

Adecuación integral de un sector de gasoducto de alta montaña sometido a un proceso de erosión retrocedente

Por **Manuel Ponce (TGN S.A.)** y **José Huanca (Gasoducto Nor Andino GNA)**

En este trabajo se describe el desarrollo y el diseño de dos soluciones geotécnicas integradas que se implementaron en el control de la inestabilidad y el retroceso de la barranca que surca el tramo 503 del ducto en plena Puna argentina.

El tramo 503 forma parte de uno de los 4 tramos que conforman el gasoducto Nor Andino en territorio argentino. Este gasoducto, que opera y mantiene TGN S.A., se desarrolla en el Noroeste de la Argentina (NOA) y Chile. En el territorio argentino nace en la Planta compresora Pichanal (cercana a la localidad homónima) y culmina en el mojón 377 en Paso de Jama, en el límite con Chile (Figura 1). En los 377 km de traza el gasoducto, atraviesa tres provincias geológicas, cada una de ellas se caracteriza por presentar una geomorfología y una fisiografía característica. En los primeros 90 km el gasoducto atraviesa las sierras subandinas, caracterizadas por un clima cálido, subtropical, con vegetación frondosa y alta humedad. Suelos desarrollados sobre material rocoso sedimentario, pendientes suaves a moderadas y alturas geográficas de hasta 2.000 m. Entre los 90 y 116 km, el gasoducto continúa por la Cordillera Oriental, (CO) un cordón montañoso de



gran altura, altas pendientes, con desarrollo de potentes coluvios y un clima templado a frío con vegetación rala a moderada (bosque de altura), cuya altura máxima alcanzada por el ducto ronda los 4.500 m. Finalmente, entre los 116 y 377 km, el gasoducto se desarrolla en la Puna, una altiplanicie volcano-sedimentaria con lomadas moderadas a suaves, por encima de los 3.000 m y hasta los 4.200 m de altura, en un clima árido, desértico, con desarrollo escaso de suelos, pero con alta erosionabilidad.

Entre el mojón 262 y 263, el gasoducto faldea la pared norte de un extenso valle fluvial, de dirección este-oeste, que también es utilizado para el trazado de la ruta 74 que ese encuentra por encima del ducto (Figura 2).

A la altura del mojón 262+398, un arroyo que nace en la parte alta de la pared norte del valle desarrolla su curso de agua hasta llegar a la cota topográfica más baja del valle donde se une al curso principal de este último. En

su recorrido, a lo largo del tiempo, ha labrado su curso en profundidad y ancho convirtiendo a este último en un gran cañón de más de 30 m de profundidad y unos 30 m de ancho (Figura 3).

El problema principal que experimentó el ducto se ubica precisamente en el mojón 262+295 (Figura 3), donde la margen izquierda del cañón comenzó a sufrir, en los últimos cinco años, un fuerte ensanchamiento como producto de la desestabilización del material que conforma el talud. En la figura 4 se muestra una imagen satelital de 2016 con el avance claro de la erosión hacia el macizo rocoso con riesgo de exponer la tubería.

Este retroceso se produce como consecuencia de la búsqueda del equilibrio natural de la barranca de los materiales que la conforman, una mezcla de derrubios volcano-sedimentarios que fueron, en parte, retrabajados en la época de la construcción de la traza.

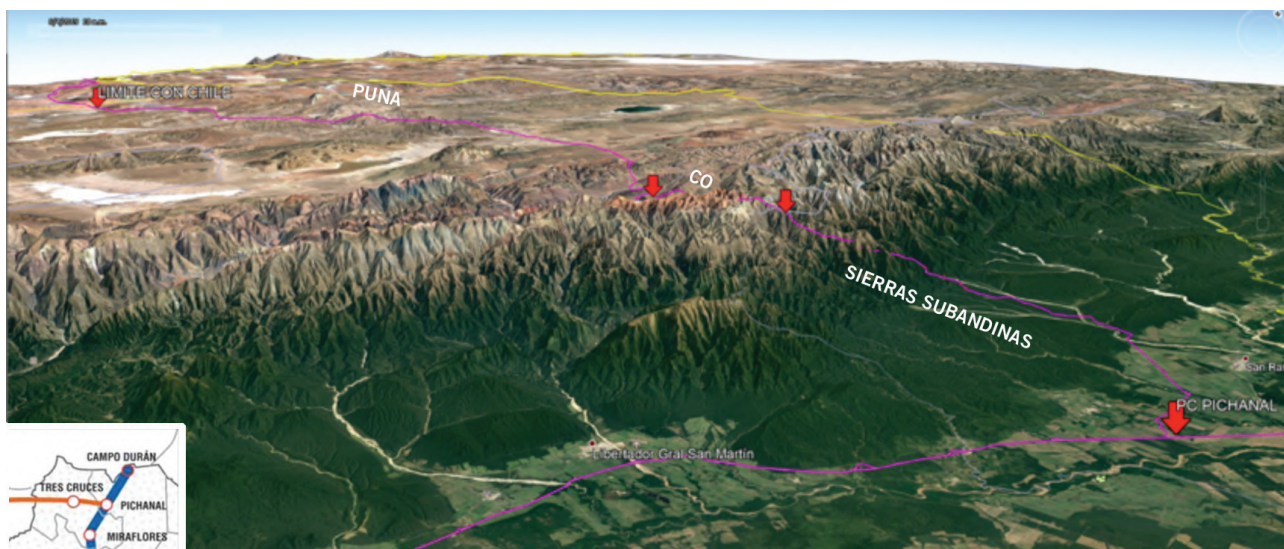


Figura 1. Gasoducto Nor Andino y su recorrido por los diferentes sectores geológicos en el NOA.



Figura 2. Ubicación del proceso erosivo en el contexto regional de la Puna (recuadro amarillo). El gasoducto faldea a media ladera izquierda de un gran valle fluvial que se observa en la fotografía. En azul desarrollo del curso de agua implicado en la formación del cañón de erosión.

El proceso erosivo básicamente se da por desprendimiento y volcamiento y/o desmoronamiento del suelo residual que se presenta en los primeros 4 m superficiales, todo esto motivado fuertemente por infiltraciones de agua subyacentes que se encuentran entre el suelo regolítico y el macizo rocoso subyacente (Figura 5). El retroceso erosivo continuará hasta que se encuentre un material de mayor resistencia como lo es el macizo rocoso volcánico que lo circunda por detrás. Entre 2017 y 2018, el proceso erosivo se aceleró y dejó la cañería como muy poca tapada horizontal (unos 50 cm).

De este modo, el riesgo más importante a la integridad del ducto consistía en que el patrón de avance analizado de la erosión retrocedente dejara expuesta y suspendida la tubería en una longitud de 30 m a más de 30 m de altura. El primer problema surgiría en que la tubería quedaría expuesta al impacto directo de rocas que suelen caer desde lo alto del macizo, el siguiente inconveniente sería el au-

mento de la flecha del ducto y las oscilaciones producidas por el viento a 4.200 m de altura, lo que llevaría en un aumento de la tensión del tubo. Por otro lado, el revestimiento de este se vería deteriorado rápidamente por la radiación ultravioleta que impacta a esa altura geográfica. Por último, una vez producida la erosión las condiciones de trabajo para readecuar la línea con personal y equipos, se vería fuertemente afectada desde el punto de vista operativo y de seguridad.

Desarrollo

Análisis del problema

El análisis llevado a cabo para reparación del sector erosionado involucró numerosas variables técnicas y económicas. Desde el punto de vista técnico una reparación convencional para tratar de frenar la erosión se volvió de muy

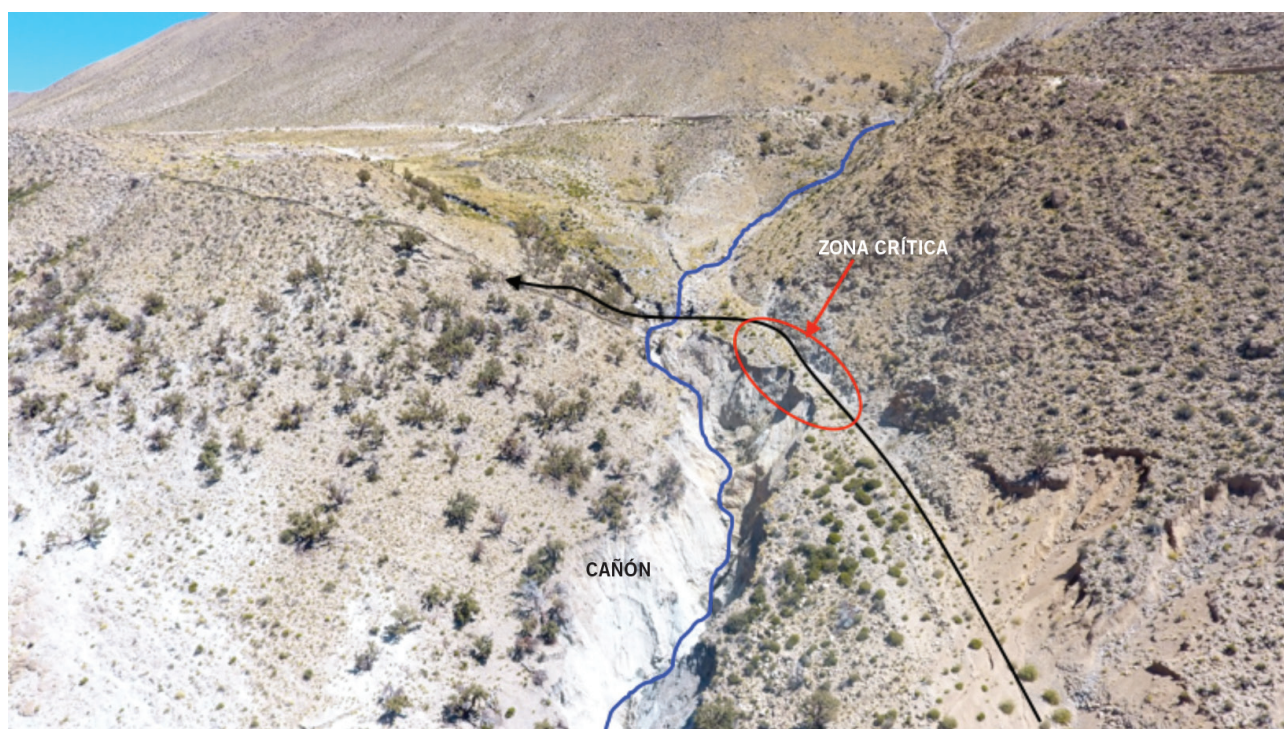


Figura 3. Vista general del cañón producido a lo largo del tiempo con la ubicación del gasoducto, los cursos de agua del aporte a la quebrada y la zona de erosión crítica lateral para el gasoducto.



Figura 4. Imagen satelital de 2016 que muestra claramente la problemática de avance de la erosión de la barranca izquierda del cañón hacia la pared del macizo rocoso que esta subyacente. Se muestra el límite entre ambos materiales, en el medio, el ducto.

difícil aplicación: el ingreso de maquinaria pesada por el lecho del cañón, a más de 30 m de profundidad, era un riesgo potencial, por la inestabilidad del sector y la nula accesibilidad de las máquinas. Las reparaciones tradicionales que involucraban colocación de mantas geotextiles con la intención de frenar el retroceso y la inestabilidad del talud tampoco eran adecuadas, porque los problemas de desmoronamiento estaban vinculados con el agua de infiltración provenientes de la interfase suelo blando-macizo rocoso. El desarrollo de una pared resistente a base de un muro de contención de hormigón y piedra encanastada encarecía la obra y no aseguraba su estabilidad en el tiempo, dado que no había una base de apoyo confiable para evitar que

la estructura se sostuviera y no colapsara por deslizamiento de los materiales infrayacentes, debido a que la pared del macizo rocoso mantiene un ángulo preponderante.

Además, remover y re TRABAJAR el suelo desde la superficie de la pista hacia el cañón implicaba un riesgo importante para el movimiento de retroexcavadoras, dado que el ancho de pista del ducto era muy reducido. Por lo tanto, el control de la erosión y el manejo del riesgo de la tubería, de manera tradicional, se volvía muy difícil y se encarecía enormemente, debido a la lejanía y la altura donde había que transportar las máquinas y materiales.

Una solución alternativa se ajustaba a un cambio de trazado, pero no estaba contemplado en los costos y los

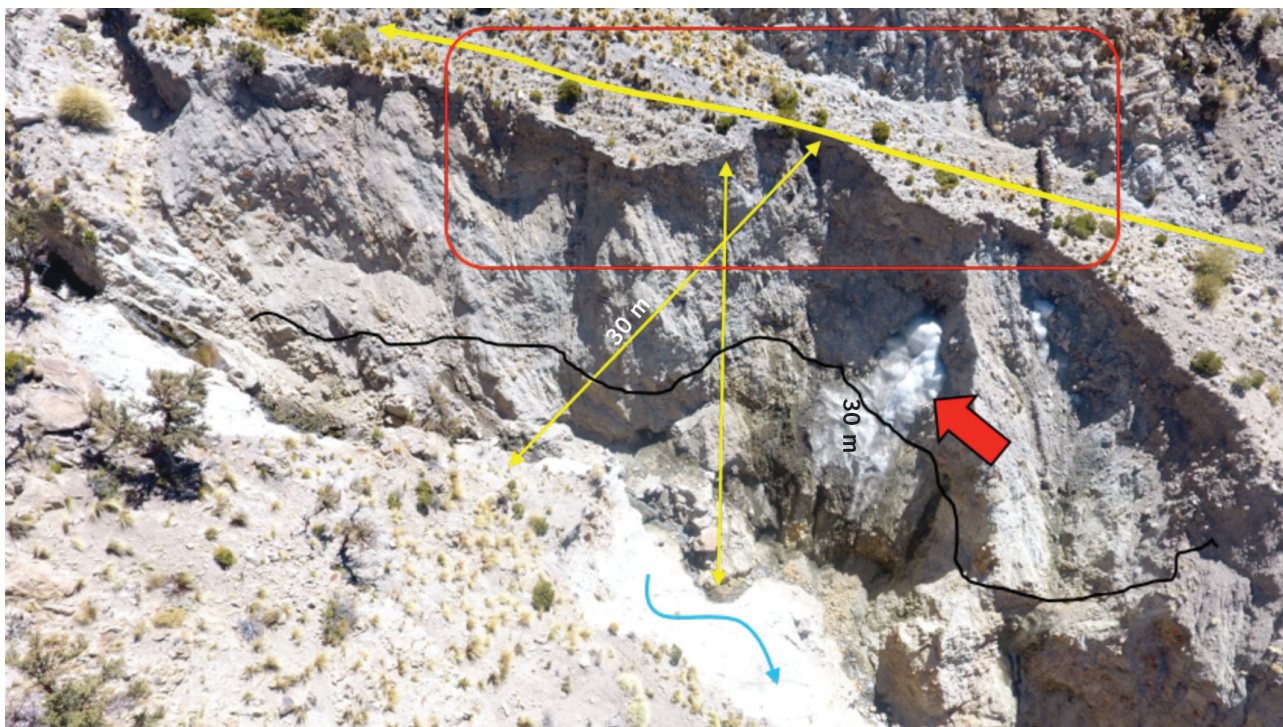


Figura 5. Estado avanzado de la erosión (invierno de 2018) donde la tubería se encuentra cerca de su exposición. La línea oscura divide el material de derrubio del macizo rocoso subyacente, el recuadro rojo indica la zona comprometida del ducto. La flecha roja indica el agua congelada a 4.200 msnm, y evidencia la fuerte infiltración que se da en todo el año y que se vuelve flujo en los meses de verano junto con las lluvias estivales.

tiempos por Nor Andino S.A., por lo cual no podía concretarse en la ecuación económica.

Solución propuesta

El desarrollo de una propuesta técnica viable debería ser una alternativa diferente a los caminos mencionados.

Las posibilidades viables que fueron analizadas debían responder a diferentes premisas o criterios que responderían a trabajar sobre la superficie de la pista sin ir más lejos que destapar la tubería, a poder asegurar la estabilidad de esta sin que el avance de la erosión fuese un condicionante, y finalmente que la obra tuviera un costo y un período de ejecución razonable.

Para todo ello se pensó un proyecto, teniendo como objetivo principal, asegurar la porción de cañería comprometida a la erosión mediante la utilización del macizo rocoso como medio de sustento de la tubería. Esto aseguraría, en el corto y mediano plazo que, si la tubería quedaba sin soporte de suelo y expuesta libremente al cañadón, esta quedara sujeta a otro punto no vinculante que no fuese el propio suelo de la pista.

Por ello las tareas del fijado del tubo al macizo contemplaron dos estadíos por desarrollar:

- Reposicionar la tubería, mediante su movimiento controlado, hacia el interior del macizo rocoso para buscar un mejor sector de agarre, dado que en superficie el material estaba muy alterado, irregular y no permitiría la fijación de la tubería adecuadamente sea cual sea el método elegido.
- Buscar el método de fijación al macizo más adecuado según las condiciones geotécnicas del macizo.

Análisis geomecánico y de excavabilidad del Macizo Rocosola viabilidad de la obra estaba fuertemente condicionada por la posibilidad de excavar el macizo rocoso, porque no se podía ni anclar y/o planificar alguna solución técnica con una roca tan meteorizada en los primeros metros desde la superficie. En un análisis prioritario, el éxito de una posible obra estaba sujeto a remover al menos una longitud de aproximadamente 40 m de longitud, y la profundidad de excavación estimada era de 2 m en sentido horizontal. Tomando en cuenta estas dimensiones se realizó un relevamiento geotécnico de este sector y se determinó el grado de excavabilidad que presentaba el macizo.

Remover físicamente parte de un macizo rocoso implica utilizar diferentes técnicas, que según el tipo de características geomecánicas de este podrá desde excavar convencionalmente, escarificarse o ejecutar voladuras con explosivo. El escarificado o ripado consiste en desintegrar el macizo o remover la roca a través de una herramienta hidráulica colocada en un equipo pesado, la misma va "arañando" los fragmentos de roca y los va desprendiendo del macizo rocoso. Complementariamente a esta técnica se utiliza el martillo hidráulico para remover o facilitar los sectores más resistentes.

Existen numerosas clasificaciones que proponen como se debe evaluar el grado de arranque y excavación que presenta un macizo rocoso y de qué manera llevarlo a cabo. Para este proyecto se tomó la propuesta por Franklin *et al.* (1971) dada la posibilidad práctica de evaluar en campo dos de los parámetros que propone su clasificación. El diagrama de la figura 6 indica el grado de excavabilidad para un macizo rocoso en general, según los parámetros de espaciamiento de los sets de diaclasas de los macizos, índice de resistencia de carga puntual, resistencia a la com-

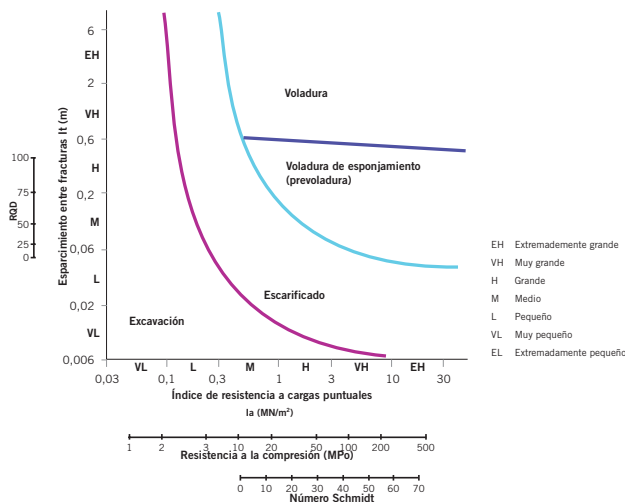


Figura 6. Clasificación de los macizos rocosos para su arranque y excavación, según Franklin et al. (1971).

presión de una muestra intacta o mediante la utilización del martillo de Schmidt. Cuanto mayor es el número de fisuras y más baja la resistencia a la compresión uniaxial de una muestra fresca, más fácil es excavarlo. Para la clasificación del macizo en cuestión se tomaron como parámetros la resistencia a la compresión uniaxial y el espaciamiento entre fracturas.

Para determinar los parámetros propuestos en la figura 6, previamente se debe clasificar el macizo desde el punto de vista geomecánico. Para ello se utilizó otro método de clasificación complementario: el Índice de Resistencia Geológica, (*Geological Strength Index* o GSI), propuesto por Hoek (1994), Hoek & Brown (1997) y Marinos et al. (2007) por ser uno de los más prácticos, confiables y de mejor aceptación.

EL GSI se basa en el análisis litológico, estructura y condiciones de las superficies de las diaclasas del macizo rocoso. Se estima con cartas valorizadas mediante la comparación visual con el afloramiento de roca expuesto, (Figura 7). Combina dos parámetros fundamentales del proceso geológico que experimenta un macizo a lo largo del tiempo, su blocosidad y las condiciones de sus fracturas.

En el caso particular del sector analizado, en el tramo que se adecuó, se determinó la presencia de un macizo rocoso formado por rocas volcánicas y/o volcanoclasticas, en condiciones geomecánicas diversas, cuyo grado de meteorización y de fracturamiento es avanzado. Se detallan a continuación los GSI obtenidos para el sector que se intervino:

Sector 1 GSI: 60-65

Tipo de estructura: fracturada

Condición superficial de juntas: buena, caja levemente alterada, resistencia de la roca intacta entre 100 y 250 MPa se necesita más de tres golpes de martillo para romperla.

Condición de excavabilidad: prevoladura o martillo hidráulico.

Sector 2 GSI: 35-45

Tipo de estructura: fracturada-perturbada

Condición superficial de juntas: regular, caja moderadamente alterada, resistencia de la roca intacta 50 MPa se necesita uno a dos golpes de martillo para romperla, 20

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces				
STRUCTURE		GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces				
DECREASING SURFACE QUALITY →		FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces				
POOR Slackened, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments		VERY POOR Slackened, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities		90	80	70	60	50
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		80	70	60	50	40
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		70	60	50	40	30
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		60	50	40	30	20
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces		50	40	30	20	10
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 7. Carta general para estimar el GSI, desde las observaciones geológicas. Marinos et al. (2007).

fracturas o más por metro, varios juegos de diaclasas.

Condición de excavabilidad: escarificado con equipo adecuado.

Sector 3 GSI: 20-25

Tipo de estructura: fracturada-perturbada

Condición superficial de juntas: mala a muy mala, caja fuertemente alterada, blanda, resistencia de la roca intacta 25 MPa o menos, se indenta fácilmente con la punta del martillo, material deleznable.

Condición de excavabilidad: escarificado a excavación simple.

En la figura 8 se muestra aproximadamente todos los sectores identificados.

Adecuación del macizo

Una vez determinado el grado de excavabilidad del macizo, comenzaron las tareas de adecuación. Las intervenciones al macizo rocoso fueron ejecutadas con retroexcavadoras con balde con uñas para el escarificado y en otros sectores con martillo percutor para romper los bloques más consistentes. Las excavaciones (en sentido amplio) se planificaron en cuatro etapas.

Etapas 1: preparación de la seguridad del talud. Para ello se realizó un corte a medio talud generando un banco con la idea de quitar peso por encima del sector erosionado a intervenir y ejecutar una pendiente negativa hacia el interior del talud para evitar desprendimientos y caídas de bloques en la zona de la tubería cuando fuera destapada



Figura 8. Discriminación de dominios geomecánicos del macizo analizado según GSI (Marinos *et al.*, 2007).

como así también la protección al personal interviniente. Se ejecuto un banco de unos 130 m de longitud por unos 4 m hacia el macizo, y una altura de entre 7 y 11 m respecto a la pista principal.

Etapla 2: nivelación de la pista a 2 m de tapada para un mejor desarrollo de la traza. El material sobrante se lo reubicó para trabajos posteriores.

Etapla 3: excavación lateralmente el macizo mediante el escarificado y rotura neumática con martillo percutor al macizo. Las dimensiones del sector intervenido fueron aproximadamente 180 m de longitud, 3 m de profundidad lateral, y un promedio de 11 m de altura hasta el banco intervenido en la etapa 1.

Etapla 4: se procedió a descubrir la cañería mediante una excavación controlada a los efectos de impedir cualquier movimiento indeseado antes de su posicionamiento final en una etapa siguiente. Para ello se excavó la pista desde el lateral derecho de la tubería hacia el interior del macizo, y posteriormente el lateral opuesto hacia el cañón.

Las dimensiones y los movimientos de suelo y roca aproximados de la obra fueron los siguientes:

Zona de banco 220 m largo x 7 m altura * 4 m profundidad = 6160 m³, tomando en cuenta que esto se movió dos veces porque luego se reubico en otro sector momentáneamente.

Zona de limpieza de pista 130 m de largo * 4 m de tapada * 8 m de ancho de pista = 4160 m³

Zona de corte a la altura de la pista 180 m largo * 11 m altura * 3 m de profundidad = 5940 m³, esto también se movió dos veces hasta su reubicación y parte vertido al arroyo del cañón.

Zona de excavación de zanja 455 m de largo * 3,6 m de ancho promedio * 2 m profundidad = 3276 m³

Total, aproximado de movimiento neto (sin contar doble traslado) = 19.536 m³

En las figuras 9a, b, c y d se muestran resumidamente las etapas descriptas.

Reposicionamiento de la tubería

El reposicionamiento de la tubería fue estrictamente necesario para poder fijar la tubería al macizo. Esto implicaba que al menos 30 m de gasoducto, en el sector del avance de la erosión, debían estar en una posición cercana y segura para su fijación, además de que esta acción alejaba a la misma del proceso erosivo en cuestión. Dada la imposibilidad de intervenir la tubería con corte y colocación de curvas en frío, se decidió reposicionar la tubería por el movimiento de esta mediante flexión natural.

Mover la tubería en servicio, en una determinada longitud lateral, mediante flexión natural, implicó analizar y tener en cuenta una serie de variables entre las que se destacan: la tensión longitudinal total de la tubería, la tensión disponible para el curvamiento, las curvas en frío, tanto verticales como horizontales y la longitud conveniente hacia el macizo, entre otras.

Para cubrir estas variables se aplicó la Recomendación Internacional API 1117 "Recommended Practice for Movement In-service Pipelines", 2008. Esta práctica tiene como objetivo principal, proporcionar un procedimiento de cómo mover líneas en servicio y garantizar un determinado nivel de tensión que puede generarse durante dicho proceso. Para ello se basa en una serie de fórmulas que determinan un perfil constructivo de movimiento como producto de la longitud de tubería debe dejarse libre (sin restricciones) en relación a una determinada longitud que se desea mover, ya sea en el plano vertical u horizontal.

Dada la situación de avance de la erosión, conformación del talud y su situación geomecánica para la fijación de la tubería al macizo, se determinó que la longitud horizontal

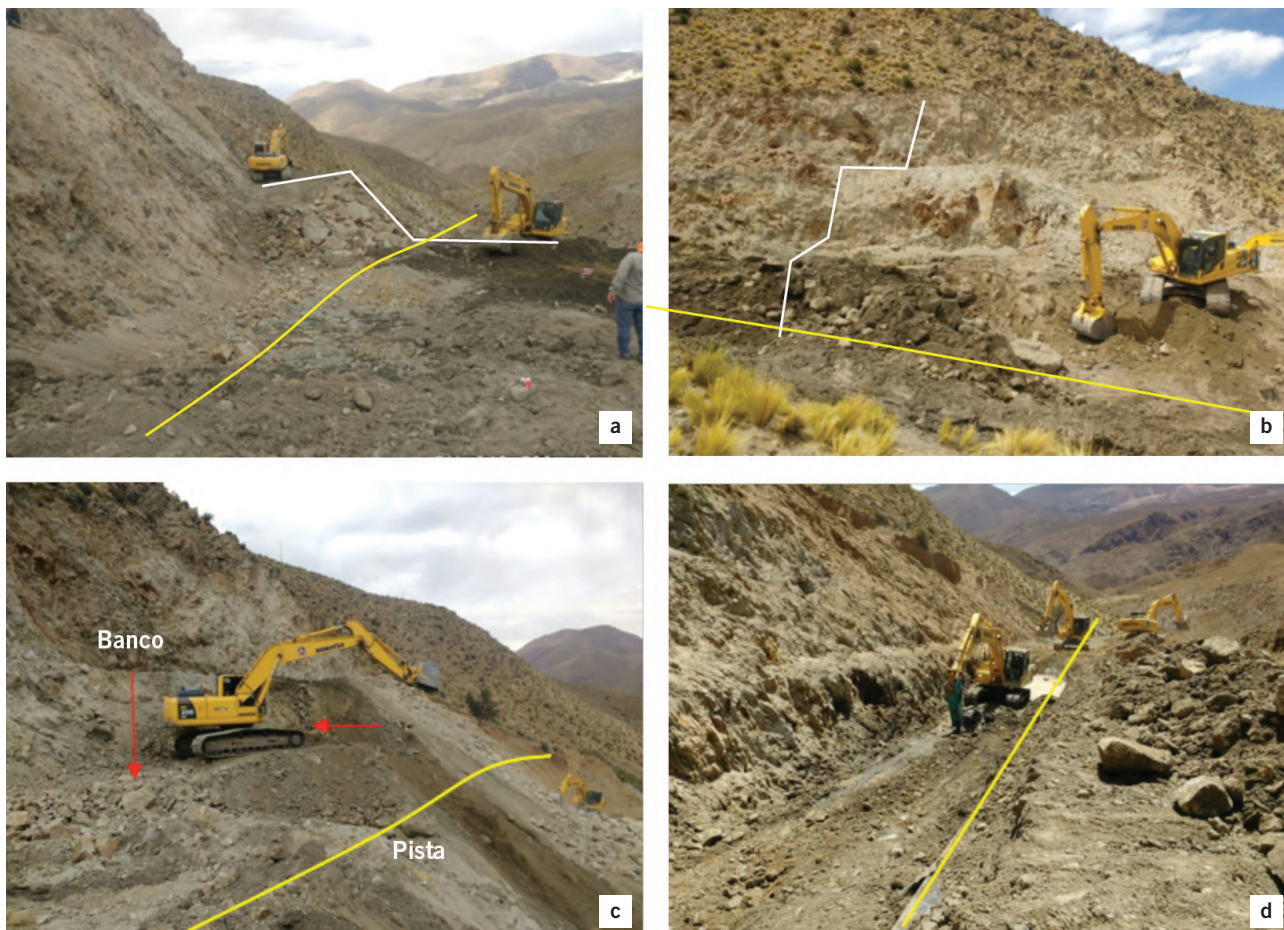


Figura 9. a. Excavadora construyendo el banco en su inicio, a la derecha otra excavadora acondiciona la pista. b. Nivelación de la pista mediante la quita de tapada. c. Comienzo de la excavación lateral del macizo en sus primeros 4 m de altura, por encima el escalón de la etapa 1. d. Extremo este de la excavación para descubrir la tubería y rotura de bloques enterrados con martillo percutor.

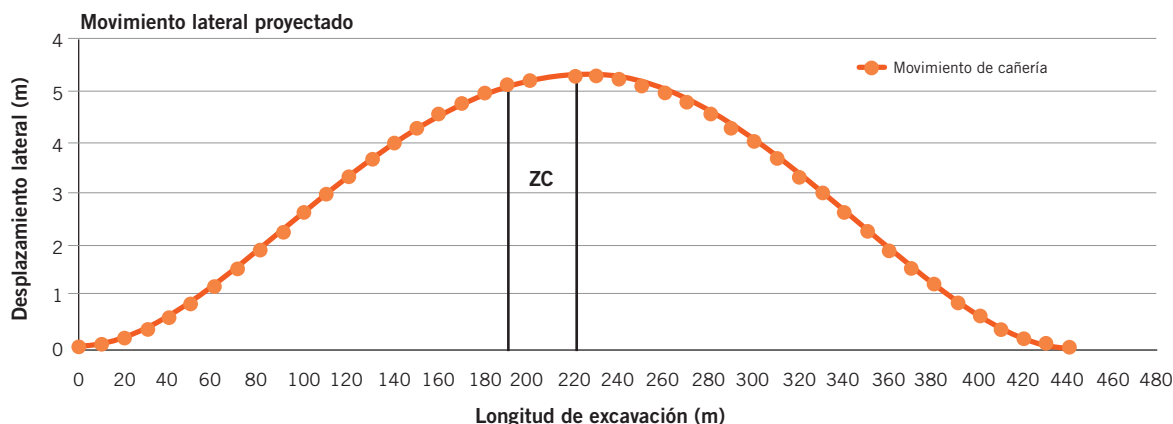


Figura 10. En el eje de las abscisas longitud total excavada para permitir el movimiento de la tubería sin restricciones con el propósito de controlar los niveles de tensión a un 50% de la TFME. En las ordenadas longitud de desplazamiento máxima proyectada.

lateral de desplazamiento de la tubería, en la zona de la erosión debía ser aproximadamente de 5 m. Por lo tanto, se aplicaron los cálculos correspondientes que recomienda API 1117 sin sobrepasar un nivel de tensión del 50% de la Tensión de Fluencia Mínima Especificada (TFME) y se determinó que debía destaparse una longitud total de tubería de 440 m. En la tabla 1 se muestran todas las variables a tener en cuenta por la práctica recomendada a la hora de hacer los cálculos. En la figura 10 se muestra el perfil de movimiento lateral en planta proyectado según los resultados arrojados por API 1117. Se detallan entre líneas azules los 30 m más comprometidos en la zona de la erosión.

PARÁMETROS	Valor (Unidad)
Diámetro nominal	20" (0,508 mm)
Espesor	7,14 mm
Grado	API 5L x 70
MAPO	94,9 kg/cm ²
Temperatura de instalación	20°
Temperatura de operación	20°
Factor de seguridad	0,5
Longitud de movimiento lateral máximo previsto	5,34 m
Longitud de excavación proyectada	440 m

Tabla 1

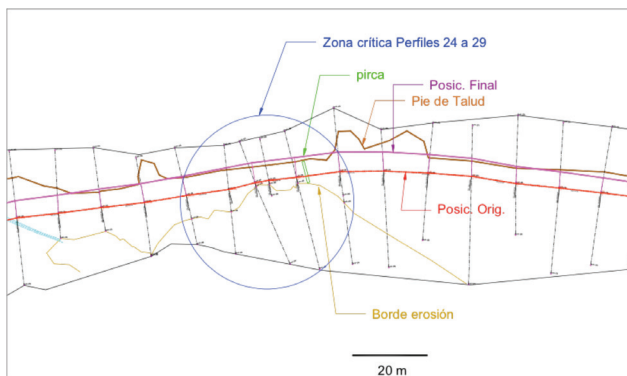


Figura 11. Detalle del relevamiento topográfico en planta en la zona crítica de la erosión que muestra la posición original de la tubería y su proyección final calculada por API 1117. Obsérvese en la zona crítica ya la tubería en el interior del macizo.



Figura 12. Preparación de la pista con el caño descubierto y medias cañas de protección para evitar caída de rocas durante la exposición de la tubería.
Figura 13. Colocación de bolsas de polipropileno que marca el nuevo perfil de la tubería.



Extrapolar este perfil a su ejecución en campo requiere un estudio topográfico previo, donde se determina la posición espacial de la cañería mediante coordenadas x , y , z . A partir de allí, el equipo topográfico va marcando en el terreno la posición final de la tubería según el perfil de proyecto como se muestra en la figura 10.

En la figura 11 se muestra el relevamiento topográfico

vios de preparación del nuevo perfil mediante el colocado de las bolsas de polipropileno. En la figura 14 se muestra el equipo de topografía al momento de definir el perfil cuando indica la posición de las bolsas de polipropileno. En la figura 15 se muestran los inicios de las maniobras de movimiento y posicionamiento de la tubería sobre el nuevo perfil. En las figuras 16 y 17 se muestran sectores

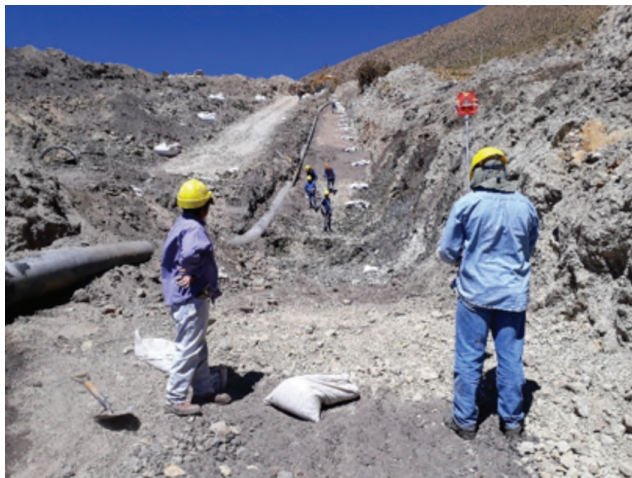


Figura 14. Equipo de topografía indicando la posición de las bolsas en el terreno.



Figura 15. Inicio de los movimientos para desplazar la tubería a la nueva posición.



Figuras 16 y 17. Tuberías en la posición final luego del desplazamiento. Las flechas rojas indican la posición original donde se encontraba el ducto y hacia dónde fue movido.



Figuras 18 y 19. Panorámicas donde se observan los 440 m de tubería destapada y alineada en el nuevo perfil.

con la tubería en la posición final y, en las figuras 18 y 19, se muestran unas panorámicas, ya con los movimientos y posición final del ducto para apreciar la magnitud de la obra. Una vez posicionada la tubería, se ejecutaron placas radiográficas a todas las costuras circunferenciales involucradas en el movimiento en busca de posibles fisuras por flexión. Los resultados fueron negativos. Por los tiempos de obra, la situación geográfica, el clima y la disponibili-

dad de recursos, la segunda etapa de la obra fue ejecutada luego de un intervalo de tres meses. Por lo tanto, la tubería fue completamente tapada hasta reiniciar los trabajos finales de fijación del sector erosionado al macizo (Figura 20).

Sostenimiento del ducto al macizo

Para el sostenimiento del tramo de gasoducto compro-



Figura 20. Gasoducto tapado y pista recompuesta con drenajes mediante geomembranas hasta retomar los trabajos de fijación final de la tubería al macizo.

metido con la erosión se evaluaron dos posibilidades que consistían en pernos de anclaje en forma de L sellados con lechada de cemento y/o resina, o sostener el caño a través de cables tensores que se amarrarían a muertos de anclaje instalados sobre el banco superior (Figura 21).

La evaluación final del macizo rocoso luego de la excavación lateral permitió desestimar la idea de anclar con pernos al ducto dada el nivel de fracturamiento y meteorización del macizo, por lo cual las tareas de perforación y relleno con el cementante se volverían una gran dificultad. Por lo tanto, se optó por la opción b de la figura 21. La ventaja de esta alternativa consistía en no tener que perforar el macizo, a su vez ya se tenía construido la base de apoyo de los muertos de anclaje. La fabricación de estos últimos suponía una tarea relativamente sencilla, al igual que el resto de los materiales que constituirían el sostenimiento integral del ducto.

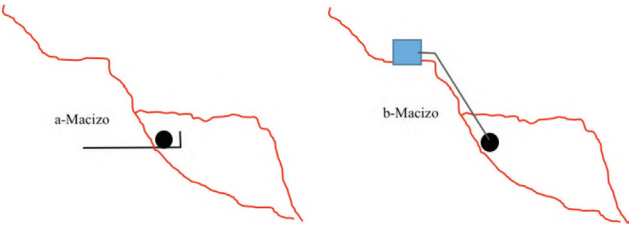


Figura 21. Alternativas analizadas para el sostenimiento del ducto al macizo en la zona de la erosión, alternativa a) mediante pernos de anclaje en L, b) mediante cables tensores de acero, amarrados a muertos de anclaje.

Sostenimiento mediante cables tensores y muertos de anclaje

El principio de funcionamiento de esta alternativa se basó en sostener todo el peso de alrededor de 30 m de tubería llena de agua, ante una eventual Prueba Hidráulica del tramo (PH), frente a la posibilidad de que la tubería quedara sin el sustrato correspondiente.

La mecánica de sostenimiento consistió en tres elementos fundamentales:

- A) Muertos de anclaje.
- B) Cables tensores.
- C) Agarraderas de acero.

Muertos de anclaje

Se confeccionaron 4 muertos de hormigón armado. Cada

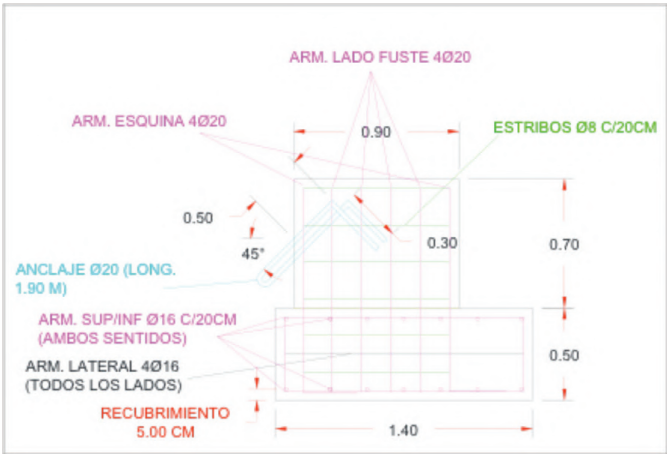


Figura 23. Diseño del muerto.

uno de 1,5 m³ con una densidad promedio del hormigón de 2.400 kg/m³, por lo que su peso promedio fue de 3.600 kg. Cada muerto contó con su gancho de sujeción previamente para el amarre de los cables tensores. El diseño de los muertos fue especialmente orientado a impedir su vuelco como un factor de seguridad adicional. En las figuras 23 se muestra el diseño y características del muerto. En las figuras 24, 25 y 26 se muestran las construcciones de los muertos.

Cables tensores: se utilizaron cables de acero galvanizados de 13 mm pulgada tipo 6x19 W. +1, AFS, torsión RD con una resistencia de 1770 N/mm², OMR: 9870.00 dan.

Abrazaderas de acero: se confeccionaron 4 juegos de abrazaderas de acero cada de Calidad F-24 con un espesor mínimo de 1/2 pulgadas (1,27 cm). Estas incluían un conjunto de accesorios:

Bulones: Calidad ASTM A325, 5/8 pulgadas (1.59 cm) o varilla roscada Inox. 5/8 pulgadas, Calidad ASTM A304. Número de bulones (4).

Diámetro de perforación para pasaje de cables: 7/8 pulgadas (2,22 cm), número de perforaciones (4).

Diámetro de perforación para pasaje de bulones: 11/16 pulgadas (1,75 cm). número de perforaciones (8).

En la figura 26 se muestra el diseño de la abrazadera que envuelve y sostiene la tubería.

Datos cuantitativos y cálculos establecido para el proceso de sostenimiento

En la tabla 2 se resumen las características, el número

PARÁMETROS	Valor (Unidad)
Longitud de cañería sostenida	30 m
Peso de cañería sostenida sin agua	2.400 kg
Peso del agua en el tubo para 30 m de longitud	6.080 kg
Peso total para sostener la cañería con agua	8.480 kg
Número de muertos de anclaje	4
Peso total de los anclajes	14.400 kg
Cable tensor utilizado	140 m
Momento estabilizante por muerto	2.335 kg.m
Momento desestabilizante al vuelco por muerto con PH	460 kg.m
Coeficiente de seguridad por Muerto	5

Tabla 2.



Figura 24. Construcción de la armadura.



Figura 25. Encofrado y colado del hormigón.



Figura 26. Desmolde y terminación final.

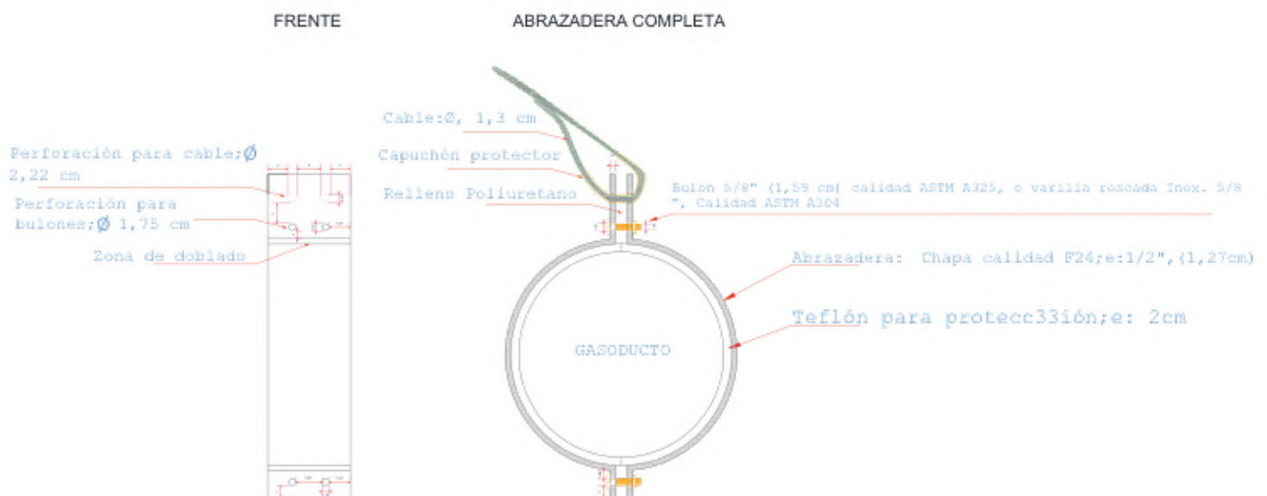
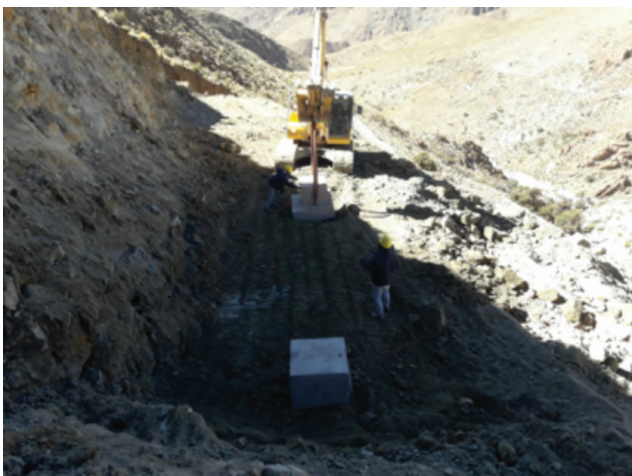


Figura 26. Diseño de abrazadera.

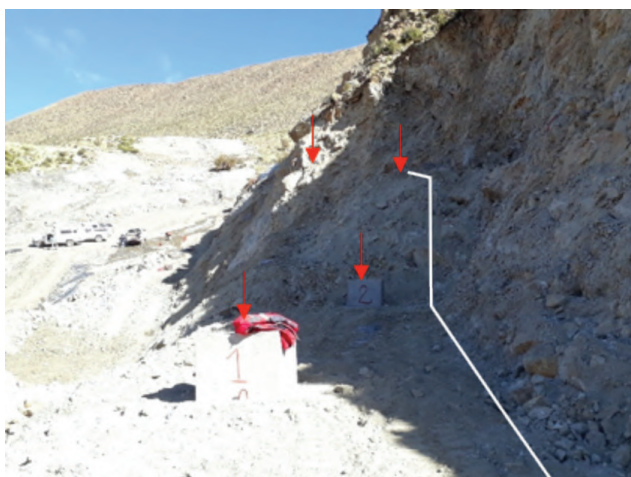
de elementos utilizados y las fuerzas actuantes en el proceso de sostenimiento. Se tomó al volcamiento como la acción principal de los momentos desestabilizantes que pudieran experimentar los muertos. Se observa que el factor de seguridad es de 5, por lo que verifica ampliamente al momento volcante. Si se considera que el cálculo se realizó

tomando en cuenta la tubería llena de agua ante una eventual PH, con la tubería solo con gas, el factor de seguridad se triplica.

Colocación del sistema muertos, cables tensores abrazaderas Para esta segunda etapa de la obra integral, se volvió a repasar el sector del banco superior, donde fueron



Figuras 27 y 28. Adecuación del banco, colocación y enterramiento de los muertos.



Figuras 29 y 30. Disposición final de los muertos, dos en la parte inferior del banco y dos en su parte superior.



Figura 31. Vista panorámica de la disposición final de los muertos en el banco. Dos ellos en la parte superior del banco, y los otros dos, en la parte inferior. Debajo, en línea amarilla, la ubicación aproximada del ducto con la excavadora comenzando a excavar para la colocación de los cables y abrazaderas.

colocados los muertos. Los mismos se distribuyeron equidistantemente en la zona comprometida de aproximadamente 30 m. Parte de ellos se colocaron enterrados para aumentar el factor de seguridad ante la pérdida de fricción o vuelco. En las figuras 27 y 28 se muestran la adecuación

del banco superior, la colocación de los muertos y su enterramiento en el terreno. Su posición en cota fue distinta dado la complejidad de excavación del banco que se encuentra con un desnivel.

En las figuras 29 y 30 se muestran los muertos ya colocados en su posición final, dos de ellos se ubicaron en la parte superior del banco (muertos 3 y 4), y los otros dos (muertos 1 y 2), en la parte más baja.

En la figura 31 se muestra finalmente una panorámica a distancia de cómo quedó la ubicación de los muertos en el banco.

El paso siguiente a la colocación de los muertos fue re-excavar las zonas donde irían colocadas las abrazaderas. Luego se procedió al colocado de las abrazaderas y tendido de los cables tensores donde se amarraron los mismos a cada uno de los elementos de sostenimiento. En la figura 32 se muestra una excavadora destapando las zonas donde fueron colocadas las abrazaderas. En la figura 33 se muestra el colocado de las abrazaderas unidas mediante sistema de bulones, debajo mantas termo-contráctiles para no afectar el revestimiento y espuma de poliuretano para sellar e impermeabilizar zonas más propensas a la corrosión. En las figuras 34 y 35 se muestran en ángulos distintos la posición final de las abrazaderas. En la figura 36 se muestra un detalle de la conexión de anclaje entre el cable tensor y el muerto.



Figura 32. Re-excavación para colocar las abrazaderas.



Figura 33. Colocación de la abrazadera.



Figuras. 34 y 35. Diferentes ángulos de las abrazaderas con el cable tensor ya colocado.



Figuras 36. Conjunto de elementos para amarrar el cable al muerto de anclaje.



Figura 37. Disposición final de las abrazaderas con los cables tensores colocados.

En la figura 37 se muestra una panorámica final de como quedó el sistema de anclaje total para los 4 muertos. En la figura 38 se muestra la colocación de mantas termo-contráctiles y espuma poliuretánica a las abrazaderas para para extender su vida útil en servicio frente a los procesos corrosivos. Luego, en la figura 39 se muestra el colocado final de Rock Shield, para protección mecánica.

Relleno y recomposición de pista

Una vez terminado el sistema de sostenimiento, se procedió al relleno de los sectores excavados, primero con material seleccionado y luego con material ordinario para línea regular hasta la superficie del terreno natural. Finalmente, se acondicionó la pista mediante bermas corta corrientes y conducción de agua por medio de canaletas artificiales revestidas con geomembrana (Figuras 40 a 43).



Figuras 38 y 39. Revestido de las abrazaderas con mantas termo-contráctiles, rock shield y espuma poliuretánica.



Figura 40. Colocado de material seleccionado sobre las abrazaderas. Figuras 41, 42 y 43. Relleno y adecuación final de la pista frente a las escorrentías.

Conclusiones

- La erosión retrocedente en el Mojón 262+290 en el tramo 503 del Gasoducto Nor Andino amenazaba dejar sin apoyo en unos 30 m de longitud la tubería, en una zona geográficamente poco accesible de gran altura y fuertes vientos.
- Se analizaron diferentes escenarios para resolver el problema, con un panorama desalentador mediante reparaciones convencionales, dado la situación geográfica del sector, el tipo de erosión y las condiciones económicas para efectuar las mismas.
- Un cambio de traza siempre es una opción conveniente y permanente para subsanar el problema, pero el alto requerimiento presupuestario, la interrupción indefectible del servicio y la búsqueda de una nueva ubicación para la traza comprometían la normal operación y ventanas de exportación de gas hacia Chile, en consecuencia la implementación de esta opción era inviable.
- Frente a ello se diseñó una obra a corto y mediano plazo que satisfizo los requerimientos de un costo razonable, sin interrumpir el transporte, y cuya función no dependerá básicamente del propio terreno donde se encuentra emplazado el ducto.
- El mantenimiento de la obra constará de revisiones

periódicas de los cables tensores, estado de los muertos y situación de estabilidad del macizo coincidentes con los planes de mantenimiento habituales para el ducto. En lo sucesivo, se determinará el plan de mantenimiento para las abrazaderas.

Bibliografía

- API 1117, 2008, *Recommended Practice for Movement in In-service Pipelines*. Product N° D11173, 46 p.
- Franklin, J. A., Branch, E. & Walton, G., 1971. *Logging the mechanical character of rock*. *Transactions of the Mining and Metallurgy*, volumen 80A, 1-9 pp.
- Hoek, E., 1994, Strength of rock and rock masses. *News J ISRM* 2(2):4-16.
- Hoek E., Brown, E. T., 1997, *Practical estimates of rock mass strength*, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 34:1165-1186.
- Marinos, P., Marinos, V. & Hoek, E., 2007, *The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses*. 10.1201/NOE0415450287.ch2.