramente más negativo que  $-1.000$  mV.
- b. Se realizará la medición de potencial con el sistema apagado y en marcha en todos los puntos de prueba.
- c. En el caso de verificarse puntos sin protección adecuada o con interferencias, se volverá a ajustar un nuevo valor de potencial que corrija los posibles defectos.

**I.- Espesores de revestimiento de hormigón para lastrados de cañerías:**

**E**n los lugares donde existe un medio fluido estancado, en movimiento o en terrenos saturados de fluido como cruces de quebradas, ríos, pantanos, etc. donde se tenderá la tubería, es generada una fuerza de empuje. Para contrarrestar el empuje y mantener la tubería en una posición que no genere esfuerzos ni movimientos continuos, se usan diferentes métodos como la adición de pesos sobre la tubería o su inmovilización; la adición de pesos se logra con la colocación de revestimientos de concreto de diferente forma o por el relleno de la zanja con material cuando aquella está seca. La inmovilización de los tubos se hace por un sistema de anclaje mecánico en terrenos con fondo de cierta estabilidad y no son comunes para tuberías de gran diámetro.



Usualmente se resuelve el problema con la aplicación del revestimiento de hormigón alrededor de los tubos. Para el cálculo de espesores requeridos partimos de la siguiente condición:

$$\Sigma \text{Pesos} = 1.2 * \text{Empuje}$$

De acuerdo al principio de Arquímedes todo cuerpo sumergido en un fluido recibe un empuje ascensional igual al peso del líquido desalojado. Siguiendo al Libro de Ingenieros de Gas o "Gas Engineers Handbook" el peso total de la cañería recubierta y gunitada debe ser un 20 % mayor que la del medio sobre el que se ha tendido (condición inicial de arriba), donde los pesos que intervienen son los correspondientes a la cañería, el recubrimiento anticorrosivo y el revestimiento de hormigón.

Planteando las ecuaciones respectivas:

El peso de la cañería es:

$$\text{Peso cañería} = \pi \cdot \frac{D_c^2 - (D_c - 2e_c)^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_{ac}$$

El peso del revestimiento anticorrosivo es:

$$\text{Peso recubrimiento} = \pi \cdot \frac{(D_c + 2e_r)^2 - D_c^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_r$$

el peso del recubrimiento de hormigón gunitado es:

$$\text{Peso gunitado} = \pi \cdot \frac{(D_c + 2e_r + 2e_h)^2 - (D_c + 2e_r)^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_h$$

y el empuje recibido por el volumen del líquido desalojado es:

$$\text{Empuje} = \pi \cdot \frac{(D_c + 2e_r + 2e_h)^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_f$$

lo que se busca es calcular una expresión para un espesor de recubrimiento de hormigón  $e_h$  que satisfaga la ecuación 1. Reemplazando y despejando:

$$e_h = \frac{\sqrt{\frac{(D_c + 2 \cdot e_r)^2 \cdot \gamma_h - (1) - (2)}{\gamma_h - 1,2 \cdot \gamma_f}} - D_c - 2 \cdot e_r}{2}$$

donde (1) y (2) son

$$\begin{aligned} \left[ D_c^2 - (D_c - 2e_c)^2 \right] \cdot \gamma_{ac} &= (1) \\ \left[ (D_c + 2e_r)^2 - D_c^2 \right] \cdot \gamma_r &= (2) \end{aligned}$$

Este método es conocido como revestimiento continuo de hormigón. Utilizando hormigón también se pueden colocar contrapesos de pantano (en forma de u invertida) o de río (2 semicírculos unidos por pernos), espaciados una cierta distancia que dependerá de los diámetros, espesores, densidades y fuerza necesaria para contrarrestar el empuje. La elección entre estos métodos dependerá de la situación que tengamos así como de la evaluación económica.

Para un revestimiento continuo de concreto, se proporcionan datos para las tuberías y las densidades de materiales y fluidos como sigue:

Norma de fabricación de la cañería	API 5L X70
Diámetros nominales	20", 16"
Diámetro exterior de la cañería:	$D_c$
Espesor de la cañería:	$e_c$

Espesor del recubrimiento anticorrosivo:	$e_r = 1,1 \text{ mm.}$
Espesor del hormigón (gunitado)	Incógnita
Peso específico del recubrimiento anticorrosivo:	$\gamma_r = 940 \text{ kg/m}^3$
Peso específico del H°A°:	$\gamma_h = 2300 \text{ kg/m}^3$
Peso específico del acero:	$\gamma_{ac} = 7850 \text{ kg/m}^3$
Peso específico del medio fluido:	$\gamma_f = 1200 \text{ kg/m}^3$

Asumiendo un espesor de hormigón cilíndrico de 5 cm. se comprobará si la suma de los pesos de las tuberías, el revestimiento y el hormigón son suficientes para contrarrestar la fuerza de empuje. Los cálculos se hacen para cada diámetro con los 2 espesores con que se trabaja

Inicialmente mostrando parámetros geométricos de las tuberías y sus revestimientos se tiene:

NPS	DE (pulg.)	DE (mm.)	Espesor (mm.)	Esp. Rev. (mm.)	Esp. HA (mm.)	DE rev. antic.(mm.)	DE HA (mm.)
20	20	508	20.42	1.1	50	510.2	610.2
20	20	508	20.42	1.1	0	510.2	510.2
20	20	508	18.59	1.1	50	510.2	610.2
20	20	508	18.59	1.1	0	510.2	510.2
16	16	406.4	21.82	1.1	50	408.6	508.6
16	16	406.4	21.82	1.1	0	408.6	408.6
16	16	406.4	18.44	1.1	50	408.6	508.6
16	16	406.4	18.44	1.1	0	408.6	408.6

con hormigón
sin hormigón

Y luego mostrando la comparación entre las fuerzas ejercidas

NPS	Espesor (mm.)	P caño (kg/m.)	P rev (kg/m.)	P HA (Kg/m.)	Σ pesos	P fluido (kg/mt)	Σ/empuje
20	20.42	245.56	1.65	202.39	449.60	350.93	1.281
20	20.42	245.56	1.65	0.00	247.21	245.33	1.008
20	18.59	224.41	1.65	202.39	428.45	350.93	1.221
20	18.59	224.41	1.65	0.00	226.06	245.33	0.921
16	21.82	206.94	1.32	165.68	373.94	243.79	1.534
16	21.82	206.94	1.32	0.00	208.26	157.35	1.324
16	18.44	176.43	1.32	165.68	343.44	243.79	1.409
16	18.44	176.43	1.32	0.00	177.76	157.35	1.130

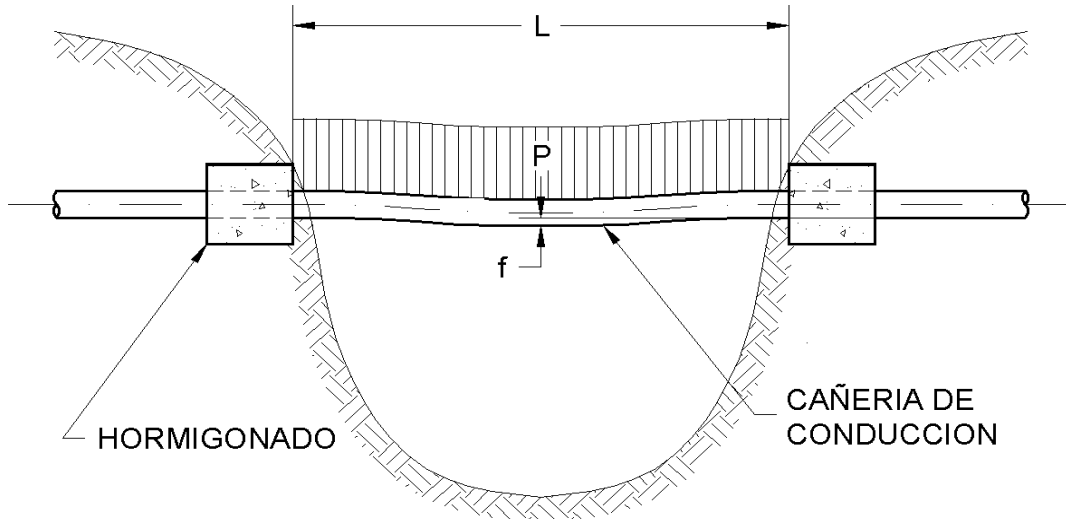
con hormigón
sin hormigón



En los cuadros se colocan 2 casos, el primero de cañería totalmente revestida y el segundo sin revestimiento de hormigón. En el caso del tubo de 20" las fuerzas de flotación son más grandes que en el caso de los 16", por lo tanto se hace más latente la necesidad de usar revestimientos, llegando inclusive a mostrarse flotación para el tubo de pared delgada de 20" sin revestimiento. Para el tubo de 16" por sus grandes espesores de pared (tubo de reinyección a alta presión) las necesidades de revestimiento de hormigón son menores; el tubo de pared gruesa no requiere revestimiento por mostrar un relación de fuerzas más alta de lo necesario ( $1.324 > 1.2$ ). El tubo de 16" de pared delgada con hormigón muestra una relación bastante alta con respecto a la fuerza de empuje ( $1.409 > 1.2$ ), por lo que podemos recurrir a soluciones menos drásticas que colocar hormigón en toda la longitud de cruce. Tales soluciones pueden ser la colocación de hormigón de menor espesor ( $< 5$  cm.) o sólo revestir la mitad de la longitud del tramo.

## II.- Verificación de cañerías en cruces aéreos.

En varias partes la cañería va a tener que atravesar secciones aéreas que crucen quebradas o accidentes geográficos en los que es muy difícil colocar la tubería subterráneamente. Para tales casos es necesario averiguar cual es el máximo “span” o espacio libre en el que la tubería se sostendrá sin necesidad de apoyos o cables. Los cruces aéreos se evalúan como una sección de tubería de longitud  $L$ , empotrada en sus 2 extremos en dados de hormigón (para proporcionar mayor rigidez y aislamiento de la deformación de zonas vecinas enterradas) y en la situación en que la sección soportará mayor peso.



Tal situación se presenta durante la prueba hidrostática en que aparte del peso propio, soportará interiormente el peso del fluido (agua), todos uniformemente distribuidos.

La evaluación consistirá en la determinación de las tensiones producidas por las pruebas hidrostáticas y su resultado final como tensión combinada. Las tensiones serán la tangencial por la presión de prueba y la de flexión por el peso del tubo y del fluido que irán en aumento a mayor la longitud de espacio libre.

Proporcionando los datos de las tuberías:

Norma de fabricación de la cañería	API 5L X70
Diámetros nominales	20", 16"
Diámetro exterior de la cañería:	$D_c$
Espesor de la cañería:	$t$
Presión de prueba de resistencia:	$P_{prueba}$
Momento de inercia ecuatorial de la sección:	$I (m^4)$
Módulo resistente de flexión de la sección:	$Z (m^3)$
Módulo de elasticidad del acero:	$E=2109200 \text{ kg/cm}^2$
Carga específica sobre la cañería:	$p \text{ [kg/m]}$
Carga total sobre la cañería:	$P \text{ [kg]}$
Peso específico del acero:	$\gamma_{ac}=7850 \text{ kg/m}^3$
Distancia entre apoyos:	$L$
Flecha máxima:	$f$

Momento flector máximo:	$M_f$
Tensión de flexión máxima:	$\sigma_f$
Tensión circunferencial debida a la presión interna:	$\sigma_p$
Tensión combinada total:	$\sigma$

**ECUACIONES:**

- 1)  $P = pL$  carga uniformemente distribuida
- 2)  $M_f = \frac{1}{12} PL$  momento flector (en cada empotramiento)
- 3)  $f = \frac{1}{384} \frac{PL^3}{EI}$  flecha máxima (en el centro)
- 4)  $\sigma_f = \frac{M_f}{W}$  tensión de flexión máxima (en cada empotramiento)
- 5)  $\sigma_p = \frac{P_{test} D_{ext}}{2t}$  tensión circunferencial debida a la presión de prueba
- 6)  $\sigma = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_f^2}$  tensión combinada total (en cada empotramiento)

**DESARROLLO DEL CÁLCULO:**

La mecánica del cálculo consistirá en ir comprobando para secciones incrementadas de 5 en 5 metros de espacio libre cuanto es el aumento de la tensión combinada hasta llegar a un máximo. Ya que la “SMYS” de los tubos es 70000 psi, se señala el límite de tensión como 65000 psi. Se hacen los cálculos para los tubos de pared gruesa y delgada a fin de comparar cómo el espesor influencia en las tensiones, aunque siempre se recomienda colocar tuberías de pared gruesa en cruces aéreos.

Inicialmente calculando parámetros constantes de las tuberías:

$\varnothing_{ext}$ (pulg.)	$\varnothing_{ext}$ (mm.)	t (pulg.)	t (mm.)	SMYS (psi)	$P_{test}$ (psi)	$\sigma_p$ (psi)	I (mt4)	Z (mt3)	$P_{tubo}$ (kg/mt)	$P_{agua}$ (kg/mt)	$P_{total}$ (kg/mt)
20	508	0.804	20.42	70000	4612	57363	9.31E-04	3.67E-03	245.56	171.40	416.96
20	508	0.732	18.59	70000	4612	63005	8.57E-04	3.38E-03	224.41	174.10	398.50
16	406.4	0.859	21.82	70000	5717	53243	4.89E-04	2.41E-03	206.94	103.36	310.29
16	406.4	0.726	18.44	70000	5717	62997	4.24E-04	2.09E-03	176.43	107.24	283.67

Las tensiones para diferentes espacios libres o “spans” serán:

Longitud espacio libre = 10 metros					Longitud espacio libre = 15 metros				
Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)	Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)
4169,60	3474,66	0,55	1347,70	<b>57379,01</b>	6254,39	7817,99	2,80	3032,32	<b>57443,27</b>
3985,02	3320,85	0,57	1399,37	<b>63021,00</b>	5977,54	7471,92	2,91	3148,57	<b>63084,09</b>
3102,91	2585,76	0,78	1528,11	<b>53265,23</b>	4654,37	5817,96	3,97	3438,25	<b>53354,21</b>
2836,73	2363,94	0,83	1611,69	<b>63017,86</b>	4255,10	5318,88	4,18	3626,30	<b>63101,53</b>

Longitud espacio libre = 20 metros					Longitud espacio libre = 25 metros				
Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)	Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)
8339,19	13898,65	8,84	5390,79	<b>57615,93</b>	10423,99	21716,64	21,59	8423,11	<b>57978,30</b>
7970,05	13283,41	9,18	5597,46	<b>63253,62</b>	9962,56	20755,33	22,42	8746,04	<b>63609,60</b>
6205,83	10343,04	12,53	6112,44	<b>53593,02</b>	7757,28	16161,00	30,60	9550,69	<b>54093,12</b>
5673,47	9455,78	13,22	6446,76	<b>63326,25</b>	7091,83	14774,65	32,27	10073,06	<b>63797,49</b>

Longitud espacio libre = 30 metros					Longitud espacio libre = 35 metros				
Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)	Peso (kg.)	M <sub>f</sub> (kg-mt)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)
12508,79	31271,97	44,77	12129,27	<b>58631,51</b>	14593,58	42564,62	82,94	16509,29	<b>59691,64</b>
11955,07	29887,68	46,48	12594,29	<b>64251,89</b>	13947,58	40680,45	86,12	17142,23	<b>65295,82</b>
9308,74	23271,85	63,45	13753,00	<b>54990,86</b>	10860,19	31675,57	117,55	18719,36	<b>56438,14</b>
8510,20	21275,50	66,92	14505,20	<b>64645,60</b>	9928,57	28958,32	123,98	19743,19	<b>66018,53</b>

Se puede ver que la tensión por flexión lentamente va ejerciendo mayor deformación en el tubo, sin embargo sólo en el caso de un espacio libre de 35 m. los tubos de menor espesor rebasan el límite establecido; deduciendo entonces que para cada tubo el máximo espacio libre con empotramientos en ambos extremos serán de:

Øext (pulq.)	t (pulq.)	SMYS (psi)	f (mm.)	σ <sub>f</sub> (psi)	σ <sub>comb</sub> (psi)	L max (m.)
20	0.804	70000	82.94	16509.29	59691.64	<b>35</b>
20	0.732	70000	46.48	12594.29	64251.89	<b>30</b>
16	0.859	70000	117.55	18719.36	56438.14	<b>35</b>
16	0.726	70000	66.92	14505.20	64645.60	<b>30</b>

### III.- Cálculos para pruebas hidrostáticas

#### 1) Presiones de prueba

La presión de prueba se calcula en base a los esfuerzos que generará el agua presurizada dentro de la tubería; se sabe que en el tubo se generan tres principales esfuerzos: el tangencial  $\sigma_h$ , el longitudinal  $\sigma_l$  y el radial  $\sigma_r$ , de los que el más grande es el tangencial, por lo que si la presión es aumentada ilimitadamente el esfuerzo tangencial será el que provoque la falla o rotura en el tubo (suponemos un tubo recto de pared de espesor y diámetro externo constantes).

Para una tubería en que la relación DE / espesor =  $D/t > 20$  (relación comúnmente encontrada en tuberías para transporte de hidrocarburos), se considera al tubo de pared delgada y por lo tanto con esfuerzo tangencial casi constante en todo el espesor de pared. Para el cálculo del esfuerzo tangencial se usa la ecuación:

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

Donde:

- P = presión aplicada
- D = diámetro externo
- t = espesor de pared del tubo.

En base al esfuerzo más grande o tangencial se define una máxima presión a ser soportada por el tubo en condiciones de trabajo o máxima presión disponible para operación “MAOP”. En la ecuación que sigue “MAOP” se simboliza P:

$$\frac{PD}{2t} < S$$

$$S = S_y FET$$

Donde:

- S = esfuerzo disponible (psi)
- $S_y$  = “SMYS” o esfuerzo de cedencia mínimo especificado o límite elástico
- F = factor de diseño por ubicación (ver tabla 9.1)
- E = factor por soldadura longitudinal de juntas (ver tabla 9.2)
- T = factor por aumento de temperatura (ver tabla 9.3)

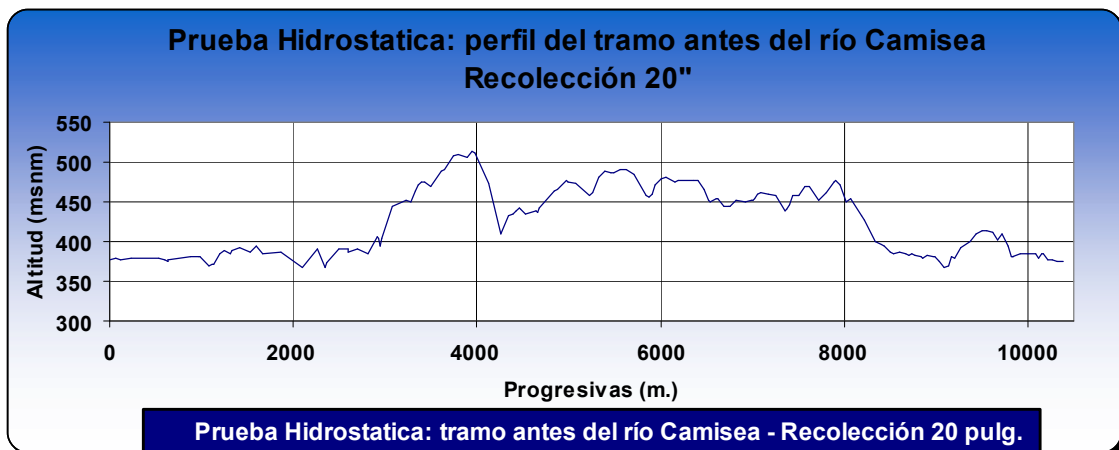
La ecuación de arriba es usada para la determinación de espesores de pared del tubo en base a la presión de diseño  $P_d$ , el diámetro y el esfuerzo de cedencia, por lo que podemos deducir que “MAOP” =  $P_d$ . La presión de prueba se calcula como el 1.25 de la presión de diseño o “MAOP” para líneas de gas (código ASME B31.8), por lo tanto como  $F = 0.72$  en zonas poco pobladas y escasamente recorridas, la presión de prueba producirá un esfuerzo de 0.9 veces el “SMYS”. Los cálculos se realizan primero estimando un mínimo de espesor del tubo, añadiendo un sobreespesor para efectos de corrosión (mayor

para tuberías de recolección, menor para las de inyección) y en base al espesor final se estimará las presiones de prueba. El aumento de espesor tendrá el efecto favorable de colocar a nuestra presión de diseño muy por debajo de la presión de prueba. Calculando valores para los tubos de 20” y 16”:

TIPO DE LINEA	DIAMETRO EXTERNO (pulg)	ESPESOR DE PARED (pulg)	GRADO DE LA TUBERÍA (psi)	PRESIÓN DE DISEÑO (psig)	FACTOR DE SEGURIDAD
RECOLECCION	20,000	0,804	70.000	1.800	0,60
RECOLECCION	20,000	0,732	70.000	1.800	0,72
REINYECCIÓN	16,000	0,859	70.000	4.200	0,60
REINYECCIÓN	16,000	0,726	70.000	4.200	0,72

DIAMETRO EXTERNO (pulg.)	MINIMO ESPESOR (pulg.)	SOBRE ESPESOR (pulg.)	% SMYS a PD	PRESIÓN a			
				1.25 PD (psig)	90% SMYS (psig)	95% SMYS (psig)	100% SMYS (psig)
20,000	0,429	0,375	32,0	2250	5065	5347	5628
20,000	0,357	0,375	35,1	2250	4612	4868	5124
16,000	0,800	0,059	55,9	5250	6765	7140	7516
16,000	0,667	0,059	66,1	5250	5717	6035	6353

Los cálculos para presiones de prueba no concluyen con la determinación de la presión al 90% del “SMYS” o presión de prueba de resistencia. Esa presión se aplicaría en todo el ducto en una prueba en la cual la tubería se encontrase en posición horizontal sin diferencias de alturas y por lo tanto sin diferencia de presiones entre extremos o sectores intermedios; sin embargo es normal que cualquier traza tenga diferencias de alturas, siendo necesario conocer la distribución de las presiones en los diversos puntos de la cañería. Para esto nos valemos del perfil topográfico de la tubería tendida identificando presiones en los puntos más altos, más bajos y los extremos. Se puede hacer la prueba en un solo tramo o dividiendo en partes la traza, dependiendo de las diferencias de alturas y fuente de abastecimiento de agua que en este caso será el río Camisea, tramo especial a partir del cual dividiremos el ducto en 2 partes, un tramo entre planta y río y otro entre río y los pozos. Colocando los datos topográficos de ambos sectores y calculando la distribución de presiones de prueba para **la tubería de 20”** (P = 4612 psi) se tiene:

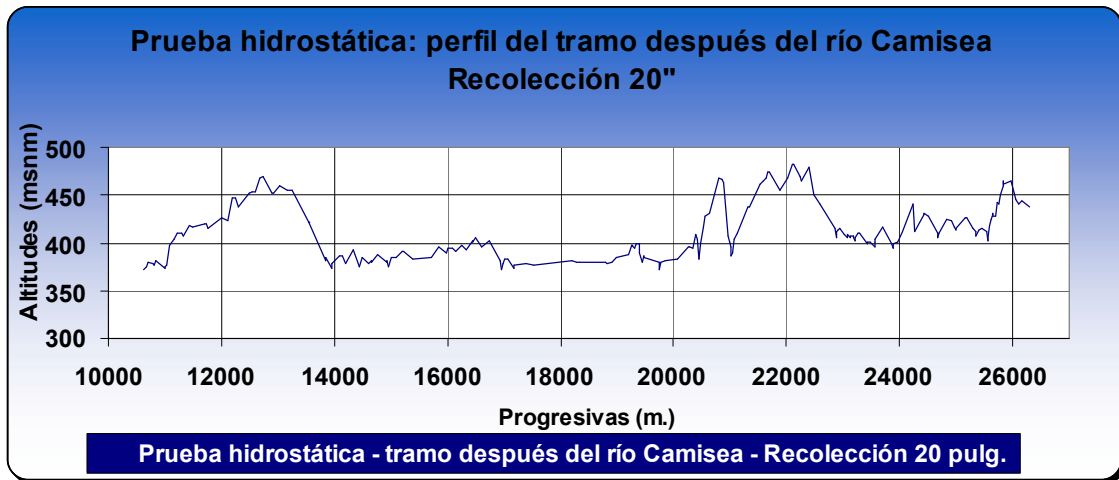


Sector planta – río

Punto	Progresiva	Cota	Presión de prueba			
			Resistencia		Hermeticidad	
	m.	msnm	psig	kg/cm <sup>2</sup>	psig	kg/cm <sup>2</sup>
Extremo inicial	0.00	377.23	4805	337.9	4325	304.1
Extremo final	10387.97	374.92	4809	338.2	4328	304.3
De mayor cota	3939.54	513.15	4612	324.3	4151	291.9
De menor cota	2091.48	367.08	4820	338.9	4338	305.0

Sector río – grupo de pozos

Punto	Progresiva	Cota	Presión de prueba			
			Resistencia		Hermeticidad	
	m.	msnm	psig	kg/cm <sup>2</sup>	psig	kg/cm <sup>2</sup>
Extremo inicial	10633.23	377.78	4805	337.9	4324	304.1
Extremo final	26288.99	438.05	4719	331.8	4247	298.7
De mayor cota	22105.93	482.99	4612	324.3	4151	291.9
De menor cota	11077.00	374.51	4766	335.2	4290	301.7



La importancia de calcular las presiones en los diferentes puntos de la cañería es para comprobar que las presiones en los puntos más bajos no excedan la presión al límite del esfuerzo elástico. La presión de prueba calculada es para la cañería de menor espesor o que muestre el menor valor de presión al "SMYS" (usualmente la tubería de mayor longitud en el trazo), y se aplica en el punto más alto de la traza por lo que todos los demás puntos tendrán un adicional de presión por diferencia de alturas. Como límite se establece que en el punto más bajo de la traza la presión de la prueba no debe exceder la presión al 95% del límite elástico o "SMYS" (aunque algunos discuten que se puede llevar este límite a un valor más alto como el 100% del SMYS). Comparando los valores de las tablas:

**95% SMYS = 4868 psig > 4820 psig = presión en el punto más bajo sector planta – río.**

**Por lo que es aceptable la presión en el punto más bajo.**

**95% SMYS = 4868 psig > 4766 psig = presión en el punto más bajo sector río – pozos.**

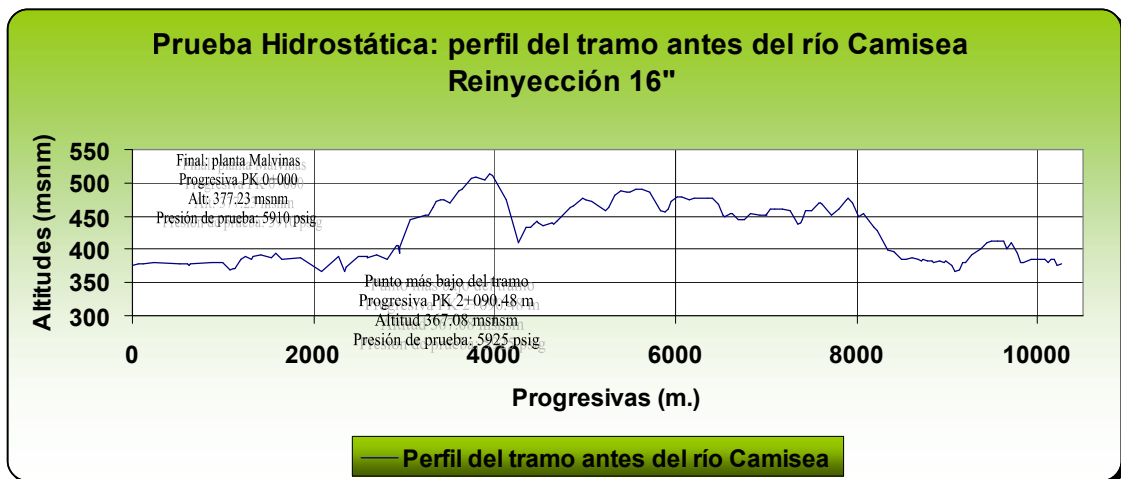
**Por lo que es aceptable la presión en el punto más bajo.**

Ambos tramos cumplen en no exceder el límite de presiones en sus puntos más bajos por lo que la división de tramos es aceptable. Si la presión fuese más alta que el límite fijado, habría que dividir la traza en más tramos de manera que las diferencias entre puntos más altos y bajos de los nuevos tramos no produjesen presiones que superasen el límite de presión fijado.

Procediendo de manera similar para la **tubería de 16"** (presión de prueba = 5717 psi)

*Sector planta – río*

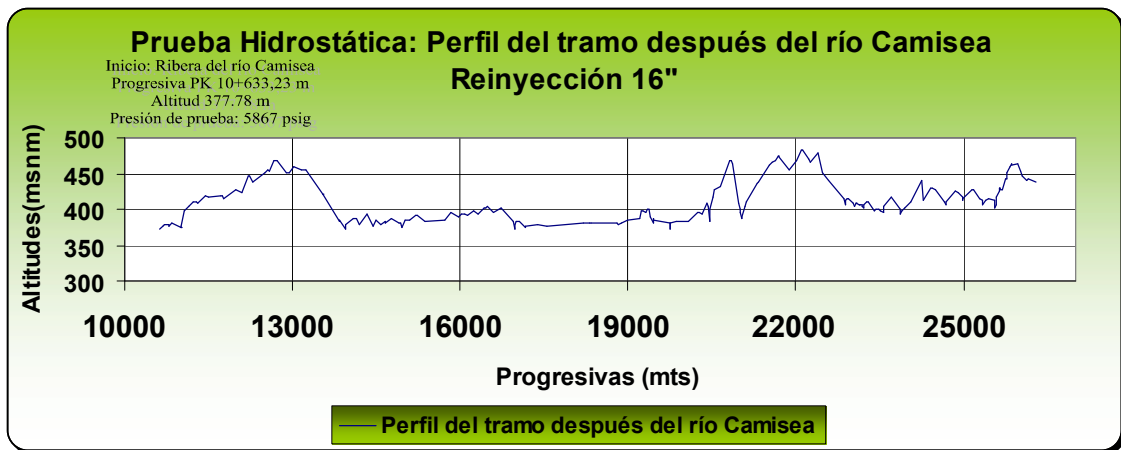
Punto	Progresiva	Cota	Presión de prueba			
			Resistencia		Hermeticidad	
			psig	kg/cm <sup>2</sup>	psig	kg/cm <sup>2</sup>
<i>Extremo inicial</i>	0.00	377.23	5910	415.6	5319	374.1
<i>Extremo final</i>	10248.00	374.92	5914	415.9	5322	374.3
<i>De mayor cota</i>	3939.54	513.15	5717	402.0	5145	361.8
<i>De menor cota</i>	2091.48	367.08	5925	416.6	5332	375.0





Sector río – pozos

Punto	Progresiva	Cota	Presión de prueba			
			Resistencia		Hermeticidad	
	m.	msnm	psig	kg/cm <sup>2</sup>	psig	kg/cm <sup>2</sup>
Extremo inicial	10633.23	377.78	5867	412.6	5280	371.3
Extremo final	26288.99	438.05	5781	406.5	5203	365.9
De mayor cota	22105.93	482.99	5717	402.0	5145	361.8
De menor cota	11077.00	374.51	5871	412.9	5284	371.6



Y los valores límites en los puntos más bajos:

**95% SMYS = 6035 psig > 5925 psig = presión en el punto más bajo sector planta – río.**

**Por lo que es aceptable la presión en el punto más bajo.**

**95% SMYS = 6035 psig > 5871 psig = presión en el punto más bajo sector río – pozos.**

**Por lo que es aceptable la presión en el punto más bajo.**

**2) Volúmenes de agua a usarse a condiciones de prueba de presión:**

Calculando inicialmente los volúmenes a usarse en un cilindro con DE igual al DI de la tubería que se va a probar:

$$Vol = L * (\pi * d^2 / 4) * 12 / 231$$

$$Vol = 0.0408 * d^2 * L$$

Donde

L = longitud a ser probada (pies)

d = diámetro interior de la tubería (pulgadas)

V = galones requeridos para el llenado a presión atmosférica

Sin embargo este valor no es el volumen de agua que realmente se usa cuando el tubo esta presurizado a la presión de prueba. El volumen de agua a

presión de prueba es ligeramente diferente por la compresibilidad del agua, por pequeños cambios de volumen en la tubería gracias a la presión aplicada y por cambios en temperatura con respecto a una temperatura base de 60°F, pero es necesario conocer con precisión el volumen para saber si el tubo presenta fugas o si ha quedado aire atrapado en cantidades apreciables. Contando tales cambios:

$$Vol_{tp} = Vol * F_{wp} * F_{pp} * F_{pwt}$$

Donde

$Vol_{tp}$  = volumen a presión de prueba

$F_{wp}$  = factor de corrección para la compresibilidad de agua presión de prueba

$F_{pp}$  = factor de corrección para el cambio de volumen de la tubería a presión de prueba

$F_{pwt}$  = factor de corrección para cambios de vol. en tubería y agua por temperatura

$$F_{wp} = \left[ 1 - 4.5 * 10^{-5} * \frac{P}{14.73} \right]^{-1}$$

P = presión de prueba

$$F_{pp} = 1 + \left( \frac{D}{t} * \frac{0.91P}{30 * 10^6} \right) + 3.6 * 10^{-6} * (T - 60)$$

D = diámetro externo de la tubería (pulg.)

T = espesor de la pared de la tubería (pulg.)

T = temperatura de prueba de la tubería °F

$$F_{pwt} = F_{pt} / F_{wt}$$

$F_{pt}$  = factor para corregir el cambio en volumen de la tubería por la expansión termal de la tubería desde 60°F hasta la temperatura de prueba.

$$F_{pt} = 1 + [18.2 * 10^{-6} * (T - 60)]$$

$F_{wt}$  = factor para la corrección del volumen por cambio en la temperatura desde los 60°F hasta la temperatura de prueba, valores que son extraídos de la tabla 9.4

Con las fórmulas definidas de los volúmenes empezamos los cálculos para averiguar cuanto de agua requeriremos en las 2 tuberías, procediendo primero con la de recolección (20") para el tramo desde la planta hasta el río:

Material	Ø ext		Espesor		Longitud mts.	volumen m3
	pulg.	mm	pulg.	mm		
API 5 L X 70	20	508	0.732	18.59	9468.07	1647.559
	20	508	0.804	20.42	907.62	153.641
Cabezales						2.056
Total						1803.256

Viéndose que el volumen es 1803.26 m<sup>3</sup> a 60°F y presión atmosférica, de lo cual se calcula el volumen necesario para la presión de prueba (tubería de 20" = 4612 psi) y una temperatura asumida de 80°F en el momento de la prueba, considerando despreciable el cambio de volumen que ocurra en los cabezales:

Tubería	Espesor	Vol (m <sup>3</sup> )	F <sub>wp</sub>	F <sub>pp</sub>	F <sub>pt</sub>	F <sub>wt</sub>	F <sub>dwt</sub>	V <sub>pt</sub>	
20	0.804	153.64	1.0143	1.0036	1.0004	1.0024	0.9980	156.07	
20	0.732	1647.56	1.0143	1.0039	1.0004	1.0024	0.9980	1674.18	
		1801.2							1830.24
<b>Cabezales</b>		2.056						<b>Cabezales</b>	2.056
<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>		<b>1803.256</b>						<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>1832.30</b>

Similarmente para el tramo al otro lado del río para el tubo de 20" (80°F, 4612 psi) el volumen será:

Material	Ø ext		Espesor		Longitud mts.	volumen m3
	pulg.	mm	pulg.	mm		
API 5 L X 70	20	508.0	0.732	18.59	14133.76	2460.700
	20	508.0	0.804	20.42	1522.00	260.900
Cabezales						2.056
Total						2723.656

Tubería	Espesor	Vol (m <sup>3</sup> )	F <sub>wp</sub>	F <sub>pp</sub>	F <sub>pt</sub>	F <sub>wt</sub>	F <sub>dwt</sub>	V <sub>pt</sub>	
20	0.804	260.9	1.0143	1.0036	1.0004	1.0024	0.9980	265.02	
20	0.732	2460.7	1.0143	1.0039	1.0004	1.0024	0.9980	2500.45	
		2721.6							2765.48
<b>Cabezales</b>		2.056						<b>Cabezales</b>	2.056
<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>		<b>2723.656</b>						<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>2767.53</b>

Y para las 2 pruebas de la tubería de 16"

Tramo planta – río - 16"

Material	Ø ext		Espesor		Longitud mts.	volumen
	pulg.	mm	pulg.	mm		
API 5 L X 70	16	406.4	0.726	18.44	9468.07	1013.490
	16	406.4	0.859	21.82	907.62	93.758
Cabezales						1.240
Total						1108.488

Tubería	Espesor	Vol (m <sup>3</sup> )	F <sub>wp</sub>	F <sub>pp</sub>	F <sub>pt</sub>	F <sub>wf</sub>	F <sub>pwf</sub>	V <sub>pt</sub>
16	0.859	93.758	1.0178	1.0033	1.0004	1.0024	0.9980	95.54
16	0.726	1013.49	1.0178	1.0039	1.0004	1.0024	0.9980	1033.40
		1107.248						1128.94
<b>Cabezales</b>		1.24						1.24
<b>Total (m3)</b>		<b>1108.488</b>						<b>1130.18</b>

Tramo río – pozos - 16”

Material	Ø ext		Espesor		Longitud	volumen
	pulg.	mm	pulg.	mm	Mts	m3
API 5L X 70	16	406.4	0.726	18.44	14133.76	1515.729
	16	406.4	0.859	21.82	1522.00	157.308
<b>Cabezales</b>						1.240
<b>Total</b>						1674.277

Tubería	Espesor	Vol (m <sup>3</sup> )	F <sub>wp</sub>	F <sub>pp</sub>	F <sub>pt</sub>	F <sub>wf</sub>	F <sub>pwf</sub>	V <sub>pt</sub>
16	0.859	157.31	1.0178	1.0033	1.0004	1.0024	0.9980	160.31
16	0.726	1515.73	1.0178	1.0039	1.0004	1.0024	0.9980	1545.51
		1673.04						1705.81
<b>Cabezales</b>		1.24						1.24
<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>		<b>1674.28</b>						<b>1707.05</b>

3) Cambios de volúmenes por aumento de presión

En las últimas etapas del llenado conforme ocurre el incremento y estabilización de la presión en la tubería, se hace necesario conocer el aumento de volumen por presión, lo que se realiza por medición directa o por medios cuantitativos. Una fórmula planteada para conocer la relación variación de volumen / variación de presión requerida es:

$$Va = \left( \frac{0.87D_i}{2t} + A \right) \frac{V}{1000} * 0.980665$$

Donde

Va = volumen teórico de agua en litros a purgar o añadir por bar de variación de presión.

Di = diámetro interno de la cañería en mm.

A = factor de compresibilidad del agua, obtenido de tabla de la sección 9.5.7. de la norma GE-N1-124-Año 1990.

V = volumen de la cañería en m<sup>3</sup>.

t = espesor de pared de la cañería en mm.

Factor 0,980665 = conversión de kg/cm<sup>2</sup> a bar.

Para cañerías con relaciones diámetro/espesor de pared diferentes, Va será la suma de los valores parciales calculados para cada sección con una relación diámetro/espesor determinada. La formula Va asume que la tubería

está enterrada y por lo tanto no sufre de variaciones de longitud por variaciones de presión. La determinación de  $V_a$  nos sirve para comprobar si el periodo de estabilización del agua dentro de la tubería ha sido cumplido mediante la adición o sustracción de volúmenes de agua, medición del cambio de presión y comparación con los valores de la fórmula. Si el valor medido en campo es mayor a  $1.06V_a$  quiere decir que el aire atrapado es lo suficientemente apreciable como para no hacer confiable la prueba; en caso contrario, si el valor es menor a  $0.94V_a$  hay errores en el cálculo o en la medición.

#### 4) Variación de presión por efectos de temperatura

Uno de los fenómenos más comúnmente observados durante una prueba hidrostática es la variación de presión por efecto de la temperatura. Se podría menospreciar tal efecto, pero la experiencia de campo ha demostrado que las variaciones de temperatura pueden tener efectos significativos de algunos psi en la presión, fácilmente confundibles con alguna fuga o pequeña rotura inexistentes. Para proceder al cálculo de la variación de presión por temperatura usamos la expresión:

$$\Delta P = \frac{\beta - 2\alpha}{\frac{D}{Et} * (1 - \nu^2) + C}$$

Donde:

$\Delta P$  = cambio de presión psi/°C

$$\beta * 10^6 = -64.268 + (17.105 * T) - (0.20369 * T^2) + (0.0016048 * T^3)$$

$\beta$  = coeficiente de expansión del agua

$\alpha$  = coeficiente de expansión lineal para el acero =  $1.116 * 10^{-6}$  por °C

D = diámetro exterior, pulg.

$\nu$  = relación de Poisson = 0.3

E = módulo de Young para el acero =  $30 * 10^6$

t = espesor de la pared de tubería, pulgadas

C = factor de compresibilidad para el agua /kPa

T = temperatura del agua °C

#### 5) Cantidades de aditivos

Adicionalmente a todos estos cálculos se estimará cuanto es el volumen de aditivos que se usarán. Para evitar la corrosión de las líneas se usarán principalmente inhibidores de corrosión y secuestrantes de oxígeno en diferente concentración por Km. dependiendo del tamaño de las líneas. Para los tubos de 20" y 16" se muestran las cantidades requeridas:

##### Tubería de 20"

##### Tramo Planta – río

Aditivo	Ø	Long ( km)	Lts/Km	total (lts)
<i>inhibidor de corrosión</i>	20"	10.39	16.6	172.474
<i>secuestrante de oxígeno</i>	20"	10.39	7.9	82.081

**Tramo río – pozos**

<i>Aditivo</i>	<i>Ø</i>	<i>Long. (Km)</i>	<i>Lts/Km</i>	<i>Total (lts)</i>
<i>Inhibidor de corrosión</i>	20"	15.66	16.6	260.00
<i>Secuestrante de oxígeno</i>	20"	15.66	7.9	123.70

**Tubería de 16"**

**Tramo Planta – río**

<i>Aditivo</i>	<i>Ø</i>	<i>Long. (Km)</i>	<i>Lts/Km</i>	<i>Total (lts)</i>
<i>Inhibidor de corrosión</i>	16"	10.39	10.2	105.97
<i>Secuestrante de oxígeno</i>	16"	10.39	4,8	49.87

**Tramo río – pozos**

<i>Aditivo</i>	<i>Ø</i>	<i>Long (km)</i>	<i>Lts/km</i>	<i>Total (lts)</i>
<i>Inhibidor de corrosión</i>	16	15.66	10.2	159.732
<i>Secuestrante de oxígeno</i>	16	15.66	4.8	75.168

## IV.- Cálculo de los espesores de cuerpo de lanzadores de chanchos

**PARA LA TUBERÍA DE INYECCIÓN (16"): La trampa se conforma de 2 cuerpos de tubería de 16" (menor) y 20" (mayor)**

### Datos de diseño

- Presión de diseño de las trampas 4200 Psig (295 kg/cm<sup>2</sup>)
- Presión de prueba hidrostática 5717 Psig (417.6 Kg/cm<sup>2</sup>)
- Temperatura de diseño 120 °F (48.8 °C)
- Sobre espesor de diseño 1.6 mm.
- Factor de diseño 0.60
- Material del cuerpo- Ø 16" API 5L Gr. X70
- Material del cuerpo- Ø 20" API 5L Gr. X70
- Material de soportes y cáncamos ASTM A-36
- Material de monturas y refuerzos API 5L Gr. X70
- Radiografiado 100%
- Tratamiento térmico NO
- Calculo de espesores Código ASME VIII- Div 1.

### Verificación de los espesores del cuerpo

#### Cuerpo menor de diámetro 16":

Material: API 5L Gr. X70

SMYS = 70000 PSI (483 Mpa) Esfuerzo a la fluencia

SMTS = 82000 PSI (565 Mpa) Esfuerzo a la tracción

#### Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial

Según ASME VIII DIV 1, apéndice 1, párrafo 1.1 (a) (i):

El espesor mínimo por esfuerzo circunferencial es:

$t = PR / (SE + 0.4 P)$ , donde:

$R = 16" / 2 = 8"$	Radio exterior del tubo
$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$	Esfuerzo permisible
$P = 4200 \text{ PSI}$	Presión de diseño
$E = 1$	Eficiencia de la junta
Reemplazando datos:	
$t = 4200 \times 8 / ((42000 \times 1) + (0.4 \times 4200))$	= 0.769" (19.53 mm.)
Tolerancia por corrosión	= 0.063" ( 1.60 mm.)
Espesor mínimo total	= 0.832" (21.13 mm.)

#### Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal

Según ASME VIII DIV 1, párrafo UG27- ( C ) (2)

El espesor mínimo por esfuerzo longitudinal es:

$t = PR / (2SE + 0.4 P)$ , donde:

$R = 16" / 2 = 8"$	Radio exterior del tubo
$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$	Esfuerzo permisible
$P = 4200 \text{ PSI}$	Presión de diseño
$E = 1$	Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 4200 \times 8 / ((2 \times 42000 \times 1) + (0.4 \times 4200)) = 0.392'' \text{ ( 9.96 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = 0.063'' \text{ ( 1.60 mm.)}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = \underline{0.455'' \text{ (11.56 mm.)}}$$

El esfuerzo circunferencial prevalece, por lo tanto:

Para el cuerpo de  $\varnothing 16''$  – se requiere como mínimo un tubo de 0.832'' (21.13 mm.) de espesor, material API 5L Gr. X70.

### Cuerpo mayor de diámetro 20'':

Material: API 5L Gr. X70

SMYS = 70000 PSI (483 Mpa)

Esfuerzo a la fluencia

SMTS = 82000 PSI (565 Mpa)

Esfuerzo a la tracción

### Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial

Según ASME VIII DIV 1, apéndice 1, párrafo 1.1 (a) (i):

El espesor mínimo por esfuerzo circunferencial es:

$t = PR / (SE + 0.4 P)$ , donde:

$$R = 20'' / 2 = 10''$$

Radio exterior del tubo

$$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$$

Esfuerzo permisible

$$P = 4200 \text{ PSI}$$

Presión de diseño

$$E = 1$$

Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 4200 \times 10 / ((42000 \times 1) + (0.4 \times 4200)) = 0.962'' \text{ (24.42 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = \underline{0.063'' \text{ ( 1.60 mm.)}}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = 1.025'' \text{ (26.02 mm.)}$$

### Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal

Según ASME VIII DIV 1, párrafo UG27- ( C ) (2)

El espesor mínimo por esfuerzo longitudinal es:

$t = PR / (2SE + 0.4 P)$ , donde:

$$R = 20'' / 2 = 10''$$

Radio exterior del tubo

$$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$$

Esfuerzo permisible

$$P = 4200 \text{ PSI}$$

Presión de diseño

$$E = 1$$

Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 4200 \times 10 / ((2 \times 42000 \times 1) + (0.4 \times 4200)) = 0.490'' \text{ (12.45 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = 0.063'' \text{ ( 1.60 mm.)}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = 0.553'' \text{ (14.05 mm.)}$$

El esfuerzo circunferencial prevalece, por lo tanto:

Para el cuerpo de  $\varnothing 20''$  – se requiere como mínimo un tubo de 1.025'' (26.02 mm.) de espesor, material API 5L Gr. X70.



**PARA LA TUBERÍA DE RECOLECCIÓN (20''): La trampa se conforma de 2 cuerpos de tubería de 20'' (menor) y 24'' (mayor)**

**Datos de diseño**

• Presión de diseño de las trampas	1800 Psig (295 kg/cm <sup>2</sup> )
• Presión de prueba hidrostática	4612 Psig (417.6 Kg/cm <sup>2</sup> )
• Temperatura de diseño	120 °F (48.8 °C)
• Sobre espesor de diseño	9.53 mm.
• Factor de diseño	0.60
• Material del cuerpo- Ø 20''	API 5L Gr. X70
• Material del cuerpo- Ø 24''	API 5L Gr. X70
• Material de soportes y cáncamos	ASTM A-36
• Material de monturas y refuerzos	API 5L Gr. X70
• Radiografiado	100%
• Tratamiento térmico	NO
• Cálculo de espesores	Código ASME VIII- Div 1.

**Verificación de los espesores del cuerpo**

**Cuerpo menor de diámetro 20'':**

Material: API 5L Gr. X70

SMYS = 70000 PSI (483 Mpa)

SMTS = 82000 PSI (565 Mpa)

Esfuerzo a la fluencia

Esfuerzo a la tracción

**Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial**

Según ASME VIII DIV 1, apéndice 1, párrafo 1.1 (a) (i):

El espesor mínimo por esfuerzo circunferencial es:

$t = PR / (SE + 0.4 P)$ , donde:

$R = 20'' / 2 = 10''$

$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$

$P = 1800 \text{ PSI}$

$E = 1$

Reemplazando datos:

$t = 1800 \times 10 / ((42000 \times 1) + (0.4 \times 1800))$

Tolerancia por corrosión

Espesor mínimo total

Radio exterior del tubo

Esfuerzo permisible

Presión de diseño

Eficiencia de la junta

= 0.421'' (10.69 mm.)

= 0.375'' ( 9.53 mm.)

= 0.796'' (20.22 mm.)

**Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal**

Según ASME VIII DIV 1, párrafo UG27- ( C ) (2)

El espesor mínimo por esfuerzo longitudinal es:

$t = PR / (2SE + 0.4 P)$ , donde:

$R = 20'' / 2 = 10''$

$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$

$P = 1800 \text{ PSI}$

$E = 1$

Radio exterior del tubo

Esfuerzo permisible

Presión de diseño

Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 1800 \times 10 / ((2 \times 42000 \times 1) + (0.4 \times 1800)) = 0.212'' \text{ ( 5.40 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = 0.375'' \text{ ( 9.53 mm.)}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = 0.588'' \text{ (14.93 mm.)}$$

El esfuerzo circunferencial prevalece, por lo tanto:

Para el cuerpo de  $\varnothing 20''$  – se requiere como mínimo un tubo de 0.796'' (20.22 mm) de espesor, material API 5L Gr. X70.

### Cuerpo mayor de diámetro 24'':

Material: API 5L Gr. X70

SMYS = 70000 PSI (483 Mpa) Esfuerzo a la fluencia

SMTS = 82000 PSI (565 Mpa) Esfuerzo a la tracción

### Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial

Según ASME VIII DIV 1, apéndice 1, párrafo 1.1 (a) (i):

El espesor mínimo por esfuerzo circunferencial es:

$t = PR / (SE + 0.4 P)$ , donde:

$R = 24'' / 2 = 12''$  Radio exterior del tubo

$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$  Esfuerzo permisible

$P = 1800 \text{ PSI}$  Presión de diseño

$E = 1$  Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 1800 \times 12 / ((42000 \times 1) + (0.4 \times 1800)) = 0.506'' \text{ (12.84 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = 0.375'' \text{ ( 9.53 mm.)}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = 0.881'' \text{ (22.38 mm.)}$$

### Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal

Según ASME VIII DIV 1, párrafo UG27- ( C ) (2)

El espesor mínimo por esfuerzo longitudinal es:

$t = PR / (2SE + 0.4 P)$  donde:

$R = 24'' / 2 = 12''$  Radio exterior del tubo

$S = 0.6 \times 70000 \text{ PSI} = 42000 \text{ PSI}$  Esfuerzo permisible

$P = 1800 \text{ PSI}$  Presión de diseño

$E = 1$  Eficiencia de la junta

Reemplazando datos:

$$t = 1800 \times 12 / ((2 \times 42000 \times 1) + (0.4 \times 1800)) = 0.255'' \text{ ( 6.48 mm.)}$$

$$\text{Tolerancia por corrosión} = 0.375'' \text{ ( 9.53 mm.)}$$

$$\text{Espesor mínimo total} = 0.630'' \text{ (16.00 mm.)}$$

El esfuerzo circunferencial prevalece, por lo tanto:

Para el cuerpo de  $\varnothing 24''$  – se requiere como mínimo un tubo de 0.881'' (22.38 mm.) de espesor, material API 5L Gr. X70.

## V.- Diseño del sistema de protección catódica

Se calcularán los parámetros en el diseño de un sistema de protección catódica para las 2 tuberías en un plazo de vida operativa de 35 años, para eso primero se determinarán las resistencias y constantes de atenuación y con los datos de las tuberías se calculan sus áreas superficiales:

NPS (pulg.)	DE (pulg.)	Longitud (m.)	Superficie (m <sup>2</sup> )
16	16	26300	33578.35
20	20	26300	41972.93

Teniendo en cuenta un revestimiento de polietileno tricapa de buen rendimiento, al cabo de un tiempo de vida de 35 años tendrá un valor de cobertura de 5000 ohm-m<sup>2</sup> y con un valor de resistividad del acero de 18 micro ohms-cm. Calculando la resistencia longitudinal de cada cañería.

$$RL = \rho_{Fe} L / S$$

Donde:

$\rho_{Fe}$  = resistividad del acero.

L = longitud considerada (1m.)

S = sección anular.

Resistencia longitudinal (ohm/mt)				
NPS (pulg.)	OD (pulg.)	Espesor (mm.)	Sección anular (m <sup>2</sup> )	Res. Long (ohm/m.)
16	16	18.44	0.024	7.65E-06
20	20	18.59	0.030	6.07E-06

Y luego la resistencia transversal

$$RT = R_{cob} / \pi \varnothing$$

Donde:

$R_{cob} = 5.000 \Omega m^2$

Resistencia transversal (ohmio - mt)		
NPS (pulg.)	OD (pulg.)	RT (ohmio-mt)
16	16	3916.22
20	20	3132.97

Calculando la constante de atenuación

$$\alpha = (RL / RT)^{1/2}$$

Constante de atenuación		
NPS (pulg.)	OD (pulg.)	constante (m <sup>-1</sup> )
16	16	4.42E-05
20	20	4.40E-05

Debido a que se tiene 2 líneas en paralelo corriendo en una misma zanja, se puede establecer puentes de interconexión y a partir de eso considerarlas como una sola línea, para lo que se calculan las nuevas resistencias transversales y en paralelo:

$$1 / RT_{\text{paralelo}} = (1 / RT_{16}) + (1 / RT_{20})$$

Resistencia transversal en paralelo (ohm-mt)		
NPS (pulg.)	RT (ohmio m.)	V. inversos
16	3916.22	2.55E-04
20	3132.97	3.19E-04
		5.75E-04
<b>RT paralelo 2 líneas</b>		<b>1740.54</b>

$$1 / RL_{\text{paralelo}} = (1 / RL_{16}) + (1 / RL_{20})$$

Resistencia longitudinal en paralelo (ohm/mt)		
NPS (pulg)	RL (ohm/mt)	V. inversos
16	7.65E-06	1.31E+05
20	6.07E-06	1.65E+05
		2.96E+05
<b>RL paralelo 2 líneas</b>		<b>3.38E-06</b>

A partir de los resultados la constante de atenuación es

$$\alpha_{\text{par}} = (RL_{\text{par}} / RT_{\text{par}})^{1/2} = 4.4083 \cdot 10^{-5}$$

Las líneas al tener una longitud de 26 km. no son longitudinalmente muy extensas como para ser consideradas líneas infinitas, por lo que se usarán ecuaciones para líneas finitas o cortas:

$$\Delta V_o = \Delta V_L * \cosh(\alpha L)$$

$\Delta V_o$  = cambio de potencial en el punto de drenaje.

$\Delta V_L$  = cambio de potencial a una distancia L.

Por la disposición simétrica que se tiene, se pueden colocar dispersores en la llegada y salida de los tubos por la disponibilidad de energía y áreas para su instalación. Se proponen 2 equipos de corriente impresa uno en planta y otro en pozos, debiendo llegar ambos con similar cambio de potencial en el punto medio de la línea; otorgando un cambio de potencial de 0.30V en el

punto medio (L = 13150 m.) se calculará el cambio de potencial en los puntos de drenaje o equipos de corriente

$$\Delta V_o = 0.30 * \cosh(13150 * 4.4083 * 10^{-5}) = 0.352V$$

Similarmente calcularemos la corriente necesitada en los puntos de drenaje:

$$I_o = \frac{\Delta V_L}{R_o} \sinh(\alpha L)$$

$$R_o = \sqrt{R_{L \text{ paralelo}} * R_{T \text{ paralelo}}}$$

Realizando los cálculos necesarios:

$$R_o = \sqrt{3.38 * 10^{-6} * 1740.54} = 7.67 * 10^{-2} \text{ ohm}$$

$$I_o = \frac{0.30V}{7.67 * 10^{-2} \text{ ohm}} \sinh(4.4083 * 10^{-5} * 13150) = 2.4 \text{ amp}$$

$I_o$  = intensidad de corriente en el punto de drenaje.  
 $R_o$  = resistencia en el punto de drenaje.

Entonces el cambio de potencial e intensidad de corriente en cada punto de drenaje será:

$$\Delta V_o = 0.352V$$

$$I_o = 2.4 \text{ amp}$$

Hacia el final del tiempo de vida de las cañerías, la corriente requerida se estima ser 3 veces la que inicialmente se imprimió, de donde se puede estimar cuanto será la corriente media a circular en los ductos:

Corriente 35 años	Corriente inicial	Corriente media
2.4	0.8	1.6

Teniendo la corriente media, calculamos la cantidad de ánodos de sacrificio necesarios en cada dispersor:

$$Num. \text{ ánodos} = \frac{R_{consumo} * T * I_{req}}{F_{uso} * P}$$

Donde

<b>Ritmo de consumo</b>	0.34	kg/amp-año
<b>Tiempo de vida</b>	35	años
<b>Corriente requerida</b>	1.60	amp
<b>Factor de uso</b>	0.6	
<b>Peso de ánodo</b>	21	kg

**Número de ánodos = 1.51 ≈ 2 ánodos.**

Los dispersores de corriente se instalarán en la zona cercana a las plantas, alejados más de 100 metros de las estructuras enterradas; por las características del terreno se adoptará la instalación superficial horizontal.

Aplicando una disposición de ánodos horizontal, se calculará la resistencia a tierra del dispersor superficial horizontal. Para esto aplicamos la fórmula de Dwight modificada:

$$R_H = \frac{\rho * 10^{-2}}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L^2 + 4L\sqrt{S^2 + L^2}}{dS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1 \right)$$

donde:

- R<sub>h</sub> = resistencia a tierra del dispersor superficial horizontal [ohm].
- P = resistividad del suelo [ohm-cm].
- L = largo sumado de los ánodos [m].
- S = el doble de la profundidad del ánodo [m].
- D = diámetro del ánodo más su relleno [m].

Dispersor en planta.- Asumiendo valores de resistividad del suelo se considera 80000 ohm-cm. y la profundidad de instalación del dispersor de corriente en 1 metro, con un ánodo Fe-Cr-Si rodeado de coque de petróleo en un “canister” de diámetro de 8” (20.32 cm.) y largo de 96” (244 cm.); será necesario la instalación de 40 ánodos a fin de obtener una resistencia de puesta a tierra de 17 ohms.

Dispersor en pozos.- En forma similar se asume una resistividad promedio de 8.000 ohm-cm (1/10 de la de planta) y una profundidad de 1 metro, se necesitan 10 ánodos para obtener una R<sub>h</sub>= 3,9 ohms.

Para el cálculo de la tensión de salida de las unidades de corriente impresa se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = 3 + IP (R_h + RC)$$

Donde:

- V = tensión de salida [V]
- 3 = tensión en oposición estructura-dispersor estimada [V]
- IP = corriente máxima de protección [A]
- R<sub>h</sub> = resistencia del dispersor [Ω]
- RC = resistencia de conductor anódico y catódico, considerando 200 m de 25 mm<sup>2</sup> (0.15Ω)

En planta V= 35.76 Volts.

En pozos V= 12.72 volts.

La unidad de corriente impresa se encuentra constituida por un equipo rectificador monofásico, con transformador en baño de aceite, de regulación manual, con instrumentos indicadores de tensión y corriente de salida,

montados en bastidor. Finalmente las características del equipo rectificador son las siguientes:

Rectificador en planta: 40 Volts – 10 Amperes.

Rectificador en pozos: 20 Volts – 10 Amperes.

## VI.- Fuerza de jalado necesaria para la sarta de tuberías en el cruce direccional

Los siguientes son los cálculos hechos para el jalado de la sarta de tubería de 16", a través del túnel perforado por debajo del río Camisea en un cruce direccional. Los cálculos son basados en el método de la Asociación Americana de Gas "American Gas Association" (AGA) y planificados de acuerdo a un túnel en el que la primera sección es recta inclinada, seguida de una sección curva, la central horizontal recta, después otra curva hacia arriba y una última recta inclinada hacia arriba que llega a la superficie (ver planos del cruce).

### Fuerza de jalado necesaria en un cruce direccional

#### Datos:

Longitud del cruce.	L	m.	456
NPS tubería.		Pulg.	16
Espesor.	t	Pulg.	0.859

#### Propiedades de la tubería:

Diámetro externo.	DE	mm.	406.4
Espesor de pared.	t	mm.	21.82
Diámetro interno.	DI	mm.	362.76
SMYS acero.	S	psi	70000
Densidad del acero.	$\rho_{st}$	kg/mt <sup>3</sup>	7850
Momento de inercia del tubo.	I	pulg <sup>4</sup>	1174.96
Modulo de la sección.	Z	pulg <sup>3</sup>	146.87

#### Propiedades del fluido de perforación:

Peso del fluido de perforación.	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1200
Coeficiente promedio de fricción entre tubo / hueco.	$\mu_{soil}$		0.4
Coeficiente de arrastre del fluido acero / bentonita.	$\mu_{mud}$	kg/m <sup>2</sup>	35.2

#### Cálculo del peso efectivo del tubo en el lodo:

Peso de la tubería en el aire.		kg/m	206.94
Peso de fluido dentro del tubo.		kg/m	0.00
Volumen de fluido de perforación desplazado.		m <sup>3</sup> /m	0.13
Fuerza de flotabilidad ( $\uparrow$ ).		Kg/m	155.66
$\Sigma$ pesos.		kg/m	206.94
Resultante = $\Sigma - F_{flot}$ .	$W_R$	kg/m	51.27
Resultante es negativa.		kg/m	-51.27



**Análisis de fuerza de jalado en las diferentes secciones del túnel:**

**Fuerza de jalado máxima en la 1era sección (diagonal recta abajo):**

Angulo de entrada en el terreno.	$\theta$	grados	12
Longitud de la sección.	$L_1$	m.	55.80
Fricción = $W_R \cdot \cos\theta \cdot L_1 \cdot \mu_{soil}$ .	Fric	Kg.	1119.44
Arrastre <sub>mud</sub> = $\pi \cdot DE \cdot L_1 \cdot \mu_{mud}$ .	Drag	Kg.	2507.73
Gravedad = $W_R \cdot L_1 \cdot \text{sen}\theta$ .	G	Kg.	-594.86
$F_{jalado1} = \text{Fric} + \text{Drag} - G$ .	$F_{pull1}$	Kg.	<b>4222.04</b>

**Fuerza de jalado máxima en la segunda sección (curva abajo):**

Radio de curvatura.	R	m.	700
Angulo de inicio de la curva.	$\eta_1$	grados	12
Angulo al final de la curva.	$\eta_2$	grados	0
Angulo incluido.	$\alpha$	grados	12
Angulo promedio.	$\eta$	grados	6
Deflexión de arco = $R \cdot (1 - \cos(\alpha/2))$ .	h	m.	3.83
Momento de inercia del doblado.	I	m <sup>4</sup>	4.90E-04
Longitud del arco = $R \cdot \alpha \cdot \pi / 180$ .	$L_{arc1}$	m.	146.61
Modulo de Young.	E	kg/m <sup>2</sup>	2.11E+10
Iteración para cálculo de valor T.	T	Kg.	17346.71
Factor $J = \sqrt{(E \cdot I / T)}$	J	m.	24.41
Factor $U = L_{arc1} / J$	U		6.01
Factor $Y = 1/8 \cdot L_{arc1}^2 - J^2 \cdot (1 - (\cosh(U/2))^{-1})$	Y	m <sup>2</sup>	2149.92
Factor $X = 0.25 \cdot L_{arc1} - J/2 \cdot \tanh(U/2)$	X	m.	24.51
Fuerza <sub>contacto</sub> = $(T \cdot h - W_R \cdot \cos\eta \cdot Y) / X$	N	Kg.	7187.701
Fricción <sub>2</sub> = $N \cdot \mu_{soil}$	Fric <sub>2</sub>	Kg.	2875.08
Arrastre <sub>mud2</sub> = $\pi \cdot DE \cdot L_{arc1} \cdot \mu_{mud}$	Drag <sub>2</sub>	Kg.	6588.748
Gravedad <sub>2</sub> = $W_R \cdot L_{arc1} \cdot \text{sen}\eta$	G <sub>2</sub>	Kg.	-785.769
$F_{jalado2} = F_{pull1} + 2 \cdot \text{Fric}_2 + \text{Drag}_2 - G_2$	$F_{pull2}$	Kg.	<b>17346.71</b>

**Fuerza de jalado en la sección horizontal:**

Angulo con respecto a la horizontal.	$\theta_h$	grados	0
Longitud de la sección.	$L_3$	m.	34.80
Fricción = $W_R \cdot \cos\theta \cdot L_3 \cdot \mu_{soil}$	Fric <sub>3</sub>	Kg.	713.75
Arrastre <sub>mud3</sub> = $\pi \cdot DE \cdot L_3 \cdot \mu_{mud}$	Drag <sub>3</sub>	Kg.	1563.96
Gravedad <sub>3</sub> = $W_R \cdot L_3 \cdot \text{sen}\theta$	G <sub>3</sub>	Kg.	0.00
$F_{jalado3} = F_{pull2} + \text{Fric}_3 + \text{Drag}_3 - G_3$	$F_{pull3}$	Kg.	<b>19624.42</b>

**Fuerza de jalado máxima en la cuarta sección (curva arriba)**

Radio de curvatura.	R	m.	700
Angulo de inicio de la curva.	$\eta_1$	grados	0
Angulo al final de la curva.	$\eta_2$	grados	12
Angulo incluido.	$\alpha$	grados	12
Angulo promedio.	$\eta$	grados	6

Deflección de arco = $R*(1-\cos(\alpha/2))$	h	m.	3.83
Momento de inercia del doblado.	I	m <sup>4</sup>	4.90E-04
Longitud del arco = $R*\alpha*\pi/180$	L <sub>arc2</sub>	m.	146.61
Modulo de Young.	E	kg/m <sup>2</sup>	2.11E+10
Iteración para cálculo de valor T.	T	Kg.	34246.63
Factor J = $\sqrt{(E*I/T)}$	J	m	17.37
Factor U = $L_{arc2}/J$	U	--	8.44
Factor Y = $1/8*L_{arc2}^2-J^2*(1-(\cosh(U/2))^{-1})$	Y	m <sup>2</sup>	2393.81
Factor X = $0.25*L_{arc2}-J/2*\tanh(U/2)$	X	m	27.97
Fuerza <sub>contacto</sub> = $(T*h-W_R*\cos\eta*Y)/X$	N	Kg.	9059.614
Fricción <sub>4</sub> = $N*\mu_{soil}$	Fric <sub>4</sub>	Kg.	3623.846
Arrastremud <sub>4</sub> = $\pi*DE*L_{arc2}*\mu_{mud}$	Drag <sub>4</sub>	Kg.	6588.748
Gravedad <sub>4</sub> = $W_R*L_{arc2}*\sen\eta$	G <sub>4</sub>	Kg.	-785.769
F <sub>jalado4</sub> = $F_{pull3}+2*Fric_4+Drag_4-G_4$	F <sub>pull4</sub>	Kg.	<b>34246.63</b>

**Fuerza de jalado máxima en la 5ta sección (diagonal recta arriba):**

Angulo de salida en el terreno.	$\theta$	grados	12
Longitud de la sección.	L <sub>5</sub>	m.	75.13
Fricción <sub>5</sub> = $W_R*\cos\theta*L_5*\mu_{soil}$	Fric <sub>5</sub>	Kg.	1507.24
Arrastre <sub>mud5</sub> = $\pi*DE*L_5*\mu_{mud}$	Drag <sub>5</sub>	Kg.	3376.44
Gravedad <sub>5</sub> = $W_R*L_5*\sen\theta$	G <sub>5</sub>	Kg.	-800.93
F <sub>jalado5</sub> = $F_{pull4}+Fric_5+Drag_5-G_5$	F <sub>pull5</sub>	Kg.	<b>39931.24</b>

**Fuerza de jalado máxima F<sub>pull</sub> kg 39931**

**Calculo de los esfuerzos:**

**Esfuerzo axial.**

Área seccional de la tubería.	m <sup>2</sup>	0.03
Esfuerzo (kg/m <sup>2</sup> ).	kg/m <sup>2</sup>	1.51E+06
Esfuerzo (psi).	psi	2154.51

**Esfuerzo por flexión.**

Mínimo radio de curvatura.	m	700
Esfuerzo de fibra extrema = $3EI/(2ZR)$	psi	12627.43

**Esfuerzos combinados:**

72% del SMYS.	psi	<b>14781.94</b>
	psi	50400

**% del esfuerzo disponible usado 29.33**

Y estos son los cálculos para jalar la sarta de tubería de 20" en un túnel de igual trayectoria que el anterior (ver planos del cruce).

### Fuerza de jalado necesaria en un cruce direccional

#### Datos:

Longitud del cruce.	L	m.	456
NPS tubería.		Pulg.	20
Espesor.	t	Pulg.	0,804

#### Propiedades de la tubería:

Diámetro externo.	DE	mm.	508
Espesor de pared.	t	mm.	20,42
Diámetro interno.	DI	mm.	467,16
SMYS acero.	S	psi	70000
Densidad del acero.	$\rho_{st}$	kg/m <sup>3</sup>	7850
Momento de inercia del tubo.	I	pulg <sup>4</sup>	2237,80
Modulo de la sección.	Z	pulg <sup>3</sup>	223,78

#### Propiedades del fluido de perforación:

Peso del fluido de perf.	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1200
Coeficiente promedio de fricción entre tubo / hueco.	$\mu_{soil}$		0,4
Coeficiente de arrastre del fluido acero / bentonita.	$\mu_{mud}$	kg/m <sup>2</sup>	35,2

#### Cálculo del peso efectivo del tubo en el lodo:

Peso de la tubería en el aire.		kg/m	245,56
Peso de fluido dentro del tubo.		kg/m	0,00
Volumen de fluido de perforación desplazado.		m <sup>3</sup> /m	0,20
Fuerza de flotabilidad ( $\uparrow$ ).		kg/m	243,22
$\Sigma$ pesos		kg/m	245,56
Resultante = $\Sigma - F_{flot}$	$W_R$	kg/m	2,34
Resultante es negativa.		kg/m	-2,34

#### Análisis de fuerza de jalado en las diferentes secciones del túnel:

#### Fuerza de jalado máxima en la 1era sección (diagonal recta abajo):

Angulo de entrada en el terreno.	$\theta$	grados	12
Longitud de la sección.	$L_1$	m.	55,80
Fricción = $W_R * \cos\theta * L_1 * \mu_{soil}$	Fric	Kg.	51,05
Arrastre <sub>mud</sub> = $\pi * DE * L_1 * \mu_{mud}$	Drag	Kg.	3134,66

Gravedad = $W_R * L_1 * \text{sen}\theta$	G	Kg.	-27,13
$F_{\text{jalado1}} = \text{Fric} + \text{Drag} - G$	$F_{\text{pull1}}$	Kg.	<b>3212,84</b>

**Fuerza de jalado máxima en la segunda sección (curva abajo):**

Radio de curvatura.	R	m.	700
Angulo de inicio de la curva.	$\eta_1$	grados	12
Angulo al final de la curva.	$\eta_2$	grados	0
Angulo incluido.	$\alpha$	grados	12
Angulo promedio.	$\eta$	grados	6
Deflexión de arco = $R * (1 - \cos(\alpha/2))$	h	m.	3,83
Momento de inercia del doblado.	I	$m^4$	9,31E-04
Longitud del arco = $R * \alpha * \pi / 180$	$L_{\text{arc1}}$	m.	146,61
Modulo de Young.	E	$kg/m^2$	2,11E+10
Iteración para cálculo de valor T.	T	Kg.	13948,61
Factor $J = \sqrt{(E * I / T)}$	J	m.	37,53
Factor $U = L_{\text{arc1}} / J$	U		3,91
Factor $Y = 1/8 * L_{\text{arc1}}^2 - J^2 * (1 - (\cosh(U/2))^{-1})$	Y	$m^2$	1669,87
Factor $X = 0.25 * L_{\text{arc1}} - J/2 * \tanh(U/2)$	X	m.	18,63
Fuerza <sub>contacto</sub> = $(T * h - W_R * \cos\eta * Y) / X$	N	Kg.	3080,006
Fricción <sub>2</sub> = $N * \mu_{\text{soil}}$	Fric <sub>2</sub>	Kg.	1232,002
Arrastre <sub>mud2</sub> = $\pi * DE * L_{\text{arc1}} * \mu_{\text{mud}}$	Drag <sub>2</sub>	Kg.	8235,935
Gravedad <sub>2</sub> = $W_R * L_{\text{arc1}} * \text{sen}\eta$	G <sub>2</sub>	Kg.	-35,8324
$F_{\text{jalado2}} = F_{\text{pull1}} + 2 * \text{Fric}_2 + \text{Drag}_2 - G_2$	$F_{\text{pull2}}$	Kg.	<b>13948,61</b>

**Fuerza de jalado en la sección horizontal:**

Angulo con respecto a la horizontal.	$\theta_h$	grados	0
Longitud de la sección.	$L_3$	metros	34,80
Fricción = $W_R * \cos\theta * L_3 * \mu_{\text{soil}}$	Fric <sub>3</sub>	Kg.	32,55
Arrastre <sub>mud3</sub> = $\pi * DE * L_3 * \mu_{\text{mud}}$	Drag <sub>3</sub>	Kg.	1954,95
Gravedad <sub>3</sub> = $W_R * L_3 * \text{sen}\theta$	G <sub>3</sub>	Kg.	0,00
$F_{\text{jalado3}} = F_{\text{pull2}} + \text{Fric}_3 + \text{Drag}_3 - G_3$	$F_{\text{pull3}}$	Kg.	<b>15936,10</b>

**Fuerza de jalado máxima en la cuarta sección (curva arriba)**

Radio de curvatura.	R	m.	700
Angulo de inicio de la curva.	$\eta_1$	grados	0
Angulo al final de la curva.	$\eta_2$	grados	12
Angulo incluido.	$\alpha$	grados	12
Angulo promedio.	$\eta$	grados	6
Deflexión de arco = $R * (1 - \cos(\alpha/2))$	h	m.	3,83
Momento de inercia del doblado	I	$m^4$	9,31E-04
Longitud del arco = $R * \alpha * \pi / 180$	$L_{\text{arc2}}$	m.	146,61
Modulo de Young.	E	$kg/m^2$	2,11E+10
Iteración para cálculo de valor T.	T	Kg.	28027,9
Factor $J = \sqrt{(E * I / T)}$	J	m	26,48
Factor $U = L_{\text{arc2}} / J$	U	--	5,54
Factor $Y = 1/8 * L_{\text{arc2}}^2 - J^2 * (1 - (\cosh(U/2))^{-1})$	Y	$m^2$	2073,39

Factor $X = 0.25 * L_{arc2} - J/2 * \tanh(U/2)$	X	m	23,52
Fuerza <sub>contacto</sub> = $(T * h - W_R * \cos \eta * Y) / X$	N	Kg.	4775,032
Fricción <sub>4</sub> = $N * \mu_{soil}$	Fric <sub>4</sub>	Kg.	1910,013
Arrastre <sub>mud4</sub> = $\pi * D * E * L_{arc2} * \mu_{mud}$	Drag <sub>4</sub>	Kg.	8235,935
Gravedad <sub>4</sub> = $W_R * L_{arc2} * \text{sen} \eta$	G <sub>4</sub>	Kg.	-35,8324
F <sub>jalado4</sub> = $F_{pull3} + 2 * Fric_4 + Drag_4 - G_4$	F <sub>pull4</sub>	Kg.	<b>28027,9</b>

**Fuerza de jalado máxima en la 5ta sección (diagonal recta arriba):**

Angulo de salida en el terreno.	$\theta$	grados	12
Longitud de la sección.	L <sub>5</sub>	m.	75,13
Fricción <sub>5</sub> = $W_R * \cos \theta * L_5 * \mu_{soil}$	Fric <sub>5</sub>	Kg.	68,73
Arrastre <sub>mud5</sub> = $\pi * D * E * L_5 * \mu_{mud}$	Drag <sub>5</sub>	Kg.	4220,56
Gravedad <sub>5</sub> = $W_R * L_5 * \text{sen} \theta$	G <sub>5</sub>	Kg.	-36,52
F <sub>jalado5</sub> = $F_{pull4} + Fric_5 + Drag_5 - G_5$	F <sub>pull5</sub>	Kg.	<b>32353,71</b>

**Fuerza de jalado máxima: F<sub>pull</sub> Kg. 32354**

**Calculo de los esfuerzos:**

**Esfuerzo axial.**

Área seccional de la tubería.	m <sup>2</sup>	3,13E-02
Esfuerzo (kg/m <sup>2</sup> ).	kg/m <sup>2</sup>	1,03E+06
Esfuerzo (psi).	psi	1471,10

**Esfuerzo por flexión.**

Mínimo radio de curvatura.	m.	700
Esfuerzo de fibra extrema = $3EI / (2ZR)$	psi	15784,29

<b>Esfuerzos combinados:</b>	<b>psi</b>	<b>17255,38</b>
72% del SMYS.	psi	50400

**% del esfuerzo disponible usado 34,24**

Analizando vemos que en ambos casos se van a requerir similares fuerzas de jalado (39931 kgf y 32354 kgf), que son superadas fácilmente con una máquina de jalado de 100 ton. de fuerza. Extrañamente el jalado de la sarta de 16" requiere mayor fuerza que la de 20" (39931kgf > 32354kgf), lo cual se debe a que, el tubo de 20" tiene un menor espesor de pared y prácticamente viene flotando en el fluido de perforación durante el jalado, reduciendo el arrastre que pueda sufrir a diferencia del tubo de 16". Ambos esfuerzos aplicados están en el eje axial y son bastante menores en valor (y por lo tanto en porcentaje) que el esfuerzo disponible, puesto como límite elástico de esfuerzo en operación (72% del SMYS). En caso de prueba hidrostática, cuando el tubo esté en posición (por lo tanto flexionado) en el túnel, el máximo esfuerzo será aplicado tangencial y no axialmente. El esfuerzo axial por prueba hidrostática es 1/2 del tangencial, no afectando ni superando el límite elástico "SMYS", por lo que bajo condiciones de prueba hidrostática el tubo curvado en el túnel no se dañará y su deformación será leve, no afectando su integridad.

### **I.- Estructura de costos:**

Los costos involucrados en un proyecto de tendido de líneas son variables dependiendo de las características geográficas, diámetro de los ductos, longitudes, costos de mano de obra, supervisión, ingeniería, localización del proyecto es decir la distancia hacia los puntos de abastecimiento, centros poblados, disponibilidad de mano de obra, etc. Los costos se incrementan con la lejanía y la dificultad de tendido de los ductos por condiciones meteorológicas como lluvias e inundaciones, por las características del terreno y otras inherentes al proyecto como requerimientos de aislamiento térmico, mayor calidad en los materiales, etc. Cuanto menor es la longitud de un ducto, usualmente su costo por medida de longitud (milla, Km.) tiende a ser mayor que la de un ducto de mayor longitud, a pesar que los costos totales serán más grandes para el segundo.

En nuestro caso, el incremento en costos se identificarán por la lejanía a centros urbanos de producción, de servicios, mano de obra y abastecimiento de materiales que al final inciden en cada aspecto del costo total. Los demás costos notables como instalación y materiales son rubros de importancia comunes en cualquier proyecto.

La estructura de costos se conformará de:

- Levantamiento topográfico, procesamiento de datos, fotografías aéreas, servicio satelital, planos, etc.
- Permisos ante entidades del Estado por uso del DDV.
- Servicios de ingeniería básica y de detalle, estudios de impacto ambiental, estudios geotécnicos, etc.
- Labores de instalación que incluye todas las tareas propias de la labor de construcción, así como los de servicios generales.
- Supervisión de las labores de construcción, administración del proyecto, etc.
- Transporte de materiales e instrumentos para la construcción, equipos de la contratista, alimentos y conexos.
- Materiales y equipos como tuberías, válvulas, medidores de presión, accesorios, etc.
- Impuestos por importación de materiales y equipos.

- Seguros por protección en el traslado de materiales y equipos contra accidentes, pérdidas, siniestros y otras contingencias.
- Contingencias por desarrollo del proyecto (5%).

## II.- Costos:

Basados en la anterior estructura de costos, presentamos cada uno para cada ítems mencionados:

<b>Levantamiento topográfico</b>	<b>Precio unitario (US\$/km)</b>	<b>Precio total (US\$)</b>
Servicio por relevamiento topográfico, procesamiento de datos, etc.	\$4.942,97	\$158.174,91

<b>DDV</b>	<b>Precio unitario (US\$/m.)</b>	<b>Precio total (US\$)</b>
Costo de derecho de vía, permisos requeridos, tala y desbroce, nivelación y compactación, acuerdos con propietarios, servidumbres, etc.	\$120,00	\$3.156.000,00

Y los costos requeridos para el servicio de instalación - tendido

<b>Labores de construcción</b>	
Movilización y desmovilización de personal	\$599.040,00
Campamentos principales y secundarios (movilización - desmovilización)	\$1.216.435,00
DDV: Tala - desbroce - movimientos de tierra	\$1.582.282,00
DDV: perfilado	\$616.860,00
Excavación	\$1.093.416,00
Juntas dobles	\$217.854,00
Desfile de tubos	\$855.710,00
Doblado	\$553.267,00
Alineamiento y soldadura	\$1.888.334,00
Radiografiado	\$285.947,00
Reparaciones	\$190.632,00
Recubrimiento de juntas	\$254.986,00
Descenso a zanja	\$1.673.141,00

Prueba hidrostática y complementarias	\$352.966,00
Relleno de zanjas	\$711.600,00
Cruces subterráneos principales y secundarios	\$2.208.487,00
Cruces aéreos	\$494.332,00
Protección catódica	\$77.716,00
Servicios: campamentos principales	\$830.090,00
Servicios: campamentos menores	\$780.713,00
Servicios: mantenimiento y alimentación	\$1.291.143,00
Limpieza de traza y control de erosión	\$1.612.276,00
Accesorios y trampas	\$273.541,00
Transportes varios	\$2.100.902,00
Secado	\$160.867,00
Comunicaciones	\$717.462,00
	<b>\$22.639.999,00</b>

Los costos para transporte (aproximadamente US\$ 302.2 / ton. transportada):

<b>Costos de transporte</b>	
Transporte de tuberías	\$3.442.572,00
Transporte de otros materiales	\$51.073,00
Transporte de equipos, combustibles alimentos, etc.	\$546.350,30
	<b>\$4.039.995,30</b>

Los costos de los materiales:

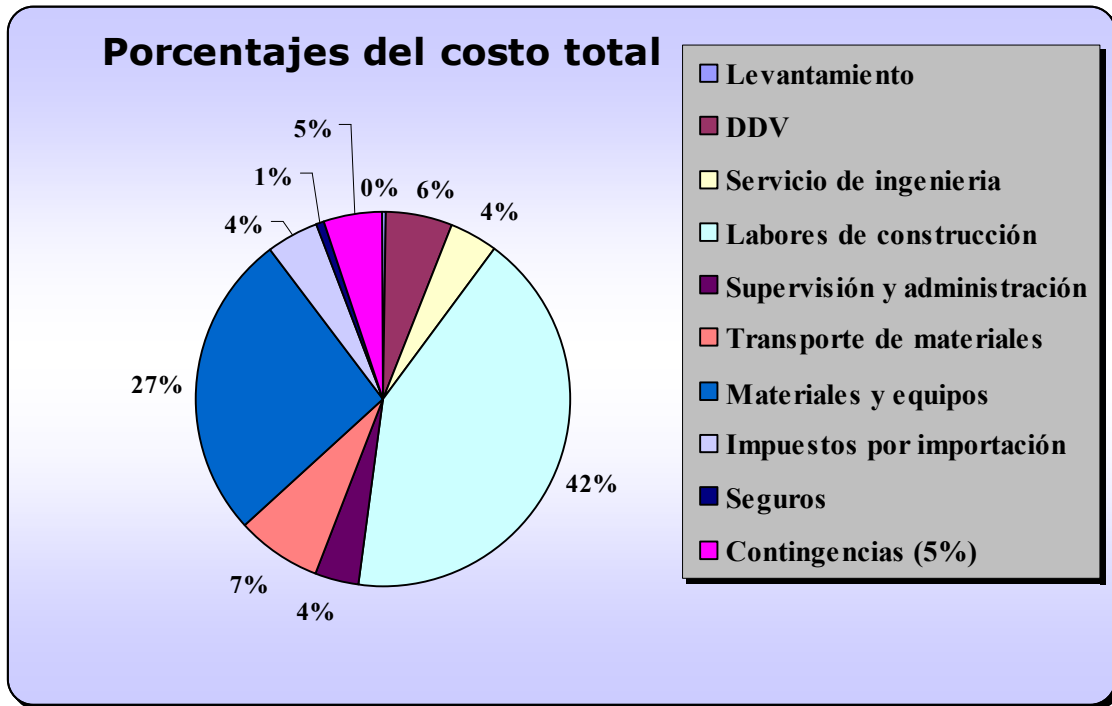
<b>Costo de materiales</b>	<b>Precio unitario (US\$/m.)</b>	<b>Precio total (US\$)</b>
Tubería de 20" (con recubrimiento y flete a puerto)	\$305,61	\$8.037.621,90
Tubería de 16" (con recubrimiento y flete a puerto)	\$191,57	\$5.038.159,50
10% más de la longitud total (26300 m.)		\$1.307.578,14
Accesorios (bridas, válvulas de aislamiento, medidores de flujo y presión, válvulas, etc.)		\$190.000,00
		<b>\$14.573.359,54</b>



Resumen del estimado total:

<b>Rubros:</b>	<b>Costo (MMUS\$)</b>
Levantamiento topográfico	0,16
DDV	3,16
Servicio de ingeniería	2,36
Labores de construcción	22,64
Supervisión y administración	2,09
Transporte de materiales	4,04
Materiales y equipos	14,57
Impuestos de importación	2,42
Seguros	0,39
Contingencias (5%)	2,73
<b>Total</b>	<b>54,57</b>

Y colocando bajo la forma de porcentajes para cada rubro:



Con el costo total se hace un estimado de cuanto cuesta el proyecto por unidad de longitud:

$$\text{Costo(US\$ / mt)} = 54567971 / 26300 = 2074.83 \text{US\$ / mt}$$

$$\text{Costo(US\$ / milla)} = 3338398 \text{US\$ / milla} \approx 3.340 \text{MMUS\$ / milla}$$

**Sobre la planificación:**

1. La selección de la ruta para un ducto debe tener un cuidadoso balance entre las perspectivas económicas, las restricciones ambientales y sociales, las posibilidades técnicas y tecnológicas, las dificultades geográficas así como las distancias más cortas posibles y el cumplimiento de requerimientos normativos de los organismos estatales y privados del país donde se ubica el proyecto y de los internacionales.
2. En el planeamiento de un proyecto de tendido de ductos en selva se presentan: retos para el transporte de personal y de equipos pues sólo es posible la vía aérea y la fluvial, problemas asociados a la logística por ser una zona alejada de centros de abastecimiento y producción, carencia de disponibilidad de energía, las variaciones estacionales que limitan el transporte y la construcción, etc.
3. Los principales obstáculos que se enfrentan al seleccionar una traza entre la planta y los pozos son: el río Camisea, quebradas de cauce estacional como permanente, colinas altas fuerte y medianamente disectadas de pendientes empinadas, bosques primarios de difícil regeneración y poco intervenidos, comunidades nativas y tierras usadas por las mismas, abismos, suelos fácilmente erosionables, etc.
4. Los rasgos que debe presentar una buena traza son: minimizar el número de cruces de arroyos, quebradas, ríos y cursos principales de agua, minimizar los cruces aéreos, alejarse de los asentamientos de colonos y nativos así como de las tierras que usan para su subsistencia, una ruta que muestre estabilidad frente a la erosión, evitar abismos y cambios abruptos de nivel, evitar alargar demasiado la ruta, evitar el paso por áreas reservadas, minimizar el movimiento de suelos, reducir el impacto sobre la flora y fauna entre otros.
5. El lugar seleccionado para el cruce del río Camisea debe mostrar un lecho favorable para el túnel a perforar, riberas estables que no sean fácilmente erosionables, espacios de trabajo para la colocación del equipo de perforación direccional, tramos de ancho de río que impidan el flujo erosivo de las aguas, estabilidad del cauce, alejamiento de las collpas de alimentación de animales, zonas de recolección, caza y vivienda de nativos y zonas de desove de especies acuáticas.
6. La traza seleccionada cruza las crestas de las colinas que rodean la planta hacia el noroeste, minimiza el trayecto en zonas de bosques primarios, evita zonas bajas y cruces de arroyos excesivos y de cauce permanente, sólo cruza el río Camisea una vez, minimiza el cruce por las tierras de los nativos, permite la existencia de campamentos satélites y

canteras cercanos al río y reduce el paso por zonas de pendientes y colinas.

7. Los cruces aéreos son de poco uso en la superación de obstáculos con el fin de llegar a un cruce subterráneo estable, cuando el movimiento de tierras y desbroce es excesivo tal como los cruces de los arroyos Purocari y Sachavacay, de poco ancho para recurrir a cruce direccional o de mucho movimiento de tierra para un cruce a cielo abierto.
8. Las áreas a desforestarse contemplan aparte del ancho de vía a lo largo de la traza, extensiones importantes como zonas de campamentos, talleres, rutas alternas, mayores áreas en quebradas, cruces, taludes, desvíos temporales, helipuertos, botaderos, zonas de acopio de material, zonas de trabajo en el río Camisea por el cruce, lo que totaliza aproximadamente 100.46 Ha.

### ***Sobre la fase de construcción:***

1. El flujo multifásico en tuberías presenta problemas por la dificultad de conocer las caídas de presión, velocidades de flujo y dimensionamiento de cañerías adecuadas para un juego de parámetros establecidos. Su característica de tener varios regímenes de flujo permite una gran variación del comportamiento ante pequeños cambios de presión y temperatura, haciéndolos muy difícil de predecir.
2. En un terreno inclinado o propenso a presentar diferencias de altitud con pendientes inclinadas el flujo multifásico puede fácilmente provocar tacos de líquidos por la diferencia de velocidades y viscosidades entre gases y líquidos por efectos de gravedad. Tales tacos son peligrosos para la operación, porque requieren de altas presiones para ser removidos de las partes bajas y pueden dañar partes del sistema.
3. Para la prevención de tacos debemos manejar adecuadamente las velocidades de flujo e impedir que los líquidos se asienten y constituyan una barrera. Constantes programas de limpieza del ducto o “pigging” aliviarán el problema haciendo posible la operación de ductos con doble flujo.
4. Los anchos de vía para el tendido de ductos en áreas ambientalmente sensibles deben ser lo más pequeños posibles, pero a la vez permitir trabajar con seguridad y comodidad suficientes para evitar accidentes y permitir las maniobras.
5. En el desbroce usaremos la técnica de tumbado dirigido para el derrumbe de árboles dentro del DDV, evitando la afectación de áreas vecinas; no se empujará el desmonte hacia los costados (especialmente hacia los abismos) ni se quemará los restos porque los troncos serán desarmados y aprovechados.

6. La nivelación de la vía permitirá minimizar los cambios abruptos de nivel que la cañería seguirá en su recorrido, hará menos agudos los ángulos en crestas y valles, estabilizará el terreno de trabajo y disminuirá las pendientes para permitir las maniobras y el tránsito.
7. La nivelación minimizará los movimientos de tierra sin sacrificar la estabilidad suficiente en el DDV que permita las operaciones de tendido. Los movimientos de tierra deben acumular los montículos en partes bajas e impedir la existencia de capas que se deslicen cuesta abajo volviendo inestable la ruta, tampoco se debe arrojar tierra hacia quebradas y abismos circundantes que aumenten inestabilidad.
8. La remoción de tierras alterará la fertilidad de los suelos que en el bosque son identificados por la delgada capa superficial que contiene la mayor cantidad de nutrientes. Esto justifica la separación y cuidado de la capa superficial del suelo para su posterior recolocación a fin de no alterar la fertilidad, sobretodo en terrenos agrícolas.
9. El doblado de tubos se hace en frío por deformación controlada, constante y elástica de la sección, porque el aplicar calor altera las propiedades mecánicas del tubo, haciéndolo más débil o menos resistente a las presiones y esfuerzos a que será sometido. Luego del doblado de tubos se debe verificar que los mismos han quedado libres de arrugas, dobleces y abolladuras, dejando sin curvar los extremos del tubo para evitar ovalidad. La soldadura de fabricación de los tubos debe quedar en un eje neutral o donde los esfuerzos sean minimizados.
10. Las dimensiones de zanja en tramo normal varían de acuerdo al tamaño y número de tuberías. La zanja típica tendrá entre 1.6 a 2 metros de ancho y 1.5 m. de profundidad, dejando espacio suficiente para acolchonar las tuberías. La profundidad variará en cruces de quebradas, arroyos y en crestas; el ancho variará en curvas horizontales.
11. Las soldaduras de una línea en ambientes no protegidos o al aire libre requieren un medio de protección como gases, escoria sobre el cordón de soldadura o protección externa (barreras, carpas) que impidan que el ambiente afecte la calidad de la soldadura o la contamine con polvo, arena o partículas.
12. La inspección antes, durante y después de la soldadura asegurará un trabajo de calidad, minimizando las fallas porque la soldadura debe ser más fuerte que el resto del tubo. La preparación para la soldadura es la fase que requiere mayor cuidado en la inspección.
13. Se escoge usar procesos de soldadura “SMAW” por su versatilidad, eficiencia y facilidad para trabajo en campo, además de ofrecer un ambiente de protección a la soldadura en estado fundido. Otro proceso bastante confiable por la calidad de soldadura que se logra es “FCAW”, pero requiere más elementos y cuidado en su preparación.

14. El transporte de gas a altas presiones por una zona sensible a accidentes requiere de un buen control de calidad por lo que es conveniente probar el 100% de las soldaduras.
15. El método de prueba de soldaduras recomendado es por radiografiado - gammagrafiado que permite una evaluación rápida y eficiente de todo el espesor de la soldadura, dejando un registro de lo probado para posterior evaluación de las partes. Sin embargo tiene la desventaja de exponer al personal y al ambiente a dosis pequeñas de radioactividad y la posibilidad de generar accidentes por el uso continuo.
16. Los recubrimientos para las juntas soldadas deben asegurar total contacto y adherencia con la superficie del cordón de soldadura y en el traslape con el recubrimiento del cuerpo del tubo para evitar su posterior deterioro y desadherencia por humedad u otros agentes. El recubrimiento debe asegurar facilidad en su uso, maniobrabilidad en su colocación, compatibilidad con el otro recubrimiento y resistencia en su manipulación al corte, golpes pequeños, contacto con superficies, etc. De otro lado el personal debe manipular el tubo de manera que no se genere daño al recubrimiento e inspeccionarlo para detectar roturas después de su colocación y de ser bajado a zanja.
17. El acolchonamiento de tierra o arena seleccionada que rodea al tubo en la zanja brinda un amortiguamiento contra esfuerzos por dilatación, contracción, doblado en curvas, peso en partes bajas de pendientes, etc., además de impedir el contacto con superficies duras, puntiagudas o filosas.
18. Los métodos de cruce de cursos de agua a cielo abierto generan perturbación en los lechos, movilizan grandes cantidades de tierra en la excavación de zanja y remoción, alteran los cursos de agua, por lo que deben realizarse en épocas de menor caudal, evitando poner en contacto la maquinaria con el agua en movimiento pues existe el peligro potencial de contaminación. Por estas razones los cruces a cielo abierto no son contemplados desde el punto de vista ambiental como soluciones de cruce a menos que las circunstancias lo justifiquen. Como punto a favor la complejidad es menor en la realización de tales cruces que las técnicas de perforación y de cruce direccional.
19. La perforación direccional, es una técnica de cruce más compleja porque se introduce la tubería por un túnel perforado y no se afectan los lechos, ni los cursos, ni se tiene que esperar épocas de menor caudal y se pueden cruzar grandes distancias. Esta técnica también se puede usar en áreas urbanas donde es muy difícil o imposible superar el obstáculo por un cruce abierto. Como desventaja es costosa y se tiene que estudiar y planificar cuidadosamente el cruce para evitar accidentes y fracasos en el proceso.
20. En zonas de cruces de quebradas, ríos, arroyos y cruces aéreos, el espesor de la tubería debe aumentar para darle un mayor factor de

seguridad, otorgando una protección mecánica. Otra protección en zonas anegadas para contrarrestar la flotabilidad es la colocación de recubrimientos de concreto.

21. En una prueba hidrostática, se aplican presiones que asegurarán que existe una alta calidad en las soldaduras y en la fabricación de los tubos, descartando defectos que pudieran inducir a futuras fallas y roturas en el rango de presiones de operación previstas en el diseño. Como estándar para tuberías de gas, la presión de prueba producirá un esfuerzo de tensión tangencial del 90% del "SMYS". No obstante hay especialistas que opinan que se puede elevar más este rango sin dañar la integridad del ducto y a la vez probar que tiene una mayor calidad en su construcción.
22. La calidad de los resultados de una buena prueba hidrostática dependen de una buena operación de llenado en la que se asegure que sólo pueden haber quedado atrapadas cantidades mínimas de aire. Si la cantidad es mayor impedirá una adecuada presurización, porque el aire primero reducirá su volumen antes de permitir que las nuevas cantidades de agua introducidas lleguen a ejercer la fuerza y deformación proporcionales y esperadas en las paredes del tubo.
23. Las variaciones de temperatura tienen efectos significativos en las variaciones de presión de la tubería durante la prueba (reposo). Al manejarse grandes volúmenes de agua, la variación de algunos grados puede inducir a la contracción o la expansión del diámetro del tubo al igual que en el volumen del agua, traducidos en diferencias de presión.
24. Si al aplicarse las ecuaciones de determinación de cambios de presión por temperatura los resultados no llegan a igualar el cambio, se deberá buscar las posibles causas en posibles errores en la medición, fallas en los equipos de medición o posibilidad de fugas.
25. Los requerimientos de secado de tuberías de gas especifican que éstas deben quedar sin la presencia de gotas de agua, que puedan generar hidratos al contacto con el gas a transportarse y deben quedar con una temperatura de punto de rocío que asegure que la humedad bajo las presiones y temperaturas de operación no se convierta en gotas de agua.
26. Hay 2 métodos principales para proteger exteriormente la cañería del ataque químico del medio en que se encuentra: un recubrimiento anticorrosivo y químicamente inalterable por el medio que debe cubrir toda el área de la tubería y, una protección catódica que vuelve cátodo a la tubería impidiendo pérdida de electrones en caso que llegue a abrirse un hueco en el recubrimiento.
27. La posibilidad de corrosión interna de las cañerías y accesorios se evalúa a partir de la composición química del flujo de gas. Para liberar al flujo de su capacidad corrosiva existen métodos como la inyección de

químicos, separación in situ antes de entrar al tubo, etc., pero donde es difícil aplicarlos o la posibilidad de tener corrosión es baja podemos implementar sistemas de monitoreo de la corrosión, así como otorgar dentro del diseño un mayor espesor al tubo que alargue su vida, junto con programas constantes de envío de chanchos que limpien la superficie interior.

### **Sobre los cálculos:**

1. Se comprueba que el peso de las tuberías de 20" y 16" de pared gruesa, usada en cruces, sea suficiente para cumplir la condición de igualar en 1.2 veces el empuje del agua, por lo que se puede usar revestimientos de menor espesor que el calculado (5 cm.) o sólo revestir ciertas secciones del tubo.
2. Las secciones aéreas de tubo muestran una menor deformación y un mayor espacio libre sin apoyo, cuando cuentan con hormigonados de refuerzo en sus extremos.
3. En una sección aérea la condición más crítica de esfuerzos se da cuando se está efectuando la prueba hidrostática, en que se suman el peso del tubo, el peso del agua y la presión ejercida por la misma en las paredes del tubo. Para longitudes evaluadas de hasta 35 m de espacio libre, los tubos de mayor espesor mostraron una deformación aceptable y esperada dentro de los límites.
4. En la determinación de las longitudes de los tramos en que se dividirá el ducto para la prueba hidrostática, intervienen una serie de factores como la disponibilidad de fuentes y caudales de agua suficientes, la ausencia de tramos especiales e instalaciones de superficie (sectores con válvulas, zonas pobladas, etc.), y la presión ejercida por la cabeza hidrostática de la diferencia de altitudes entre los puntos más altos y más bajos de la cañería, que se adiciona a la presión de prueba aplicada en el punto más alto de la traza.
5. Para la operación de jalado de tuberías dentro del túnel, se mostró que el tubo de 16" necesitará una mayor fuerza que el 20", en razón de su mayor espesor por ser tubería de más alta presión (tubería de reinyección) y de menor diámetro, haciendo que su flotabilidad sea contrarrestada por su peso, generando un mayor arrastre.
6. Los esfuerzos de tensión que se apliquen durante el jalado de los tubos son axiales y menores que el esfuerzo para deformación permanente. En condiciones de prueba hidrostática, cuando el tubo esté flexionado en el túnel, el máximo esfuerzo de tensión será aplicado tangencial y no axialmente, por lo que la deformación axial por la curva no hará llegar al tubo al límite de deformación elástica.

**Sobre los costos:**

1. Cada proyecto de tendido de líneas presenta sus propias particularidades respecto a los costos, basado en los obstáculos geográficos que tendrá que sortear, diámetro de los tubos, longitudes, locación, costos de mano de obra, etc.
2. Como resultado de los costos del tendido de ductos en un área o región particular, siempre se tratará de llegar a evaluar el parámetro costo / km o costo / milla, que caracteriza a cada proyecto.
3. Usualmente el costo unitario por unidad de longitud es menor cuanto más larga es la longitud de la línea.
4. La labor de construcción es la que representa el mayor costo, representando un 42%, seguido de los materiales empleados con un 27%.
5. En los costos evaluados, parte considerable del total son los costos por transporte así como los referidos a traslados de personal. Es decir, la logística suma una cifra importante por la lejanía de la selva con respecto a los centros poblados y de producción y afecta en general los costos de los demás rubros.
6. El proyecto totaliza 54.57 MMUS\$, lo que resulta en 2074.83 US\$/mt o 3.34 MMUS\$/milla.



## 8

### Apéndice y glosario

Tabla 8.1

<b>Factor de diseño por ubicación (ASME B31.8)</b>		
<i>Clase 1 Tipo 1</i>	Desiertos, tierras y locaciones escasamente pobladas	<b>0,8</b>
<i>Clase 1 Tipo 2</i>	Para líneas con P de prueba mayor al 110% de la P de diseño	<b>0,72</b>
<i>Clase 2</i>	Zonas industriales, zonas cercanas a pueblos, ranchos, cruces de cursos de agua y caminos, etc.	<b>0,6</b>
<i>Clase 3</i>	Viviendas en zonas residenciales, centros comerciales, etc.	<b>0,5</b>
<i>Clase 4</i>	Edificios con varios pisos, zonas de tráfico pesado, áreas densamente pobladas	<b>0,4</b>

Tabla 8.2

<b>Factor por soldadura longitudinal de juntas (ASME B31.8)</b>		
<i>Especificación</i>	<i>Clase de tubería</i>	<i>E</i>
ASTM A53	Sin costura	<b>1,00</b>
	Soldadura por resistencia eléctrica	<b>1,00</b>
	Soldadura por horno	<b>0,60</b>
ASTM A106	Sin costura	<b>1,00</b>
ASTM A134	Soldadura por arco de fusión elect.	<b>0,80</b>
ASTM A135	Soldadura por resistencia eléctrica	<b>1,00</b>
ASTM A139	Soldadura por fusión eléctrica	<b>0,80</b>
ASTM A211	Soldadura espiral	<b>0,80</b>
ASTM A381	Soldadura doble por arco sumergido	<b>1,00</b>
ASTM A671	Soldadura por fusión eléctrica	<b>1,00</b>
ASTM A672	Soldadura por fusión eléctrica	<b>1,00</b>
API 5L	Sin costura	<b>1,00</b>
	Soldadura por resistencia eléctrica	<b>1,00</b>
	Soldadura por destello eléctrico	<b>1,00</b>
	Soldadura por arco sumergido	<b>1,00</b>
	Soldadura por horno	<b>0,60</b>
API 5LX	Sin costura	<b>1,00</b>
	Soldadura por resistencia eléctrica	<b>1,00</b>
	Soldadura por destello eléctrico	<b>1,00</b>
API 5LS	Soldadura por arco sumergido	<b>1,00</b>
	Soldadura por resistencia eléctrica	<b>1,00</b>
	Soldadura por arco sumergido	<b>1,00</b>

Tabla 8.3

<b>Factor por incremento de temperatura (ASME B31.8)</b>	
<i>Temperatura (°F)</i>	<i>Factor por incremento</i>
250 o menos	1,000
300	0,967
350	0,933
400	0,900
450	0,867

Tabla 8.4

<b>F<sub>wt</sub> - Factor para corregir el ΔV por temperatura desde los 60 °F hasta la temperatura de prueba</b>			
<i>Temperatura °F</i>	<i>F<sub>wt</sub></i>	<i>Temperatura °F</i>	<i>F<sub>wt</sub></i>
35	0,9990777	70	1,0010364
36	0,9990590	71	1,0011696
37	0,9990458	72	1,0012832
38	0,9990375	73	1,0014229
39	0,9990340	74	1,0015420
40	0,9990357	75	1,0016883
41	0,9990421	76	1,0018130
42	0,9990536	77	1,0019657
43	0,9990694	78	1,0021222
44	0,9990903	79	1,0022552
45	0,9991150	80	1,0024178
46	0,9991451	81	1,0025561
47	0,9991791	82	1,0027251
48	0,9992168	83	1,0028684
49	0,9992599	84	1,0030435
50	0,9993061	85	1,0031919
51	0,9993615	86	1,0033730
52	0,9994112	87	1,0035573
53	0,9994715	88	1,0037133
54	0,9995322	89	1,0039034
55	0,9996046	90	1,0040642
56	0,9996683	91	1,0042601
57	0,9997488	92	1,0044357
58	0,9998191	93	1,0046271
59	0,9999074	94	1,0047972
60	1,0000000	95	1,0050043
61	1,0000803	96	1,0052142
62	1,0001805	97	1,0053915
63	1,0002671	98	1,0056067
64	1,0003746	99	1,0057884
65	1,0004674	100	1,0060090
66	1,0005823	101	1,0061949
67	1,0006811	102	1,0064207
68	1,0008031	103	1,0066108
69	1,0009290	104	1,0068417

## Glosario

- **CCNN:** Iniciales de comunidades nativas.
- **DDV:** siglas de Derecho de Vía, lugar de paso en donde está permitido realizar las labores de construcción de las tuberías. En inglés es conocido como Right of Way, con siglas ROW.
- **DE:** Diámetro externo de las tuberías.
- **DI:** Diámetro interno de las tuberías.
- **FCAW:** siglas de Flux Core Arc Welding, proceso de soldado en el que se usa un electrodo continuo para metal de aporte, que es un alambre hueco relleno de una sustancia llamada “flux”. El flux viene en forma de hilos tubulares que se descomponen para formar la escoria que protegerá la soldadura en estado fundido. Variaciones del método incluyen el uso de gas de protección, adicional para el ambiente de soldadura.
- **ID:** siglas de inside diameter o diámetro interno en inglés.
- **MAOP:** siglas de Maximum Allowable Operating Pressure o máxima presión disponible para operación, es la presión definida a causar la máxima tensión disponible de tangencia, fracción del “SMYS” definida por factores de seguridad. Para fines de diseño y cálculos viene a ser la presión de diseño.
- **MMPCED:** siglas de millones de pies cúbicos estándar por día, medida de flujo típica del gas.
- **MMSCFD:** siglas de million standard cubic feet per day, unidad de flujo en inglés muy común en los libros. En español es MMPCED.
- **NDT:** siglas de Non Destructive Testing, pruebas no destructivas a las que se expone la soldadura para evaluación de su integridad y calidad.
- **NPS:** siglas de Nominal Pipe Size o diámetro nominal de tubería, medida referencial para conocer el diámetro de un tubo pero no siempre igual a su DE. Para tubos con  $\varnothing > 14$ ” el NPS = DE.
- **OD:** siglas de Outside diameter o diámetro externo en inglés.
- **Overbend:** tipo de curva que se caracteriza por tener su sección cóncava apoyada en el terreno

- **Overhead:** técnica de tendido de ductos para superación de obstáculos mediante secciones o cruces aéreos, es decir secciones de tubería que no irán enterradas.
- **ROW:** siglas de Right of Way, en español Derecho de Vía
- **Sag:** tipo de curva que se caracteriza por tener su sección convexa apoyada en el terreno
- **SAW:** siglas de Submerged Arc Welding, proceso de soldadura en el que se usa un arco eléctrico para calentar el electrodo consumible que aportará metal a la junta de soldado. Sin embargo toda la junta estará rellena de un material fundente que por acción del calor se descompondrá para formar la escoria protectora, por lo que el proceso de soldado se realizará “sumergido” dentro del material.
- **Sideboom:** maquinaria usada especialmente para la manipulación de tuberías durante el proceso de tendido, que cuentan con plumas y contrapesos que facilitan su labor.
- **Sidebend:** curva horizontal en el ducto
- **SMAW:** siglas de Shielded Metal Arc Welding, proceso de soldadura en el que se usan electrodos consumibles que proporcionarán metal de aporte para la junta a soldar y están recubiertos por una protección que conforme se consume produce el gas de protección para la soldadura en estado fundido. El proceso es discontinuo, no usa un solo electrodo sino varillas que van aportando el metal.
- **SMYS:** siglas de Specified Minimum Yield Strenght o Tensión de fluencia mínima especificada y representa el punto donde el acero del tubo deja de tener una deformación elástica proporcional al esfuerzo aplicado para pasar a una deformación plástica que alterará sus propiedades mecánicas permanentemente.
- **Topsoil:** capa superficial del terreno en la que se encuentran gran cantidad de nutrientes que permiten el crecimiento de la flora.
- **Trenchless:** en inglés significa sin zanja, refiriéndose a los métodos de perforación direccional en que se hace un túnel por donde irán colocadas las cañerías sin necesidad de cavar una zanja desde superficie

## **Bibliografía:**

- ASME B31.8 Norma principal para sistemas de transmisión y distribución de gas de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos – “American Society of Mechanical Engineers”.
- ASME B31.4 Norma para sistemas de transporte de líquidos como hidrocarburos y otros.
- API 1104 - Norma del API para calidad en el trabajo de soldadura de líneas Instituto Americano del Petróleo – “American Petroleum Institute”.
- API 5L Especificación para fabricación de tuberías.
- Pipeline Design & Construction: a Practical Approach – M. Mohitpour, H. Golshan y A. Murray – ASME PRESS 2<sup>da</sup> edición – 2003.
- Pipeline Rules of Thumb: Handbook – E. W. McAllister – Elsevier, Inc. – 6<sup>ta</sup> edición – 2005.
- Piping and Pipeline Engineering: design, construction, maintenance, integrity and repair – George A. Antaki – CRC Taylor and Francis – 2003.
- Natural Gas Production Engineering – Chi U. Ikkoku – John Wiley and Sons, Inc. – 1984.
- The Technology of Artificial Lift Methods Volume 1 – Kermit E. Brown y H. Dale Beggs – Penn Well Books – 1977.
- Oil and Gas Pipeline Fundamentals – John L. Kennedy – Penn Well Books 2<sup>da</sup> edición – 1993.
- DS 015-2006 - Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos – MEM.
- Estudio de Impacto Ambiental – Social para el Lote 88 – ERM – 2001
- Proyecto Integral de Desarrollo del gas de Camisea – Petróleos del Perú PETROPERÚ - 1988.