



La liberación de tensiones de cañerías enterradas es un método conocido para mitigar o disminuir parcial o totalmente las tensiones acumuladas en cañerías que estuvieron sometidas a distintos tipos de cargas, principalmente aquellas que se generaron por diferentes movimientos de suelos pendiente abajo en laderas empinadas inestables.

Dentro de las geo-amenazas habituales que pueden impactar negativamente una línea de conducción (gasoducto, oleoductos, poliductos, etc.), se encuentran aquellas relacionadas con los movimientos de remoción en masa. Estos movimientos se caracterizan principalmente por el desplazamiento, pendiente abajo, de todo tipo de material presente en la superficie terrestre por la acción exclusiva de la gravedad. Ejemplos conocidos de ello son los deslizamientos de suelos, desmoronamientos, avalanchas, reptación, etc.

La velocidad del movimiento de estos procesos puede ser de muy lenta a severamente rápida, con consecuencias devastadoras, en algunos casos, para las personas y los bienes.¹

Dado que la mayoría de las líneas de conducción están enterradas, durante la operación es habitual que se encuentren influenciadas por estos fenómenos cuando la geomorfología del terreno y el clima tienen determinadas caracte-

Liberación de tensiones en zonas con pendiente paralela a la cañería

La importancia de la elección del inicio de la excavación

Por **Manuel Ponce** y **Pedro Hryciuk** (Transportadora de Gas del Norte S.A.)

rísticas, como la pendiente del lugar, el tipo de suelos, el régimen de lluvias, la cobertura vegetal y la modificación del paisaje por acción del hombre. Según la posición de la tubería respecto de la dirección de movimiento de la masa de materiales involucrados, los esfuerzos que se generan son variables y combinados. Los principales son los movimientos por flexión, tracción, compresión y torsión (Figura 1).

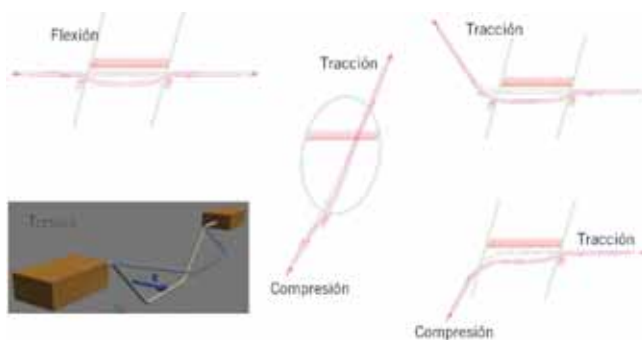


Figura 1. Principales esfuerzos generados sobre las tuberías por movimientos de remoción en masa frecuentemente accionados por la presencia de pendientes y lluvias estacionales por donde está tendida la línea.

Existe un número de métodos de control de los movimientos de los suelos y de la cañería alojada en ellos. Una vez detectado el movimiento es posible cuantificarlo y monitorearlo, de esta forma se busca controlar los efectos que puedan afectar a la integridad de la cañería, que suelen ser desde cargas tensionales indeseadas a la generación de arrugas concretas y eventualmente la rotura.

El objetivo final del control y monitoreo es, en una primera instancia, evitar una rotura; y en una instancia previa, evitar las arrugas, allí el éxito de la gestión del control será mucho mejor al igual que evitar cargas indeseadas.

Una vez detectado el movimiento del terreno y, por transmisión directa, la cañería, es facultad de los especialistas evaluar con las herramientas disponibles la posibilidad de mitigar los esfuerzos excesivos recibidos por la tubería o verificar de forma directa la presencia o no de posibles arrugas.

Uno de los métodos más comunes para devolver a la cañería su estado tensional más estable es la liberación de tensiones, esta consiste básicamente en excavar y retirar el suelo que rodea a la cañería para liberarle la presión lateral y dejar que la cañería se recupere del incremento de deformación elástica que pudo haber experimentado durante el movimiento de los suelos. En general esto se traduce físicamente en que la cañería vuelve a su posición original en la zanja o al menos similar a cuando fue depositada durante su construcción. Por lo general este desplazamiento de recuperación es en dirección contraria al movimiento que lo causó. Durante el movimiento de recuperación se colocan estacas de referencia cada 5 m a ambos lados de la tubería (horas 3 y 9) y se mide de forma directa la cantidad absoluta de movimiento recuperado. En general, en los primeros tres días se alcanza esa recuperación, pero depende de otras variables, como exposición al sol, temperatura, etc.

Tradicionalmente la operación de excavación del tramo elegido por los especialistas (analistas de tensiones y especialistas geotécnicos) quedaba a cargo del personal de campo dispuesto a realizar la tarea. Este personal de campo suele estar comandado por un jefe de obra que en general elegía el sitio de inicio de apertura de excavación, muchas veces consensuado con el maquinista del equipo pesado que realizaría la excavación, por cuestiones de comodidad o seguridad de las partes intervinientes.

De esta forma se dejaba en un segundo plano o no se tenía en cuenta la detección de sitios dentro del sector elegido para excavar que pudieran concentrar mayores esfuerzos durante la liberación.

Continuando con este criterio tradicional de trabajo, en noviembre de 2010, TGN S.A. programó una liberación de tensiones de alrededor de 390 m sobre una zona del tramo 501, donde el pasaje de la herramienta inercial en junio de 2010 había informado movimientos tanto verticales como horizontales significantes en la cañería. Luego de los primeros 25 m de excavación, la cañería sufrió súbitamente una deformación brusca y generó tres arrugas y fisuras que terminaron finalmente con el cambio de tres caños. El efecto de la liberación como efecto beneficioso había virado a un incidente forzado de deformación de la tubería, que en principio no encontraba explicación.

En este trabajo se presenta el desarrollo del incidente, se plantean sus posibles causales al analizar los mecanismos de deformación implicados, la geometría del talud, sus evidencias de movimientos. Se concluye sobre la importancia de evaluar el sitio del inicio de la excavación del tramo elegido para liberar tensiones cuando la cañería se halla enmarcada en zonas con taludes que presentan pendientes paralelas al tendido de la cañería.

Caracterización del talud

Los movimientos informados por la herramienta de inspección interna (Geopig) se desarrollaron dentro del marco de un talud formado naturalmente en un ambiente de montaña. Este sector montañoso corresponde al extre-



Figura 2. Paisaje característico del extremo este de la Cordillera frontal. Atrás se observa el frente de fracturación principal. En amarillo la línea de gasoducto del tramo 501 a la altura del M+m 105. En líneas de trazo naranja, cicatrices de antiguos deslizamientos.

mo este de la provincia geológica de Cordillera Oriental. Está caracterizado por un frente de fracturación regional N-S formada principalmente por cadenas montañosas escarpadas, sub-paralelas, de orientación NNE, separadas por valles en general estrechos y profundos. La altitud promedio ronda los 4.000 m, y su altura máxima, los 6.300 m.

Las estructuras geológicas dominantes son corrimientos, fallas inversas y pliegues con vergencia principalmen-

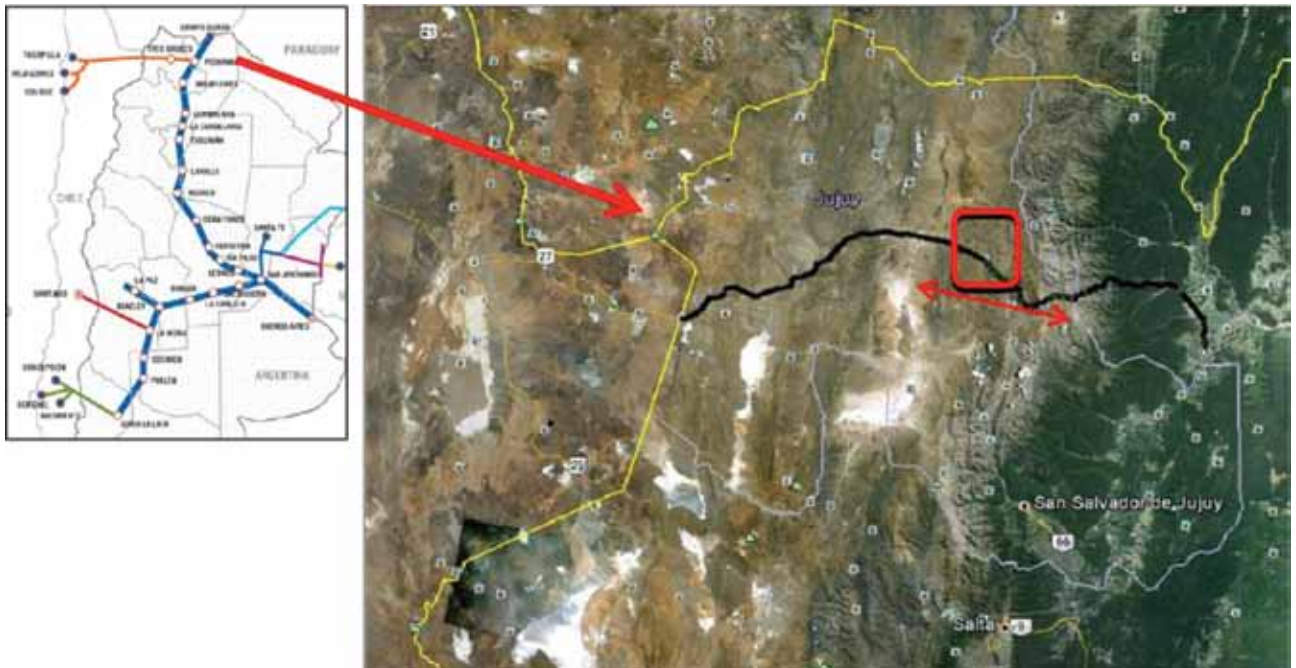


Figura 3. Ubicación geográfica del Tramo 501 y del sector donde se presentó el incidente durante la liberación de tensiones.

te al este relacionados con las fases compresionales del ciclo Ándico.

Litológicamente se conforma de sedimentitas precámbricas (metapelitas y meta areniscas), sedimentitas cám-

bricas y ordovícicas (cuarcitas y, en menor medida, limolitas). Sedimentitas marinas y continentales cretácicas y sedimentitas terciarias continentales (Figura 2).

El talud donde se tenía programada la liberación de



Figura 4, Fotografía aérea escala 1:10.000, que muestra los límites aproximados del talud, la línea amarilla representa el gasoducto.

tensiones está ubicado entre el Mojón+m 93+200 y 93+500 del Tramo 501 (provincia de Salta, Figura 3). En la transición entre la selva subtropical (yungas) y el bosque subhúmedo de altura, las precipitaciones son estacionales y se concentran en un 95% entre los meses de diciembre y abril. Los valores acumulados para estos meses pueden alcanzar los 1500 mm para un año muy rico. La intensidad de las lluvias puede superar los 100 mm/día.

Geomorfológicamente el talud presenta una pendiente transversal a la línea de 30° a 35° y una pendiente longitudinal que ronda el 8%, tiene una altura promedio de 100 m y un ancho acotable a unos 180 m. Se encuentra totalmente cubierto por pastos rastreros y vegetación arbustiva de altura moderada, no posee manantiales visibles ni excesos de humedad considerables a simple vista.



Figura 5. Vista en campo de las dimensiones y geometría del talud.

Geológicamente se compone de flancos rocosos (areniscas y pelitas del ordovícico) y en parte por una terraza fluvial (sedimentos cuaternarios). El cuerpo principal está compuesto por potentes coluvios conformados por una capa de suelos y detritos pobremente seleccionados, con mezcla de bloques y matriz limo-arcillosa (Figuras 3, 4 y 5).

Movimientos detectados por el Geopig

En 2005 y 2010 el tramo de tubería en cuestión fue revisado con la herramienta de inspección interna Geopig (caliper + navegados inercial). Al comparar el análisis de corridas para el período entre ambos años, se observó una diferencia significativa de la posición de la cañería tanto

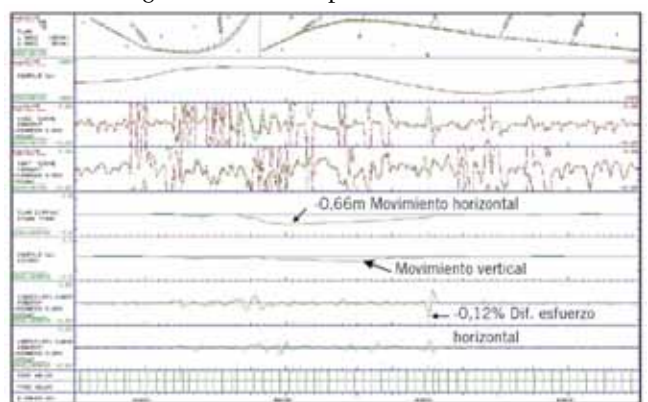


Figura 6. Diagrama de análisis donde se observa los movimientos horizontal y vertical entre 2005 y 2010 para el sector comprendido entre los mojones 93+200 y 93+600, aproximadamente.

en sentido vertical como horizontal, lo que demostraba el movimiento de la línea en dicho período.² La figura 6 muestra el análisis comparativo. El movimiento horizontal detectado fue de alrededor de 66 cm hacia hora 3 y el vertical descendente de 25 a 30 cm hacia hora 6. Las direcciones de dichos movimientos se corresponden con movimientos de remoción en masa por gravedad, lo cual implicaba de alguna manera el posible movimiento del terreno. Por lo tanto se decidió proceder a la liberación de las tensiones y observación directa de la cañería con el fin de resguardar su integridad.

Inicio de las tareas de liberación

El inicio de la liberación de tensiones comienza con la elección del sitio de inicio de la excavación. En este caso el personal de zona comenzó a excavar por uno de los extremos de la finalización de la liberación en la zona topográficamente más baja del talud, teniendo en cuenta que ese talud tiene una pendiente en sentido paralelo al gasoducto de unos 8%.

La excavación se inició de tal forma que una vez posicionada la retroexcavadora sobre el gasoducto el destape de la zanja se realizaría pendiente arriba.

Cuando se avanzó unos 27 m de excavación, la cañería sufrió un violento desplazamiento hacia el lateral interno



Figura 7. Deformación brusca de la cañería a los primeros 27 m en la zona topográficamente más baja del talud.

de la zanja contra el talud, lo cual le generó una arruga principal y otras dos menores en los extremos empotrados. En las figuras 7, 8 y 9 se muestran los momentos posteriores al incidente, ya con la cañería despresurizada. Se observa la posición en que quedó la retroexcavadora y la forma en que venía excavando. En la zona central se puede ver que la cañería excesivamente flexionada y deformada tiene aspecto de triángulo.



Figura 8. Desplazamiento de la cañería fuera de la cuna en un valor cercano a 1,25 m.

En la figura 9 se muestra el avance posterior en la liberación de tensiones, dado que se decidió continuar con la tarea programada a pesar del incidente ocurrido. Se puede observar que a medida que se avanza en la excavación, el caño continua comprimiéndose formando una especie de “serpenteo” hacia uno y otro lado dentro de la zanja.



Figura 9. “Serpenteo” de la cañería a medida que se prosigue con la liberación, debido a tensiones acumuladas.

Análisis de falla de la tubería

Uno de los objetivos de la investigación del incidente fue tratar de establecer o aproximarse al modelo o mecanismo de falla que generó la arruga en la tubería y compararlo con la situación real en el terreno.

Luego de analizar las condiciones en las que falló la cañería y considerando la bibliografía especializada en el tema se determinó que el modo de falla presentado en la excavación fue el de “pandeo localizado”.

El pandeo localizado es un fenómeno de inestabilidad y se presenta en elementos estructurales esbeltos, por ejemplo, cuando en un segmento de cañería existe una gran carga axial de compresión que provoca una flexión lateral con el consecuente cambio en su sección transversal. Este cambio se puede presentar como una arruga localizada de la pared de la cañería en dicha sección. El pandeo locali-

zado está asociado con grandes deformaciones y son fuentes concentradoras de tensiones. Una vez conformadas las arrugas, una subsecuente carga (por ejemplo, la provocada por la presión interna) puede llevar al agrietamiento de la arruga.

Para corroborar la hipótesis de falla se calculó la deformación crítica teórica que la bibliografía indicaría que se pudo alcanzar al momento de la falla, luego se la contrastó con la deformación real medida en campo.

Cálculo de deformación teórica de la tubería por pandeo

Según Zimmerman³, el cálculo de la deformación crítica teórica para la generación de una arruga cuando una cañería presurizada está sometida a un ensayo de compresión axial y flexión, cuya falla es por pandeo localizado con generación de arrugas es el siguiente:

Cañería	Datos
Material	API 5L X70 (Tensión de fluencia 70.000 psi)
Diámetro	20"
Espesor	7,14 mm
Módulo de elasticidad para el acero	2.100.000 kg
Relación diámetro-espesor	71,2
Longitud entre arrugas extremas	26.810 mm
Presión de operación durante el incidente	50 kg/cm ²

$$\epsilon_{cr} = 8,5 \cdot \frac{t}{D} + 34 \cdot \left[120 - \frac{D}{t} \right] \cdot \left[\frac{\sigma_h}{E} \right]^2$$

ϵ = Deformación crítica

t = Espesor de la tubería

D = Diámetro de la tubería

σ_h = Tensión circunferencial

$$\epsilon_{cr} = 8,5 \cdot \frac{7,14 \text{ mm}}{508 \text{ mm}} + 34 \cdot \left[120 - \frac{508 \text{ mm}}{7,14 \text{ mm}} \right] \cdot \left[\frac{1,728 \text{ kg/cm}^2}{2.100.000 \text{ kg/cm}^2} \right]^2 = 0,0049 = 0,49 \%$$

Teniendo en cuenta que la longitud de cañería sometida a esfuerzo axial (sin restricción lateral, ya que se retiró la tierra circundante) fue de 26.810 mm, la deformación axial del 0,49% equivale a un acortamiento = 132 mm según:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \Delta l = \epsilon \cdot l = 0,0049 \cdot 26.810 \text{ mm} = 132 \text{ mm}$$

Cálculo de deformación real experimentada en campo

Para ratificar la teoría de falla por pandeo localizado se procedió a verificar el acortamiento real en campo que experimentó la cañería y su deformación equivalente obtenida.

Para ello se tomó la longitud que fue necesario reemplazar de cañería dañada, cuya longitud de cañería, luego de la reparación, fue de 26.670 mm. Por lo tanto el acortamiento real (A_r) experimentado por la tubería fue:

$$A_r = 26.810 \text{ mm} - 26.670 \text{ mm} = 138 \text{ mm}$$

La deformación (ϵ) equivalente de la cañería fue de:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{138 \text{ mm}}{26.810 \text{ mm}} = 0,0052 = 0,52 \%$$

Esto indica que la deformación real alcanzada del 0,52%, es un valor prácticamente equivalente al límite teórico calculado en el punto anterior del 0,49%. Por lo

tanto se verifica que el modo de falla obtenido de ajusta a un pandeo localizado originado por una excesiva carga axial acompañado de un momento flexor.

Origen de las cargas de compresión axial

El escenario planteado para establecer el origen de las cargas axiales fue un tanto complejo, ya que en principio no se contaba con evidencias certeras sobre el origen de las mismas.

Los dos escenarios posibles estaban vinculados con:

a) Tensiones residuales durante la construcción

Se analizó la información disponible y se concluyó lo siguiente:

- No hubo evidencia de tareas posteriores a la construcción (cambios de cañerías, excavaciones, etc.).
- El *pipebook* original presentado por la empresa constructora coincidía con las cañerías observadas en campo y con el *pipetally* de la herramienta interna pasada en junio de 2010.
- No había registros que evidenciaran cualquier anomalía durante la prueba hidráulica del tramo durante su construcción.
- Estos elementos permitían descartar, al menos en una primera etapa de investigación, la presencia de tensiones residuales generadas durante la construcción.

b) Posibles movimientos del terreno

Este escenario se volvió una posibilidad más concreta al comenzar a recolectar datos o evidencias relacionadas con movimientos del terreno. Las más importantes fueron:

- Desplazamientos concretos en vertical y horizontal detectados en junio de 2010 por la herramienta interna inercial Geopig (Figura 6).
- Análisis aerofotogeológico del sector donde se detectó por fotografías aéreas una antigua escarpa de falla en la parte superior del talud, lo que supone movimientos importantes en algún momento del tiempo, al menos antes de 2002, fecha en que fueron tomadas las imágenes, (Figura 10).
- Cámaras de medición instaladas en la zona de la liberación de tensiones donde se registraron evidencias directas de movimiento (tanto axiales como horizontales) registrados a partir de 2011 y en especial en febrero de 2015 (Figura 11), que motivó una segunda excavación para la liberación de tensiones.

Análisis y discusión

Hasta el momento del incidente solo se contaba con la información del Geopig, donde se observó el desplazamiento de la cañería, presumiendo un movimiento del terreno que empujó a la misma. La geometría y tipo de



Figura 10. Arriba imagen 2016 (vista aéreo) donde se observa la cicatriz antigua de la escarpa de falla. La zona delimitada con líneas rojas indica la zona con movimiento. Abajo fotografía aérea (2002) que muestra un detalle de la zona del talud deslizado.

movimiento es desconocido dado que dicho talud no había presentado evidencias físicas visibles en observaciones de campo de rutina que atestiguaran posibles movimientos con velocidades significantes. Tampoco se contaba con instrumental de control y monitoreo, dado que no se tenía en cuenta como un talud de potencial peligro.

Una vez realizados los trabajos de liberación de tensiones en todo el sector, se construyeron varias cámaras de inspección para medir desplazamientos relativos del terreno respecto al caño. En el transcurso de cuatro años se observaron desplazamientos axiales y laterales del terreno respecto de la cañería. Los desplazamientos se aceleraban durante la temporada de lluvias, por lo tanto eran estacionales con velocidades lentas a moderadas. Desde 2011 hasta la fecha, los desplazamientos acumulados en sentido paralelo a la cañería (axiales) por parte del terreno, en algunos sectores, alcanzaron los 25 cm. Los movimientos laterales fueron intermitentes, con años sin movimiento significantes y otros con un acumulado importante como en 2015 donde en un solo mes (febrero) la cañería acumuló unos 25 cm.

Estos tipos de movimientos suelen estar relacionados frecuentemente con procesos de remoción en masa superficiales del tipo creep o reptación lenta donde los primeros dos m del terreno, luego de muchos meses de lluvia se saturan y pierden resistencia, por lo que deslizan lenta y superficialmente. En campo no se observaron indicios de movimientos más profundos o generación de grietas de tracción. De todas formas un estudio más detallado con instrumentación adecuada podrá dar mayores resultados.

Al margen de la velocidad y el tipo de geometría de movimiento, lo importante a la hora de evaluar el sistema caño-suelo es que en definitiva existen al menos dos componentes de movimientos establecidos con velocidades e intensidades diferentes para los años controlados hasta la actualidad.

La componente de movimiento axial está firmemente relacionada con la pendiente negativa que presenta el talud en dirección a la cañería. Y es este componente el que mayor impacto causa en acumular tensiones de compresión en la parte más baja del talud cuando este comienza a moverse. Por lo tanto, es importante establecer con claridad que frente a una liberación de tensiones programada en sectores con dichas características es imprescindible comenzar la excavación alejados de la zona que uno pueda predecir como de mayor tensión, por ende alejado de la parte baja del talud paralela a la cañería.



Figura 11. Se observa claramente la reducción del espacio entre el anillo de acero y el caño entre 2014 y 2015 como producto del empuje lateral del terreno.

La elección del sitio de inicio de excavación Conclusiones

Una vez que se analiza el mecanismo de falla de la tubería y se establece el origen y la dirección de movimientos de suelo que afectaron el talud en su parte baja, se procedió a generar un procedimiento que indique cual es el sitio más adecuado para iniciar la excavación. El objetivo de ello se basa en elegir el sector con menor probabilidad de tener la cañería tensionada y desde allí comenzar los trabajos de excavación.

Para llevar adelante este procedimiento se tomó como base la geometría de las curvas de desplazamiento que se generan en la tubería como resultado de los movimientos de los taludes, además de considerar también sus formas y pendientes. En la figura 12 se muestra, a modo de ejemplo, con un recuadro verde, donde se podría comenzar la excavación en dos hipotéticos taludes que generan con su movimiento curvas de desplazamiento distintas. En el primer caso se observa una curva simétrica de desplazamiento y en el segundo una asimétrica. En el caso de no contar con curvas de desplazamientos previos es importante distanciarse de las zonas topográficamente más bajas del talud inestable y comenzar las excavaciones por las zonas más elevadas, aun cuando sea más compleja la tarea, con los resguardos y las premisas de seguridad que confiera el caso.

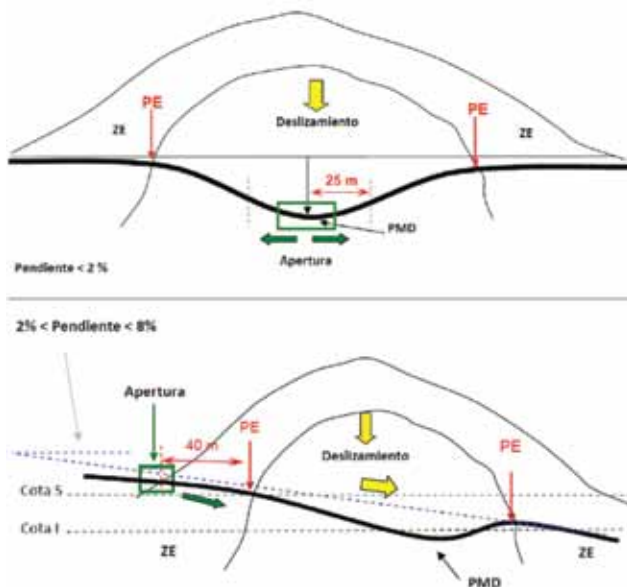


Figura 12. Diferentes esquemas de excavación donde se establece el inicio o la apertura de la excavación según la forma geométrica de desplazamiento de la cañería (simétrica o asimétrica) y la pendiente del talud paralela a la cañería. Se esquematizan otras variables que se tuvieron en cuenta con el punto de máximo desplazamiento (PMD), puntos de empotramiento (PE), zonas estables (ZE), etc.

La liberación de tensiones programada en la zona del mojón 93+200 del tramo 501 en noviembre de 2010 produjo en su inicio un incidente producto del desplazamiento violento de la cañería cuando se excavó los primeros 25 m.

El análisis de falla de la cañería y las evidencias y los datos de campo permitieron establecer que el mecanismo de falla que produjo la deformación excesiva en la tubería fue por efecto de una carga de compresión axial que produjo un pandeo localizado con un momento flexor.

Posteriormente estudios sobre el terreno y mediciones directas, que constataron el movimiento de los suelos del talud, permiten inferir que una carga por compresión axial se acumuló en la parte más baja del talud y fue la principal responsable del pandeo localizado.

Esto obliga a pensar que se debe conocer y analizar previamente la geometría y las pendientes de los taludes antes de realizar una liberación de tensiones, dado que comenzar a excavar en un lugar equivocado puede traer más inconvenientes que beneficios a priori. De esta forma se evita además costos de reparación que no estaban previstos.

Como acción correctiva se tomó la determinación de buscar alternativas técnicas para la elección del sitio de apertura de excavación, así se evitó dejar esa elección al azar o a otros tipos de conveniencia (operador de equipo, comodidad de la máquina, etc.).

La alternativa técnica se basó en generar un procedimiento que define el sitio de inicio de excavación sobre la base de la forma de la curva de desplazamiento que presenta la cañería aportada por el geopig y la pendiente transversal y longitudinal que presenta el talud. Esto permite básicamente inferir el sitio más propicio para iniciar una excavación y así se evita comenzar donde la cañería pueda concentrar una elevada tensión axial.

La implementación del procedimiento en los años sucesivos (2011-2015), en condiciones similares a la del talud analizado en este artículo, permitió realizar un total de ocho liberaciones de tensiones más con “cero” incidentes.

Como medidas complementarias, en el futuro, se necesitará un conocimiento más acabado de los mecanismos que afectan el movimiento de los suelos del talud (profundidades, tipos de suelo, superficies de falla existentes, velocidad de movimiento anualizada, etc.). Esto permitirá mitigar o evitar efectos indeseados sobre la tubería. ■

Bibliografía

1. González de Vallejos, L. et. al., *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación, Madrid, 744 p., 2002.
2. Informe Técnico: O1T-501-IB-IF-10E3701 Rev 0 “Análisis del reporte de Ingeniería a partir del pasaje del Geopig en el Tramo 501”, TGN, 02/11/10.
3. Zimmerman, T. J. E.; M. J. Stephens; D. D. DeGeer, y Q. Chen, “Compressive Strain limits for Buried Pipelines”. Proceedings of 1995 OMAE, Volume V, Pipeline Technology, ASME 1995, pp. 365-378.