

Evaluación de la integridad de gasoductos en taludes inestables

Pedro Hryciuk, Martín Carnicero, Rubén Monaldi

Transportadora de Gas del Norte S.A., Transportadora de Gas del Norte S.A., CONICET

pedro.hryciuk@tgn.com.ar; martin.carnicero@tgn.com.ar; crmonaldi@gmail.com

1. Sinopsis

En los gasoductos de montaña, la traza recorre lugares donde los riesgos naturales amenazan su operación segura. Entre los más comunes, se encuentra la inestabilidad de taludes. Para realizar una evaluación realista de la integridad del gasoducto es necesario contemplar tanto los procesos naturales que condicionan la estabilidad de cerros y laderas, como el análisis de tensiones de la cañería.

El objetivo de este trabajo es describir la manera en que se materializa esta evaluación en las siguientes etapas: caracterización geológica, definición del sistema de instrumentación, desarrollo del programa de monitoreo, análisis de la información recolectada y definición de las acciones de remediación implementadas.

2. Introducción

Cuando un gasoducto atraviesa un ambiente montañoso, normalmente se entierra en laderas que están sujetas a deslizamientos. Estos deslizamientos ejercen presiones sobre el caño provocando deformaciones. En los casos en que las deformaciones son excesivas se producen arrugas, fugas y eventualmente explosiones. Por ello, los pasos a seguir son:

- Realizar una evaluación del riesgo geológico a lo largo de la traza para identificar los puntos críticos
- Implementar un sistema de monitoreo aplicado a cada caso para medir los desplazamientos
- Tomar acciones preventivas para controlar el riesgo geotécnico
- Analizar, eventualmente cambios de traza, para sacar al gasoducto de la zona inestable

3. Evaluación de riesgos geológicos

Como primera medida, se debe recopilar la información de gabinete para tener una primera idea de las zonas que muestren signos de antiguos deslizamientos. Son de gran utilidad las hojas geológicas, imágenes satelitales y fotos aéreas georeferenciadas para una primera delimitación de círculos de deslizamiento y su intersección con la traza.

El siguiente paso es el de una recorrida terrestre que se enfoque en la detección en el terreno de fallas, estructuras, afloramientos y demás evidencias de deslizamientos tales como grietas de tracción, escarpas, etc.

Como complemento se realizan vuelos en helicóptero o avionetas que permiten ver los taludes desde una perspectiva más amplia.

El resultado de esta etapa es lograr un inventario de los taludes más comprometidos en cuanto a su estabilidad y su potencial efecto nocivo a la integridad del gasoducto. Existen varias maneras o métodos de clasificar y cuantificar por medio de índices subjetivos el riesgo geotécnico, aunque siempre tiene un peso preponderante la experiencia y conocimiento del evaluador.

4. Caracterización geológica de los puntos críticos

Es crucial para el entendimiento del problema realizar una correcta caracterización geológica del talud que incluya las estructuras que controlan el movimiento, el tipo de rocas, las fallas y planos de deslizamientos en un diagrama de bloques en tres dimensiones que permita conocer la posición relativa de la cañería frente al cuerpo de material que desliza. A modo de ejemplo se enumeran distintos mecanismos de deslizamientos aclarando que los mismos se pueden dar de manera combinada.

- **Deslizamientos por volcamiento:** son aquellos que se deslizan por bloques definidos por los planos de discontinuidades formados por fallas principales y secundarias. En monitoreo se orienta en la identificación en profundidad de la zona de contacto entre las rocas sana y fracturada. Este tipo de deslizamiento ocurre en presencia de sinclinales y anticlinales.
- **Deslizamiento planar:** el deslizamiento se produce a lo largo de una superficie de contacto entre dos rocas o suelos de características disímiles, activados por la presencia de materiales de alto contenido arcillosos que se lubrica ante la presencia del agua.
- **Deslizamiento por remoción en masa:** los mismos se producen a lo largo de una superficie de deslizamiento curva con una zona de descenso en la parte superior llamada escarpa y una inferior llamada pie de ascenso del terreno. Este tipo de deslizamiento se producen en materiales sueltos homogéneos o no cuyas condiciones de estabilidad están controladas por las características de corte (ficción interna y cohesión), presencia de agua, pendiente y drenaje del talud.
- **Combinaciones de varios mecanismos**

Entendiendo cómo se desliza un talud, se puede desarrollar un sistema de monitoreo más adecuado.

5. Sistema de monitoreo

Una vez identificados y caracterizados geológicamente los puntos más problemáticos se procede a diseñar el sistema de monitoreo más conveniente. Por lo general, los elementos componentes del sistema apuntan a medir las variables naturales y mecánicas que afectan a la integridad del gasoducto. A continuación se enumeran las mismas:

5.1 El agua

- **Pluviómetros:** la importancia de la lluvia es crítica debido a que el grado de saturación del terreno juega un papel importante en el inicio del deslizamiento debido a un aumento de la presión de poros y a la lubricación de las superficies o planos de deslizamiento. También se puede relacionar la velocidad de deslizamiento con el régimen de precipitaciones.
- **Piezómetro:** registran la presión de poros en un punto del talud. Dependiendo de los estratos atravesados, su comportamiento como acuíferos o como capas confinantes impermeables, y de los detalles constructivos, pueden registrar la posición de la napa en el tiempo.

5.2 El terreno

- **Inspecciones visuales:** personal especializado (geólogos, ingenieros geotécnicos, etc.) realizan observaciones periódicas y después de cada evento de lluvia extremo, para ver la aparición o modificación de los indicios de desplazamiento (grietas de tracción, su apertura, crecimiento, intersección con la traza, escarpas, su magnitud de descenso, etc.).
- **Monolitos:** registran el movimiento del terreno, que se asume es solidario con la cañería. Si bien la magnitud no es igual, sirven para definir tendencias, velocidades y magnitudes de deslizamientos.

- **Extensómetros de roca:** para el caso de deslizamientos por volcamiento, se anclan barras de acero dentro de una perforación a distintas profundidades para tratar de identificar los planos de deslizamientos en relación a un cabezal de lectura puesto en superficie.
- **Inclinómetros:** los mismos son un tubo ranurado perforado verticalmente cuyo extremo inferior se empotra por debajo del plano de deslizamiento. El resto del tubo se inclina en forma solidaria con el movimiento del talud, midiendo el ángulo de inclinación en el tiempo, y su proyección horizontal. Eventualmente se estrangulan, dando la información correspondiente a la ubicación del plano de deslizamiento.

5.3 El gasoducto

- **Strain gauges:** son pastillas que se sueldan a la cañería que miden su deformación indicando tracción o compresión de sus caras en el tiempo. Su disposición puede ser de 3 pastillas cada 120 grados o 4 cada 90 grados.

6. Interpretación de las mediciones

En los párrafos siguientes se realizará un análisis del tipo de información registrada, su evaluación y significado dado en relación con la integridad del gasoducto.

6.1 Análisis de precipitaciones

Normalmente se trata de poner un pluviómetro lo más cerca posible del talud ó una sucesión de ellos a distintas cotas de manera de obtener un gradiente de precipitaciones a lo largo de la traza. Los valores de lluvia relevantes son:

- **Intensidad de lluvia:** se refiere a una tormenta en particular y consiste en mm de lluvia por hora, idealmente en intervalos de 5 minutos. Usualmente se registran en estaciones meteorológicas con un data logger que se vacía periódicamente.
- **Lluvia diaria:** se mide en pluviómetros de lectura manual y se trata de obtener la cantidad total de agua caída en un día. Oficialmente se toma las 9 de la mañana como horario de lectura. Sin embargo, se trata de adaptar las lecturas al horario de las actividades del personal afectado a las tareas de mantenimiento, de manera de obtener dos lecturas por día para identificar tormentas.
- **Lluvia acumulada mensual:** se trata de obtener los valores mensuales como valores indicativos del nivel del tipo de temporada de lluvia (húmeda/seca). De ella se pueden identificar tormentas.
- **Lluvia de promedios mensuales:** al graficarla a lo largo del año, se pueden identificar los meses húmedo en donde los deslizamientos son más proclives a ocurrir.
- **Porcentaje de días con lluvias:** es un indicador del nivel de saturación de la cuenca

A continuación se muestran gráficos que son representativos de cada uno de estos conceptos.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual
2000	3.55	96.01	71	40.88	30.99	583.19	57.15	242.31	258.05	34.3	29.46	20.83	1464.17
2001	61.47	7.87	28.95	43.17	306.31	201.92	322.07	257.56	87.89	25.9	27.69	0	1309.33
2002	2.54	68.33	73.67	86.62	73.67	114.57	166.11	278.38	119.38	179.07	52.85	21.09	1233.74
2003	8.38	0	10.16	19.81	74.17	303.03	89.41	86.1	111.77	72.13	76.2	11.18	853.96
2004	0	8.89	33.53	148.85	63.77	251.98	202.97	146.55	71.88	124.71	43.68	21.59	1118.40
2005	1.02	51	23.88	9.65	357.14	389.12	193.3	197.35	74.18	28.71	30.865	42.16	1397.36
2006	30.98	1.78	10.15	101.1	42.41	273.55	235.71	93.98	41.91	83.8	2.55	52.07	939.01
2007	35.82	36.07	9.15	103.37	101.85	86.62	170.44	92.21	58.43	17.28	3.31	25.66	704.39
2008	4.06	0.51	6.35	53.09	460.75	87.9	271.27	240.27	71.63	29.97	11.18	5.08	1238.00
2009	8.89	9.65	7.88	14.48	134.37	215.38	86.61	168.67					
Promedios	15.67	28.01	27.47	62.10	164.54	250.73	179.50	180.34	99.46	66.21	30.87	22.18	1139.82

Tabla 1. Lluvia en Concepción, Chile

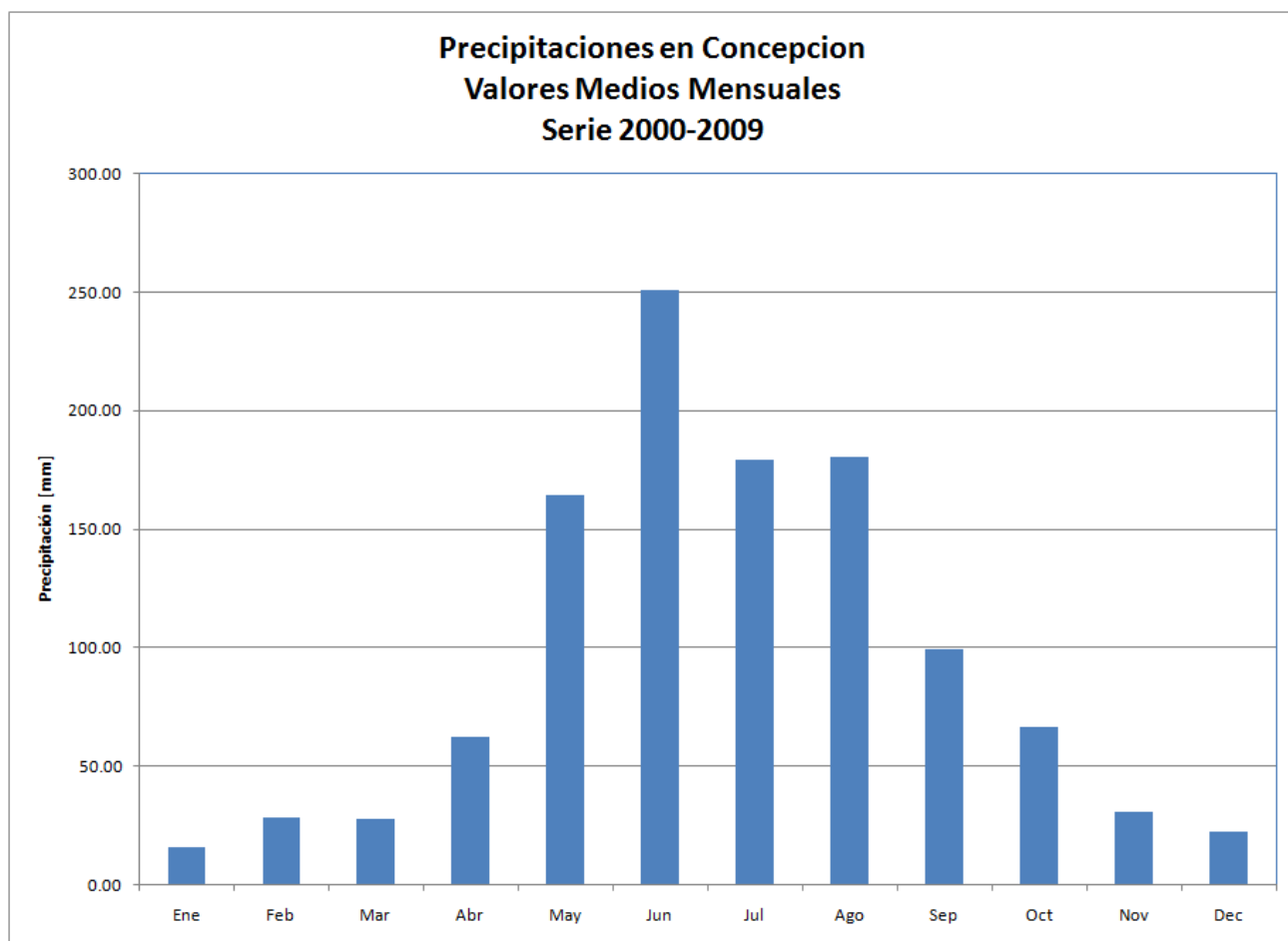


Figura 1. Régimen anual de precipitaciones

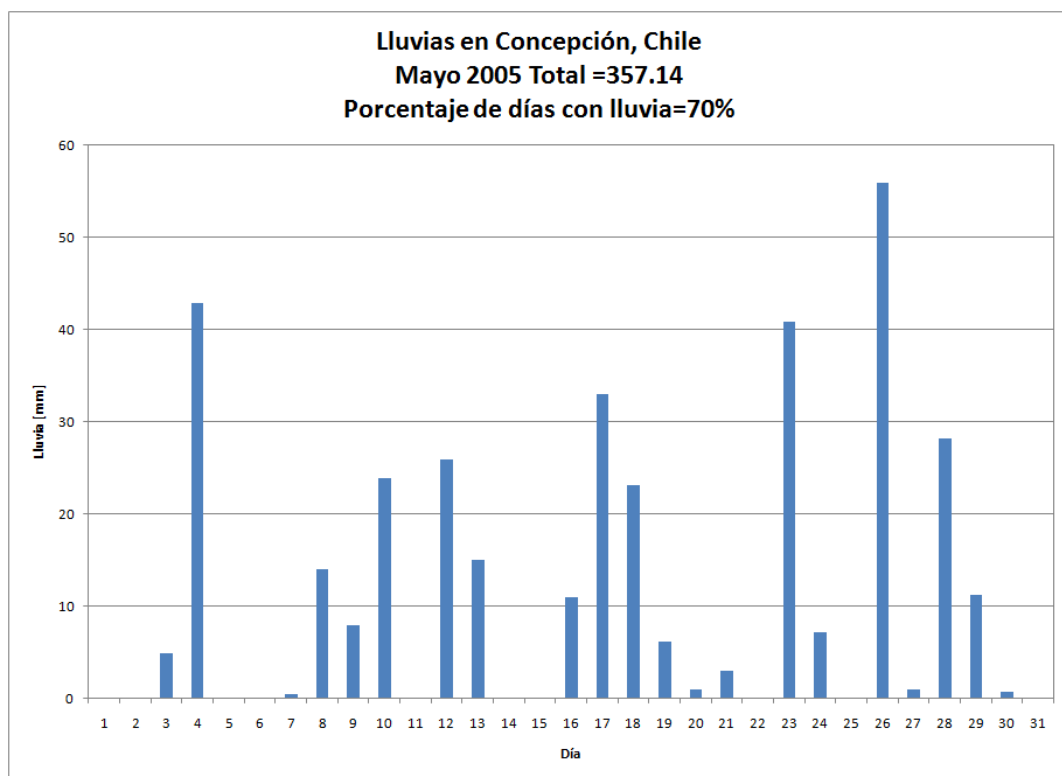


Figura 2. Lluvias mensuales del mes anterior como indicador de la saturación de la cuenca

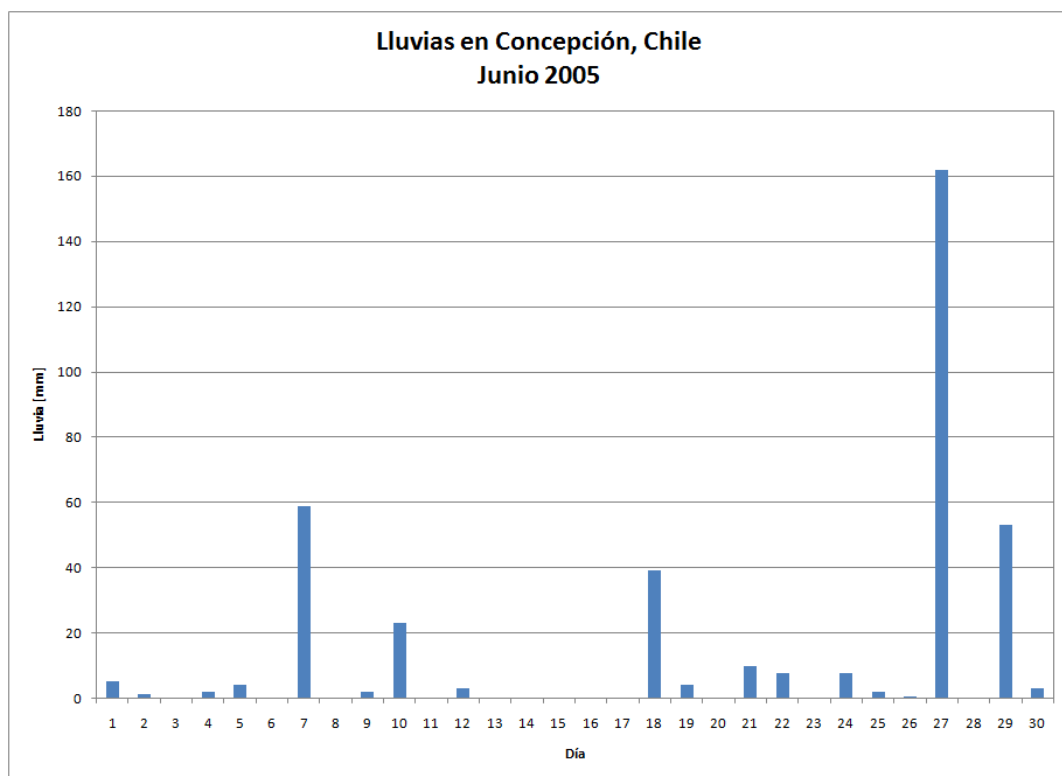


Figura 3. Lluvias mensuales e identificación de tormenta el día 27/6/2000

Estos gráficos muestra la evolución natural previo a un deslizamiento de importancia. De los mismos se puede deducir:

- Los meses más lluviosos, y por ende más proclives a la ocurrencia de deslizamientos son los meses de invierno (mayo-junio-julio-agosto), especialmente el mes de junio.
- Los registros históricos indican que:
 - o En junio de 2000, llovieron 583 mm, aunque el mes anterior solo llovieron 31 mm
 - o En junio de 2005, se conjugan las dos condiciones de humedad antecedente con 357 mm en mayo y un 70% de días con lluvia. En junio, se aprecian lluvias normales y un evento extremo ocurrido el día 27 con 160 mm en un día. Este evento produjo un importante deslizamiento que condujo a la implementación de obras de drenaje como medida de remediación.
 - o En mayo de 2008 llovieron 460 mm pero en junio llovieron solo 88 mm., sin que se produjeran consecuencias en el talud remediado.

6.2 Inspecciones visuales

Reviste particular importancia el relevamiento visual periódico llevado a cabo por personal especializado en investigaciones geotécnicas como geólogos, ingenieros y técnicos capacitados. La tarea consiste en identificar y hacer el seguimiento de las evidencias de deslizamientos encontradas en los taludes que al deslizar involucren la traza del gasoducto, especialmente los límites de los círculos de deslizamientos.

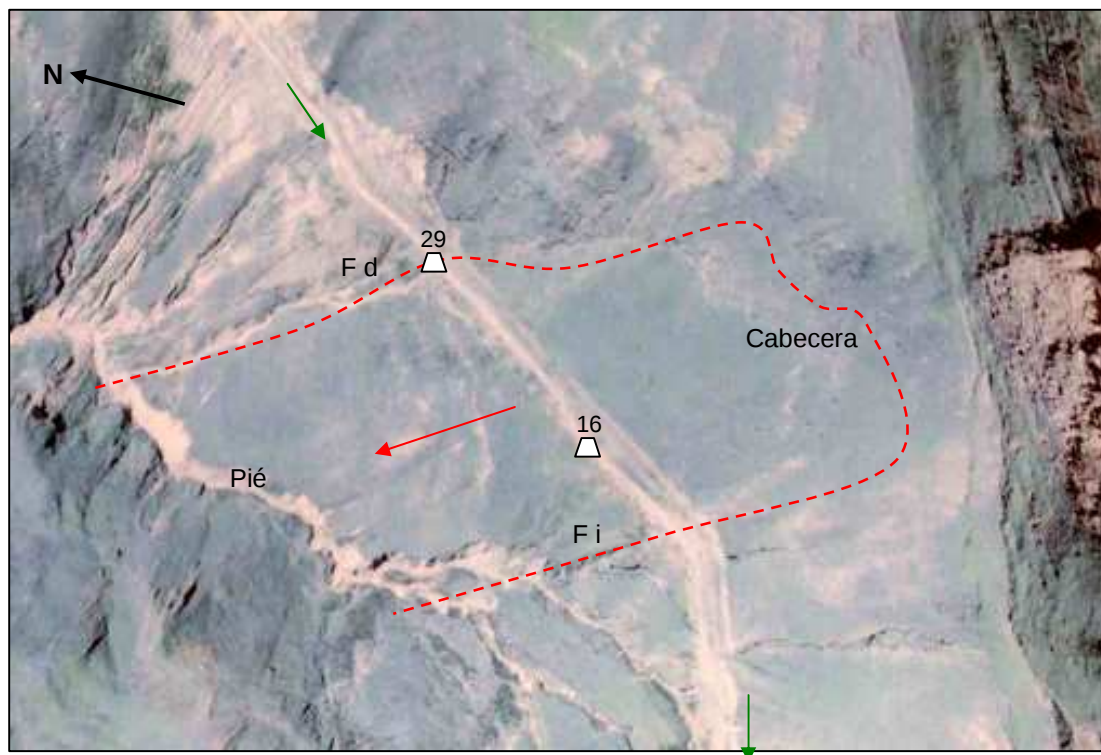


Figura 4. Vista aérea general y de detalle del deslizamiento



Figura 5. Flanco derecho (Este) del deslizamiento: grietas de tracción secundarias en el camino de asistencia y en la pista.



Figura 6. Flanco derecho del deslizamiento: grieta de tracción principal, con marcado desplazamiento vertical

En este caso primero se descubrió una grieta en el flanco izquierdo procediendo a la apertura de zanja en este tramo para liberar tensiones. Años más tarde, se descubrió la grieta en el flanco derecho, terminando de liberar toda la zona comprometida en el deslizamiento. Dentro de toda la longitud de gasoducto interceptada, revisten singular importancia las zonas de un lado y otro de la línea de deslizamiento ya que allí, un tramo permanece quieto y del otro lado se mueve con el talud, pudiendo generarse arrugas y pliegues.

6.3 Monolitos

El movimiento de la superficie puede ser monitoreado por una red de monolitos. Originalmente se pensó que los deslizamientos del terreno se transmitían en igual magnitud al caño, y por ello se intentó medir con una gran precisión. Sin embargo, luego de unos años de mediciones se encontró que la magnitud del desplazamiento en superficie era de diferente magnitud con los desplazamientos de la cañería, luego de liberar tensiones. Sin embargo, la medición periódica de los monolitos es indicativa de la tendencia, velocidad, magnitud y dirección del deslizamiento.



Figura 7. Monolito con antena de GPS

El análisis de la información se realiza en base a diferencias de coordenadas correspondientes mediciones realizadas a través del tiempo. El vector desplazamiento se descompone en distintas componentes:

- Componente perpendicular al gasoducto, calculada en función de los datos del geopig, seleccionando el caño enfrentado al monolito,
- Componente vertical indicativo del descenso del talud

Las mediciones se realizaron con GPS geodésicos con la intención de lograr un error mínimo. Sin embargo, el ambiente montañoso, las condiciones de la ionosfera y otros factores llevaron el valor del error a un valor cercano a los 2 centímetros. A continuación se incluyen los gráficos de desplazamientos acumulados de dos

monolitos de un talud.

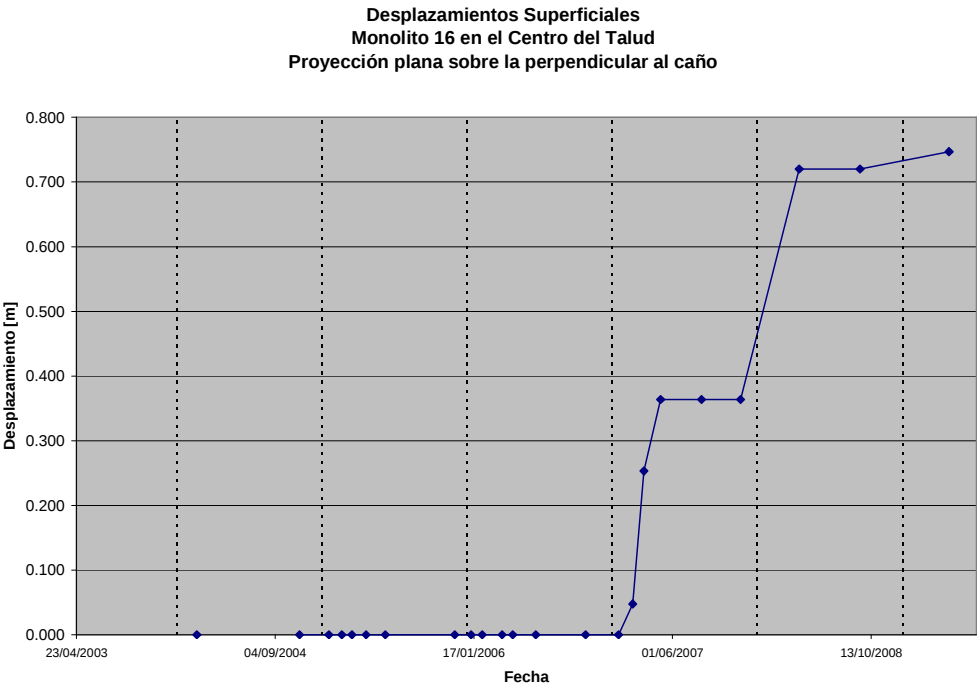


Figura 8. Desplazamiento horizontal perpendicular al caño del monolito ubicado en el centro del talud

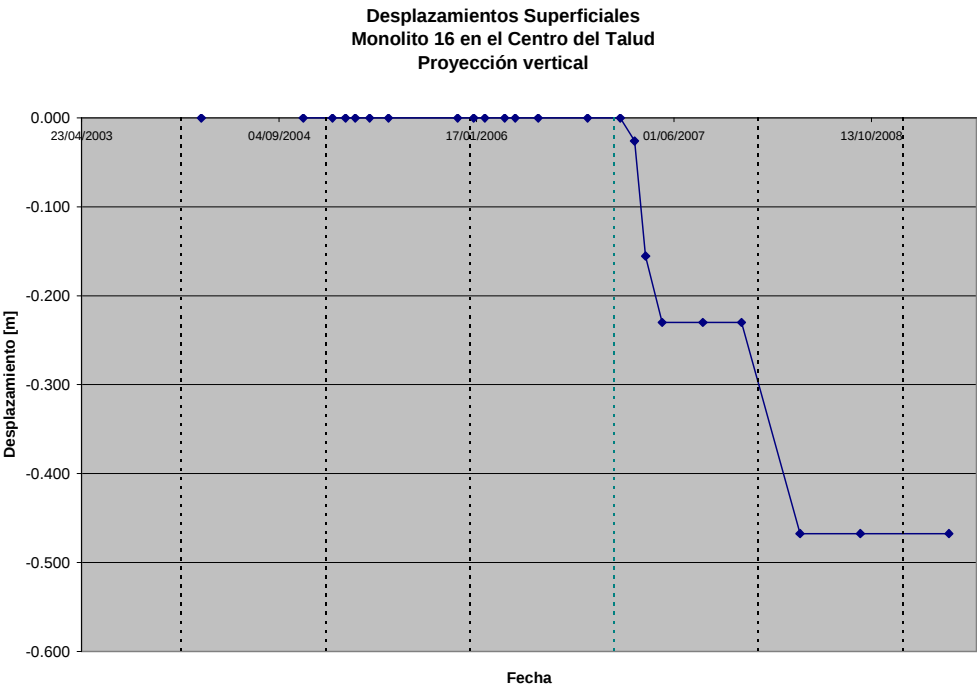


Figura 9. Desplazamiento vertical (descenso) del monolito ubicado en el centro del talud

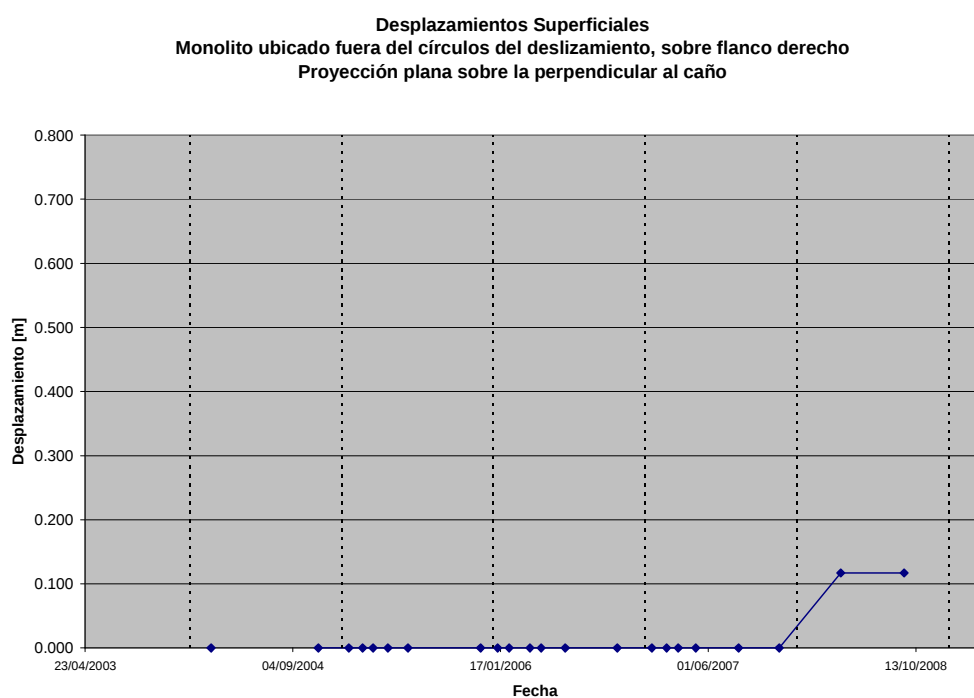


Figura 10. Desplazamiento horizontal perpendicular al caño del monolito ubicado inmediatamente afuera del límite del deslizamiento, cercano al flanco derecho

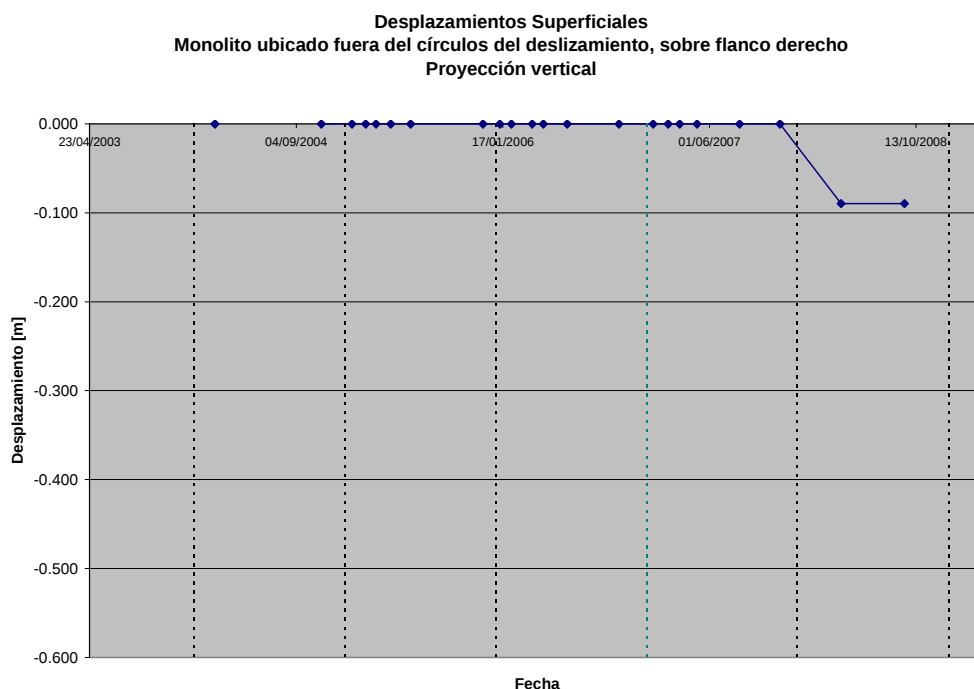


Figura 11. Desplazamiento vertical (descenso) del monolito ubicado inmediatamente afuera del límite del deslizamiento, cercano al flanco derecho

Estos gráficos indican:

- Los desplazamientos se movilizan en la temporada de lluvias (diciembre-abril) y se detienen en la temporada seca (mayo-noviembre)
- Dentro del terreno que desliza, la magnitud del deslizamiento en el sentido perpendicular a caño en dirección al precipicio es de aproximadamente 0.75 m y 0.50 m en vertical.
- Sin embargo, del otro lado del flanco derecho del deslizamiento estos valores son de 0.10 m y 0.10 m, respectivamente.
- Por ello, en esta zona de contacto puede ser una zona crítica de cizallamiento de la cañería con eventual formación de pliegues o arrugas.

6.4 Extensómetros de roca

Para aquellos casos en que el mecanismo de rotura del talud es por volcamiento, los distintos bloques que se caen, lo hacen a través de planos de debilidad asociados a fallas principales y secundarias. Los extensómetros de roca constan de 3 barras de acero metidas en una perforación sub-horizontal, ancladas a distintas profundidades. El otro extremo se ubica en un cabezal de medición que sirve para medir si las varillas se hunden al deslizar el talud. La medición se realiza con un calibre y un set de varas de distinta longitud que se introducen en los agujeros del cabezal para medir la profundidad de las varillas hundidas.

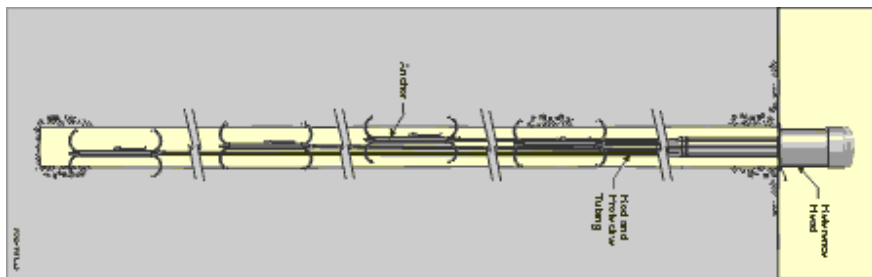


Figura 12. Extensómetro de roca con tres varillas



Figura 13. Cabezal de extensómetro de roca con 4 varillas

A continuación se presenta un caso de mediciones extensométricas realizadas en 4 varillas ancladas a distintas profundidades (6, 12, 21 y 30 metros).

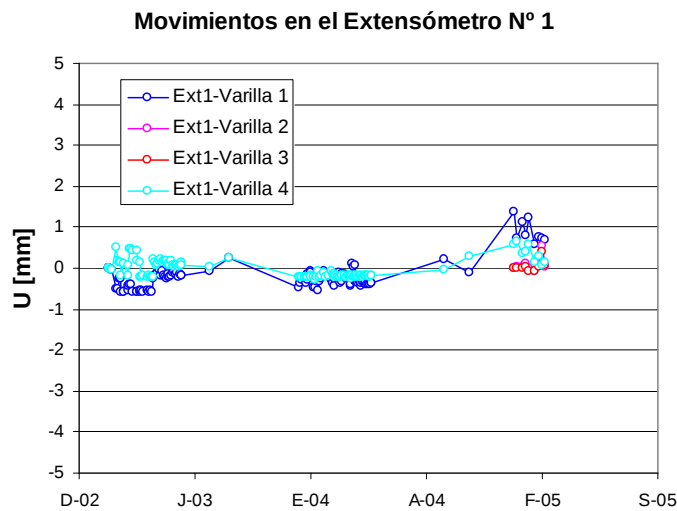


Figura 14. Medición de extensómetro de roca a través del tiempo. Sin movimiento.

6.5 Inclinómetros

Este instrumento mide la inclinación de un talud que se desliza con respecto a la vertical. Para ello se coloca en una perforación vertical una caña de PVC con 4 ranuras internas dispuestas a 90 grados. El fondo de la perforación se ancla por debajo del plano de deslizamiento quedando empotrado en roca. De esta manera la perforación se inclina con el talud girando sobre el fondo.

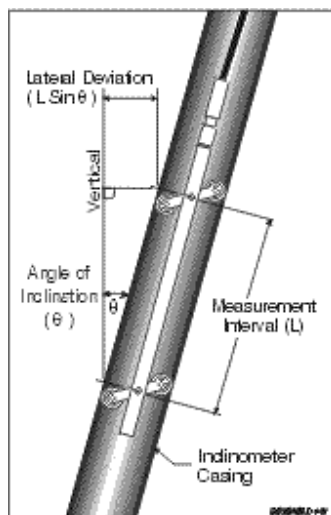


Figura 15. Principio de medición

Las mediciones de los ángulos de inclinación se realizan con una probeta que tiene 2 acelerómetros que miden el ángulo y por aplicación de la función seno, el desplazamiento en horizontal del talud.

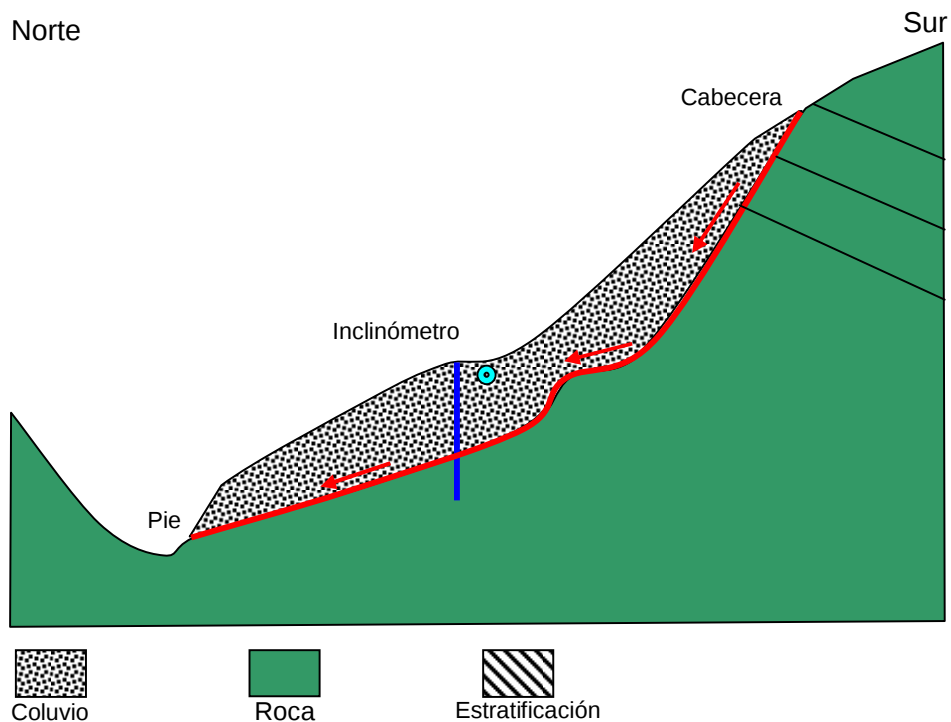


Figura 16. Instalación típica de un inclinómetro-Anclaje del extremo inferior

Detalle del instrumento incluyen el caño camisa de PVC, la sonda o probeta y la unidad lectora. A continuación se adjuntan gráficos que muestran estos elementos.

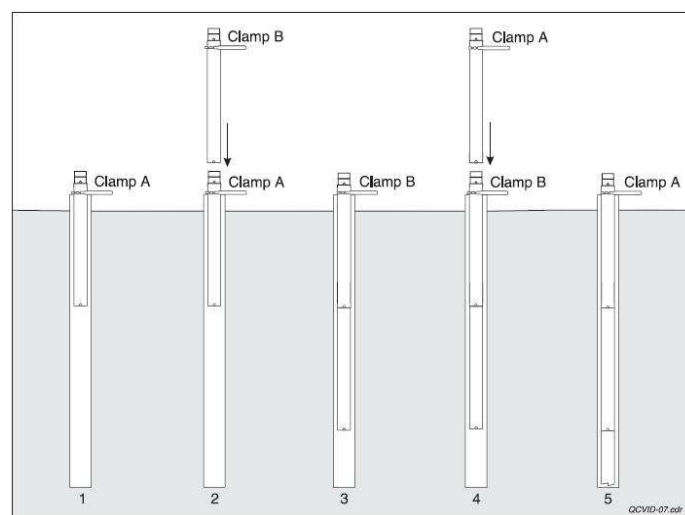


Figura 17. Instalación típica de un inclinómetro-Colocación del caño camisa de PVC

Debe destacarse que las ranuras deben quedar perfectamente alineadas entre un caño camisa y el siguiente para que las ruedas de la probeta no se salgan de la guía ni quede obturada, perdiendo toda posibilidad de medir. De allí que el método y el diámetro de perforación reviste singular importancia.



Figura 18. Sonda de medición y camisa de PVC

Un set de ranuras se orienta en el sentido del deslizamiento, quedando el otro fijo a 90°. Una vez hecha la instalación, se procede a medir periódicamente especialmente durante la temporada de lluvias. Para ello, se baja la sonda tomando una lectura cada metro, en las dos direcciones.

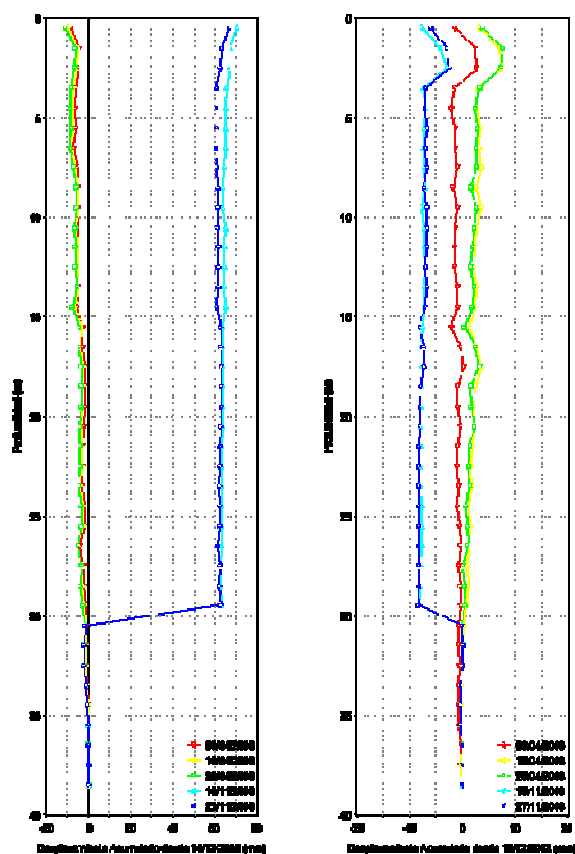


Figura 19. Mediciones inclinométricas

El análisis de este gráfico indica:

- Las primeras dos mediciones se alinean con el eje, mostrando que no hubo movimiento
- Las segundas indican desplazamientos en las dos direcciones
- Las diferencias entre las tercera y cuarta indican que el desplazamiento ha detenido su velocidad
- A partir de los 30 metros de profundidad es evidente que se encuentra el plano de deslizamiento ya que a profundidades menores no se registran desplazamientos.

6.5 Strain gauges

Este instrumento mide la deformación de la cañería ante el empuje del terreno. Se trata de estampillas que se sueldan sobre la cañería dispuestas en forma de 3 cada 120° o 4 a 90° . Los mismos se sueldan solidariamente midiendo tracción (estiramiento) o compresión (acortamiento) según su ubicación con respecto al deslizamiento. Cada uno se conecta por medio de un cable a una caja a donde se conecta la unidad lectora.



Figura 20. Strain Gauge instalado a hora 12



Figura 21. Soldadura de strain gauge



Figura 22. Caja de medición y unidad lectora

Una vez instalados se procede a medir los strain gauges en forma periódica teniendo en cuenta el valor de la medición y la época del año (seca/húmeda). Los gráficos típicos de estos instrumentos son:

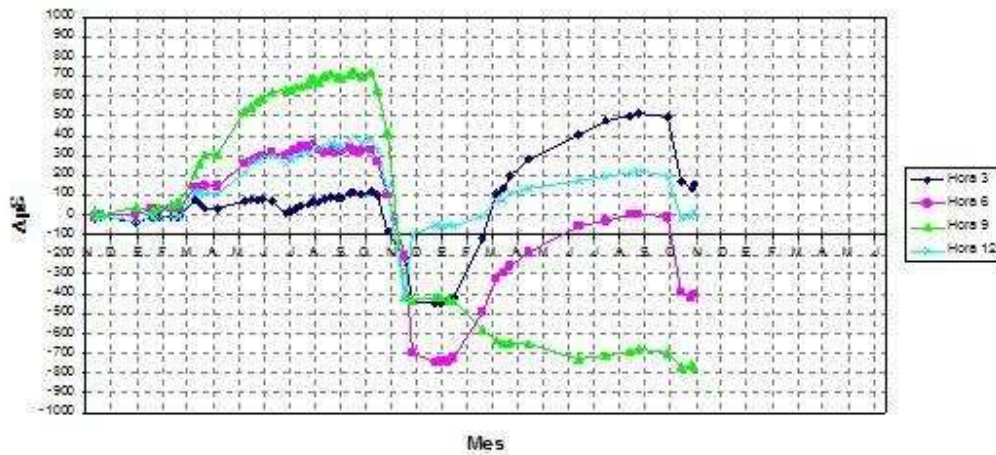


Figura 23. Gráfico de medición de strain gauges

Este gráfico nos muestra cuatro strain gauges dispuestos en la misma sección de gasoducto dispuestos cada 90 grados. Su análisis permite observar lo siguiente:

- La acumulación de deformaciones en todos los sensores (curva ascendente)
- La operación de liberación de tensiones luego de la apertura de zanja (caída brusca)
- Una nueva etapa de toma de tensión y deformación (curva ascendente)
- Una nueva liberación de tensiones con una recuperación mucho menor (Segunda caída)

6.6 Pasaje de geopig

Esta herramienta es esencial para la determinación de la existencia de deformaciones de cáscara, como ser: arrugas, abolladuras, ovalizaciones, como también para determinar por comparación con una corrida “base” los lugares de la traza donde la cañería presenta movimientos en el terreno.

Los resultados de las corridas de comparación fueron los siguientes:

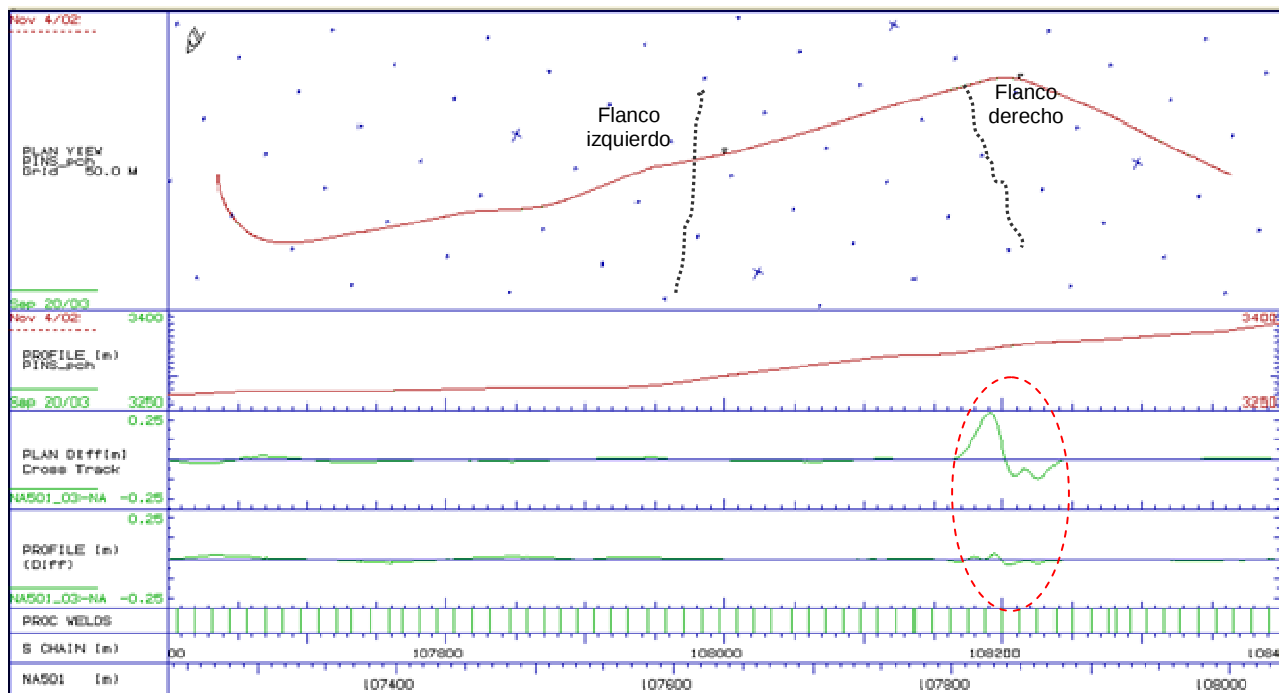


Figura 24. Extracto del software donde se muestran los resultados de una corrida

De esta figura se extrae que:

- La cañería no presentó arrugas, ni abolladuras en esta zona.
- Se identifican sobre la gráfica en planta movimientos pronunciados solo en el fin del deslizamiento (flanco izquierdo).
- Los movimientos informados en planta por el Geopig coinciden con la excavación para liberación de tensiones efectuada 2 meses antes de esta corrida.
- No se registran movimientos al inicio del deslizamiento (flanco derecho).

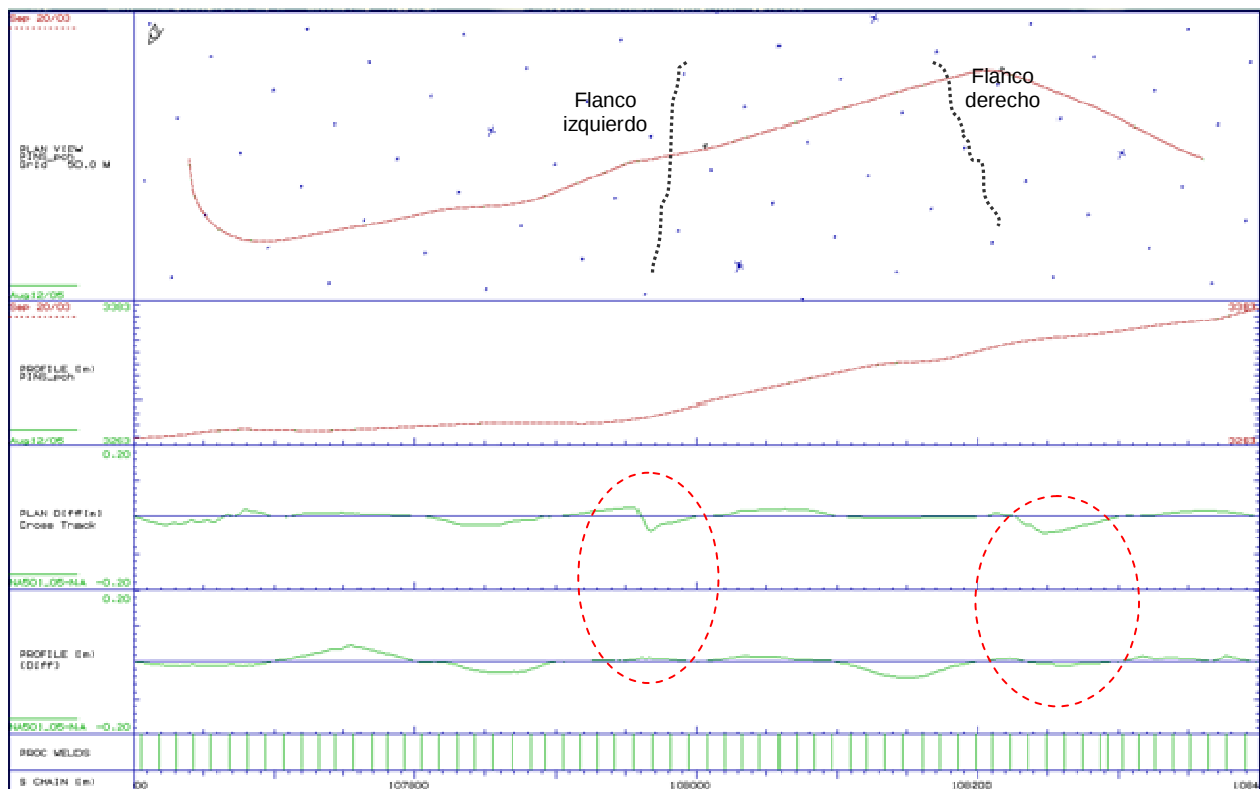


Figura 25. Extracto del software donde se muestran los resultados de una corrida posterior.

De aquí se observa que:

- La cañería no presentó arrugas, ni abolladuras en esta zona.
- Se identifica en planta el movimiento al inicio y al final del deslizamiento, pero los valores en ambos lugares son pequeños (cerca de los 5 cm en Planta). Dada su pequeña magnitud no se reportó como algo a destacar en el informe de la corrida.

7. Acciones de remediación

Una vez que todos los instrumentos fueron medidos y evaluados, se debe decidir cuáles son los pasos a seguir a los efectos de garantizar la integridad del gasoducto. Por lo general se debe enfrentar dos decisiones en función del riesgo que se quiera asumir y las potenciales consecuencias:

- Controlar las tensiones dejando la cañería en el mismo lugar como una solución temporaria
- Efectuar un cambio de traza, sacando a la cañería del lugar afectado por el deslizamiento

7.1 Control de las tensiones inducidas por el deslizamiento de un talud

Una modalidad de control de las deformaciones de la cañería es la de liberación de tensiones. Normalmente las etapas a seguir son las siguientes:

- Medición de deformaciones acumuladas con strain gauges
- Apertura de zanja con liberación de tensiones
- Medición de la recuperación de la cañería por medio de estacas y cinta métrica
- Colocación de caños de chapa corrugado dejando un espacio anular entre ella y la cañería

- Tapado de la zanja
- Medición de desplazamientos

Estas acciones se representan en las siguientes figuras.



Figura 26. Colocación de caños de chapa corrugada sobre la cañería.



Figura 27. Inspección de la posición de la cañería luego del tapado de zanja

Estas acciones se pueden repetir, cada vez que se observe y mida deformaciones que indica que el caño está deformado. Sin embargo, este procedimiento no remueve la causa de las deformaciones que es el deslizamiento del talud. Por ello, se recomienda como solución provisoria hasta tanto se pueda ejecutar un cambio de traza. La posibilidad de estabilizar el talud no ha sido ejecutada en nuestra gestión.

7.2 Cambio de traza

Normalmente implica remover el caño de su posición original y ponerlo en un lugar fuera del círculo de deslizamiento. Esto se materializa adoptando algunas de las siguientes alternativas:

- Cambio de traza excavando una nueva trinchera por fuera del círculo de deslizamiento. Generalmente se mueve el caño hacia arriba del talud cerca o por sobre la cima del talud
- Perforación dirigida cuando todo el cerro o talud es inestable. Por ello, se busca penetrar en el material no afectado por el deslizamiento
- Túnel: al igual que el caso anterior se excava una túnel dentro de la roca estable

8. Conclusiones

A los efectos de controlar la integridad del gasoducto colocado en un talud inestable, se deben implementar las siguientes tareas:

- Caracterizar geológicamente todo los sitios sometidos a riesgo geotécnico,
- Instrumentar dicho sitio en forma acorde usando un conjunto de instrumentos que permita evaluar el fenómeno natural de una manera global,
- Poner particular cuidado en instrumentar ambos lados de los flancos de deslizamiento y en cada límite dentro y fuera de mismo. Allí se registran los movimientos diferenciales en un tramo corto en que el caño está fijo o empotrado de un lado y del otro lado sometido a movimientos. Esto lleva a que sea una zona proclive a la generación de fallas y pliegues,
- Tener un equipo de gente capacitada capaz de recabar información confiable en forma periódica,
- Implementar medidas de remediación provisorias tendientes a liberar tensiones por medio de la apertura de zanja y colocación de caños corrugados,
- Definir e implementar un cambio de traza