

Una descripción de la situación geológica y estructural de la Cuesta de Mal Paso, donde se halla el Gasoducto Nor Andino que data de finales de los '90; el sistema de control de su deformación; el túnel y los aspectos significativos de su construcción, a través de más de 1.000 km desde Salta hasta Chile.

# Aspectos geotécnicos del Gasoducto Nor Andino en la Cuesta de Mal Paso

Por **José Manuel Ponce** (TGN), **Juan Bustinza** (Tecnored Ingeniería S.R.L.) y **Rodolfo Reale** (Gasoducto Nor Andino S.A.)

*Trabajo seleccionado por el Comité Organizador del 2º Congreso de Integridad en Instalaciones en el Upstream y Downstream de Petróleo y Gas.*



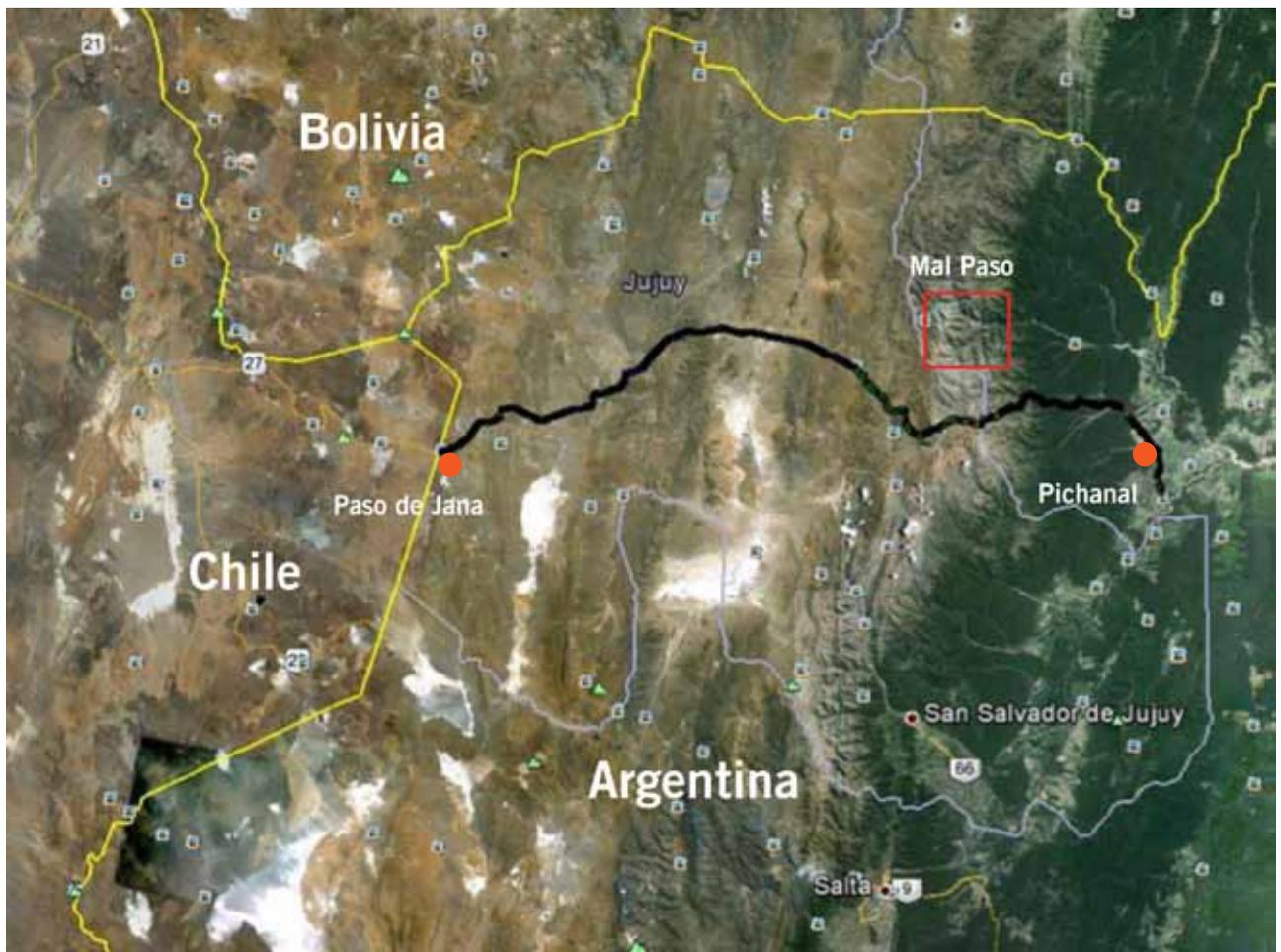


Figura 2. Vista satelital del gasoducto Nor Andino y la localización del sector de Mal Paso sobre la Cordillera Oriental. Obsérvese el pasaje transicional de las Sierras SubAndinas (verde intenso) hacia una geomorfología más quebrada (tonalidad blanquecina), para pasar finalmente a una zona más plana en la Puna (tonalidad amarronada).

## Marco geológico y geotécnico

El sector de Mal Paso (2.000 m.s.n.m) se encuentra localizado en las estribaciones más orientales de la Cordillera Oriental (figura 2). Este sistema se caracteriza en la región por presentar cordones montañosos escarpados, orientados con rumbo norte a nornordeste. El relieve es particularmente fuerte, de pendientes moderadas a altas, con considerable amplitud de elevaciones; las partes más bajas alcanzan cotas de hasta 1.000 m s.n.m., en tanto las cumbres se elevan en algunos casos a más de 6.000 m.s.n.m (cerro Chañi 6.200 m).

## Características geológicas y estructurales de Mal Paso

Denominado localmente como macizo de Mal Paso, este sector montañoso, por donde originalmente transitaba la traza del gasoducto, tiene una forma similar a un “espolón” o “nariz” rocosa, con inclinación promedio de 45° al oeste.

La “nariz” se extiende hasta la margen derecha del cauce del río San Andrés; de esa manera, interrumpe la continuidad del nivel de terraza aluvional del río sobre la que se instaló el gasoducto (ver figura 3).

El espolón y su entorno están compuestos por dos unidades de roca que tienen edades y características estructurales diferentes. La unidad más antigua (precámbrica a cámbrica inferior) consiste en filitas moradas intercaladas con grauvacas (areniscas limosas) grises y verdosas, que fueron depositadas en un ambiente marino profundo con edades entre 600 y 530 Ma (millones de años) de antigüedad [1] y [5]. Estas rocas fueron fuertemente plegadas y falladas, formando un relieve montañoso que posteriormente fue arrasado por la erosión e invadido nuevamente por el mar, en el que se depositó en discordancia la unidad más joven de edad cámbrica superior a ordovícica inferior (entre 500 y 490 Ma de antigüedad aproximada), y que consiste fundamentalmente en cuarcitas de color gris y gris blanquecino, depositadas en un ambiente marino de poca profundidad (playa).

Ambas unidades, y las depositadas con posterioridad, fueron de nuevo plegadas, falladas, elevadas y erosionadas dando lugar a la estructura y al relieve que se observa actualmente en la región; procesos que se desarrollaron en los últimos 15 Ma. Estructuralmente, el talud de Mal Paso es parte del flanco occidental de un pliegue anticlinal de grandes dimensiones, de rumbo aproximado norte-sur, que está afectado por fallas longitudinales y transversales. La parte inestable del talud está compuesta fundamental-

mente por estratos de cuarcita de color gris blanquecino, medianamente fallados y diaclasados, que inclinan hacia el oeste con ángulos variables entre 30° y 80°, formando pliegues de pequeñas dimensiones. Localmente, y en forma muy reducida, intercalan entre los estratos de cuarcita películas discontinuas de arcillas de color verde.

Debido a que las cuarcitas son muy resistentes a la erosión, ejercen un fuerte control sobre la morfología del talud, cuya pendiente es similar a la inclinación (buzamiento) promedio de los estratos (aprox. 45°).

## Análisis geotécnico, medición de deformaciones y naturaleza de los movimientos

Durante la construcción del ducto, en 1999, el macizo presentó los primeros indicios de inestabilidad con la generación de desmoronamientos superficiales de los bloques rocosos provenientes de la parte alta del talud, como producto inicial de las voladuras realizadas para el tendido de la línea. Sucesivos análisis en el tiempo determinaron el carácter inestable del sector [2]. A raíz de ello, a partir de 2002 se inició un plan de monitoreo geotécnico que involucró la implementación de:

- Monolitos geodésicos para medir desplazamientos superficiales del terreno.

- Inclínómetros instalados verticalmente para establecer superficies profundas de deslizamiento y medir velocidades de movimientos de deformación.
- Extensómetros eléctricos multipuntos para establecer diferentes superficies de deformación.
- Strain-gauges para medir directamente la tensión acumulada en la cañería.
- Relevamientos de campo por diferentes especialistas.
- Vuelos aéreos en helicóptero.

Los distintos estudios, junto con el complemento del instrumental geotécnico, permitieron elaborar dos escenarios posibles para la inestabilidad de Mal Paso, que consistieron en:

1. Desprendimientos superficiales: Se dan a través del desprendimiento de los bloques de cuarcita del frente del macizo. El mayor factor condicionante corresponde al componente estructural de la roca fuertemente diaclasa en 3 direcciones con estratificación paralela a la pendiente del talud. Todo esto motivado por las precipitaciones estacionales que lubrican las fracturas, y por la acción antrópica cuando el gasoducto atravesó el sector y generó una zona de desestabilización.
2. Movimientos profundos: Las mediciones geodésicas realizadas en superficie [3] (tabla 1 y figura 4) motivaron la colocación de dos inclinómetros que permitieron conocer las unidades en profundidad y detectar posibles



Figura 3. Macizo de Mal Paso. Característica del sector donde los bloques de roca interrumpen el nivel de terrazas del Río San Andrés. La línea amarilla representa la antigua traza por donde transitaba el gasoducto, ahora reemplazada por el túnel. La roca predominante que se observa en colores claros corresponde a cuarcitas blanquecinas compactas. La línea de trazos roja indica aproximadamente la zona con potencial deslizamiento.

Vértice	Desde la campaña inmediata anterior (2012)		Desde 1ª medición (2003)		
	Perpendicular (m)	Longitudinal (m)	Perpendicular Acumulado (m)	Acumulado Vertical (m)	Longitudinal Acumulado (m)
M004	1.237	-0.114	3.541	-0.327	-1.858
M040	1.224	-0.094	4.122	-0.268	-1.694
M041	1.075	-0.304	3.206	-0.831	-2.045

Tabla 1. Valores de desplazamientos por mediciones geodésicas arrojados mediante una proyección plana perpendicular y longitudinal a la cañería con relación al inicio de las mediciones (2003), y a la inmediatamente anterior a la última medición de septiembre de 2013.

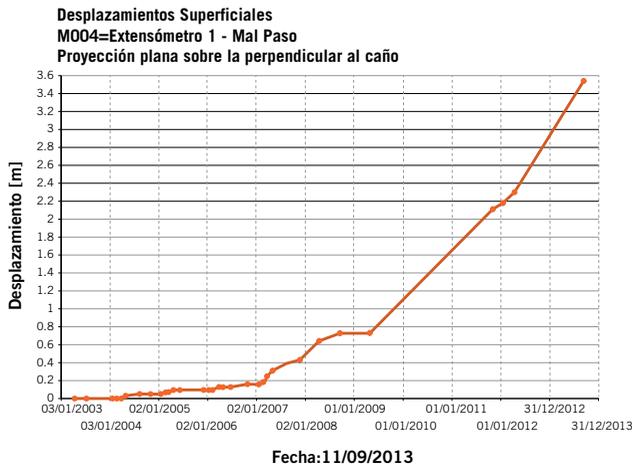


Figura 4. Movimiento del talud donde se observa la aceleración de los movimientos hacia el río San Andrés conforme pasa el tiempo hasta la actualidad.

movimientos. El resultado fue positivo, identificándose una aparente superficie de debilidad ubicada en el contacto entre las cuarcitas de base del grupo Mesón (Cámbrico) y la secuencia metasedimentaria de la formación Puncoviscana (precámbrica). Este contacto fue identificado aproximadamente entre los 30 y 32 metros de profundidad con rumbo y buzamiento similar a la cara del talud.

En cuanto a los movimientos profundos, el material litológico obtenido de las perforaciones y los resultados de los inclinómetros, complementariamente con las observaciones de campo, permitió elaborar un escenario aproximado sobre la dinámica de los procesos actuantes (ver figura 5).

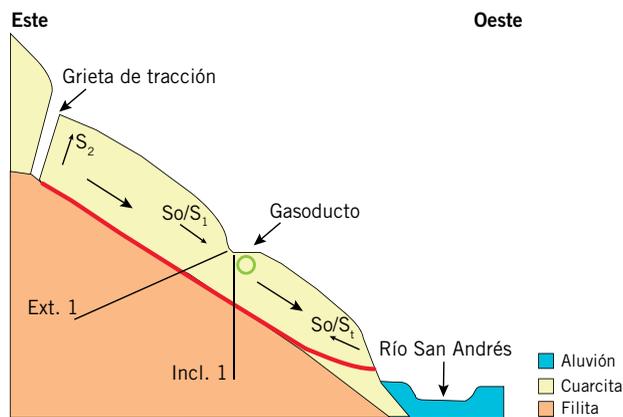


Figura 5. Esquema teórico de la zona afectada a partir de las perforaciones inclinométricas y observaciones visuales de la corona y pie del talud. La línea roja indica la probable superficie de despegue del deslizamiento profundo.

## Impacto a la cañería y medidas correctivas

Los efectos más importantes sobre la cañería que produjeron estos procesos de remoción en masa pueden resumirse en:

1. Aumento en la deformación o eventual rotura de la cañería por deslizamiento de la parte profunda del talud.
2. Disminución de ancho de pista por desmoronamiento y deslizamiento del material de relleno, pudiendo quedar la cañería expuesta y/o colgada, con eventual rotura.
3. Desprendimientos de bloques de la parte superior del talud que impactan en la pista con implicancias a los recursos humanos que habitualmente inspeccionan la zona y/o transeúntes ocasionales de los poblados aledaños.

Estos eventos aceleran su acción durante la temporada de lluvias, propiciados por el movimiento del agua lubricando las fracturas y aumentando la infiltración, con el consecuente incremento de la presión entre las diaclasas.

Las medidas mitigatorias y correctivas tomadas a lo largo del tiempo fueron, en una primera etapa:

1. Disminución de esfuerzos acumulados de la cañería a través de procesos de liberación de tensiones, donde básicamente se delimitaba un sector de la cañería y se la excavaba de tal forma que, cuando quede sin restricción del suelo, puede acomodarse por ella misma a una situación de mayor equilibrio.
2. Complementariamente a la cañería del tramo excavado, se le colocaban *strain-gauges* para medir su deformación y se instalaban puntos de medición de movimientos relativos del caño respecto al talud a través de cámaras de medición.

En una segunda etapa, y como medida correctiva permanente, se decidió cambiar la traza de forma definitiva por medio de la ejecución de un túnel.

## Túnel Mal Paso

Las evaluaciones realizadas demostraron que las magnitudes y velocidades de movimiento del talud se incrementaban de forma significativa conforme avanzaba el tiempo. Esto obligó a tomar la decisión de replantear una nueva "ruta" para el pasaje de la línea. Se tomaron en cuenta las siguientes alternativas:

- a) Apertura de una nueva zanja por la parte superior del talud.
- b) Cruce dirigido por el interior del macizo.
- c) Ejecución de una labor subterránea, Túnel.

La primera alternativa no ofrecía todas las medidas de seguridad para su ejecución, además de una posibilidad concreta de caer en un problema similar a la traza original; la segunda propuesta alertaba de posibles complicaciones con la perforadora debido a factibles atascamientos y rotura de la herramienta perforadora por la calidad de roca fracturada que ofrecía el terreno. Finalmente, se optó por la última opción, debido a las ventajas técnicas, operativas y económicas que ofrecía la misma.

## Diseño y ejecución

En el diseño del túnel [4] se consideraron mayormente los aspectos geométricos y geológicos que posibilitaran la viabilidad y correcta colocación de la cañería en el interior del macizo, como así también su estadía permanente y segura en el interior del mismo. Además, se tuvo en cuenta que la forma de la traza y la pendiente del túnel brindaran una razonable facilidad al acceso a las instalaciones de forma rápida y segura durante los futuros planes de mantenimiento que tendrían las mismas, o ante una eventual contingencia.

Tomando en cuenta estas consideraciones, el túnel fue proyectado con las siguientes características y elementos, según puede verse en la tabla 2.

En relación al diseño de los portales norte y sur, fueron consideradas particularmente dos variables, entre ellas la accesibilidad para el comienzo de las voladuras y el posterior ensamblaje de la cañería una vez terminado el túnel. Es así que en el portal norte el sitio elegido para la emboadura fue sobre un paredón subvertical de cuarcita con escaso material de derrubio, lo cual facilitaba rápidamente la entrada al macizo. En el sur se optó por un sector que permitiera un ensamblaje propicio de la cañería. El lugar elegido fue unos afloramientos de filita cubiertos con una moderada capa de material coluvial; se detectó además una falla subvertical en la superficie rocosa filítica, perpendicular a la antigua traza del gasoducto.

Para iniciar la ejecución del túnel fue necesario un análisis geotécnico previo en el frente de ambos portales. De allí que se analizaron los conjuntos de diaclasas, su distribución, ángulos entre las mismas, relleno y persistencia, junto con el grado de meteorización que presentaban ambas rocas. Se decidió la construcción de dos estructuras a modo de falsos túneles para proteger al personal y los bienes ante la posibilidad de caídas de rocas o desmoronamientos desde la parte alta de los taludes, ya sea por las intensas lluvias que habitualmente afectan el sector como

### Diseño del túnel

Características técnicas	Dimensiones
Boca de entrada y salida (portales norte y sur)	15 m aprox. c/uno
Traza del túnel (curvilínea)	1.000 metros de radio de curvatura
Longitud total	744 m
Pendiente/Desnivel	6,72% / 50 m

### Forma y tamaño de la sección transversal

Forma de la sección	U invertida
Arco radial	r: 1,25 m (bóveda)
Longitud vertical de hastiales	h: 1,25 m
Altura máxima	H: 2,50 m
Ancho máximo	A: 2,50 m
Área de la sección	S: 5,58 m <sup>2</sup>
Volumen estimado de excavación	4.150 m <sup>3</sup>

### Método de excavación

#### Perforación y voladura convencional (manual)

#### Elementos de sostenimiento y refuerzo

Pernos de anclaje cementados	Tipo helicoidal Ø22 mm, long. 1,5-2,1 m
Cimbras metálicas	Tipo ligeras, perfil IPN 140 mm 14,4 kg/m
Shotcrete (hormigón lanzado)	90% recubierto, 21-25 MP, espesor: 2,5 a 14 cm
Mallas electrosoldadas	
Hormigón armado	
Micropilotes	
Arcos y placas de acero corrugado	

Tabla 2. Elementos de diseño del Túnel Mal Paso.

por los efectos de las primeras voladuras para comenzar el ingreso al macizo.

El proyecto incluyó una importante sección referida a la metodología de excavación, requiriendo un registro geomecánico permanente del frente de voladura. Este registro permitió definir la estabilidad del frente, tiempo que podía permanecer abierto sin sostenimiento, qué tipo de soporte

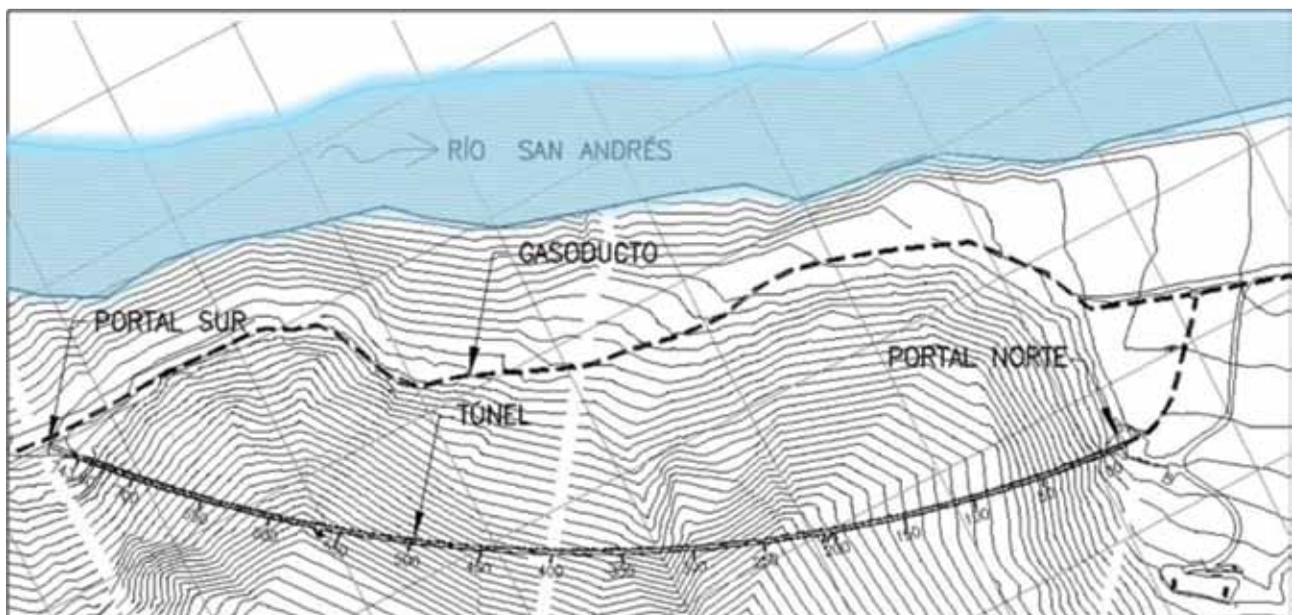


Figura 6. Localización de la traza curvilínea del proyecto, donde se observa la ubicación de los portales norte y sur. En línea punteada, la antigua traza del gasoducto.

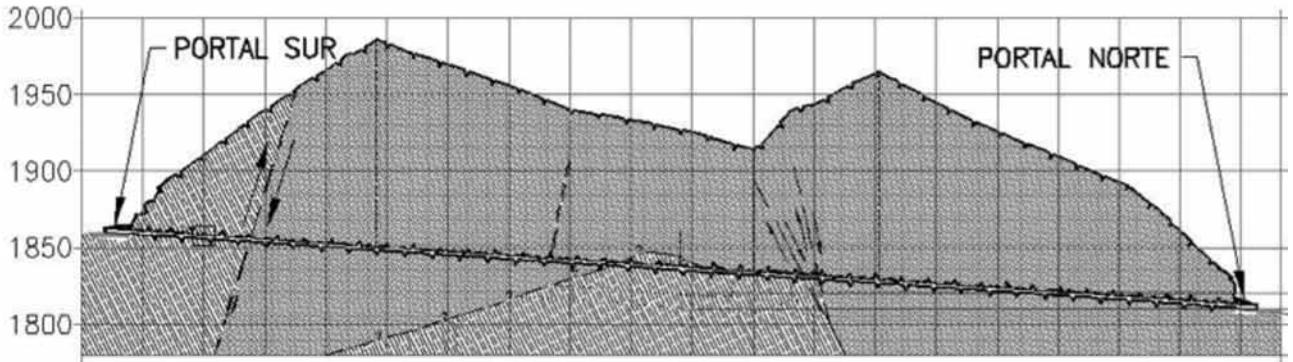


Figura 7. Sección longitudinal donde se observa la pendiente promedio de 6,7%.

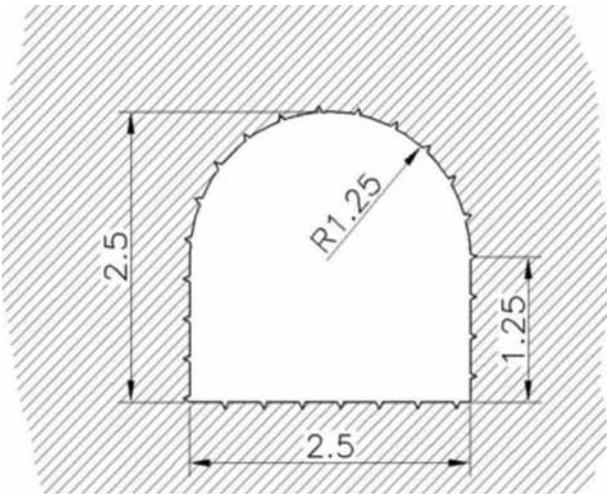


Figura 8. Sección transversal del túnel mostrando su geometría.

Las figuras 8 y 9 muestran una sección transversal del túnel, y la posición de este último por debajo del plano de deslizamiento potencial.

### Aspectos constructivos

Dada la pequeña sección transversal (2,5 x 2,5 m), el túnel fue excavado mediante perforación manual y voladura convencional. Debido a que el tiempo de ejecución era un factor importante en el cronograma del contratista,

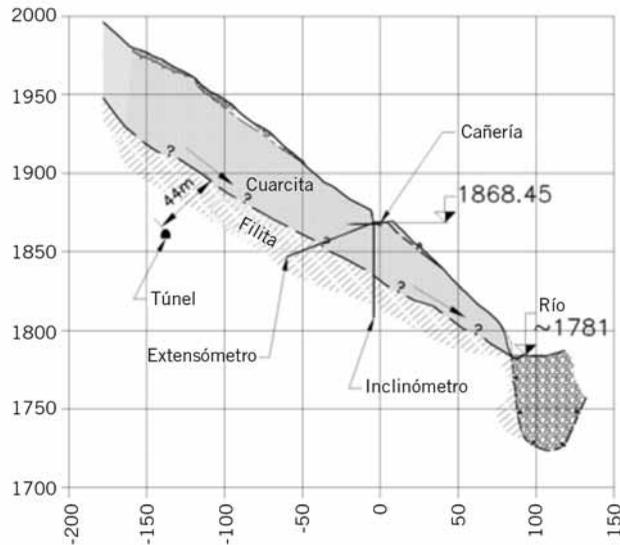


Figura 9. Localización del túnel por debajo del plano de deslizamiento inferido. También se ubican las dos perforaciones donde se ubicaron los inclinómetros y extensómetros.

debería aplicarse y qué plan de voladura se establecería según la calidad de roca que se presentaba.

Las figuras 6 y 7 muestran el diseño de la traza general del túnel con respecto al tendido original del gasoducto, y la sección longitudinal donde se observa la pendiente promedio de proyecto.



Figura 10. Armado del falso túnel del portal norte.



Figura 11. Operarios realizando los primeros taladros de arranque sobre la malla de perforación confeccionada sobre el frente de voladura.



Figura 12. Frente de voladura realizado, donde se observa el material triturado en el piso.



Figura 13. Operario colocando shotcrete en zonas inestables.

se decidió excavar el túnel desde ambos extremos mediante dos frentes de ataque. De esta forma, se tardó 7,5 meses para unir ambos frentes. La secuencia de avance en los trabajos fue:

- a) Construcción de los falsos túneles (figura 10) [6].
- b) Perforación manual, voladura convencional, saneo, extracción del material y sostenimiento del túnel (figuras 11,12 y 13).

### Instalación de tubería y cambio de traza

Una vez finalizado el túnel, el siguiente paso fue colocar el nuevo tramo de gasoducto en el interior de la excavación. Para ello, se analizaron diferentes escenarios donde se tuvo en cuenta: la pendiente del túnel, los espacios disponibles para el montaje de la cañería, los aspectos tensionales de la misma durante la colocación, la integridad del revestimiento y de las uniones soldadas, entre otros. El

resultado del análisis permitió concluir que la condición más propicia para la colocación de la cañería debía ser desde el portal norte hacia el portal sur. De esta manera, se montó un operativo con el objetivo de llevar a cabo tal procedimiento.

Antes del procedimiento, se debía acondicionar el túnel con lo que serían los elementos de traslado, sujeción y apoyo permanente de la cañería. De esta forma, se montaron soportes con rodillos de acero con base hormigonada cada 10 m en toda la longitud del túnel (ver figura 14). La soportería fue colocada hacia el lateral occidental del túnel con el fin de tener un espacio adicional en el mismo ante un eventual movimiento natural hacia el río por parte del talud, por ejemplo la ocurrencia de un sismo.

El procedimiento de ensamblaje y colocación de la tubería básicamente consistió en el armado de cuatro columnas de más de 200 m de longitud que fueron, una a una, introducidas desde el portal norte hacia el sur, traccionadas desde este último por un equipo propicio para la tarea (figuras 15 y 16). Durante la tracción, la cañería fue desplazada a través de los rodillos que, a su vez, le sirvieron de apoyo; toda la columna completa fue colocada por flexión natural adoptando la forma curvilínea de la excavación (figura 17). Cabe destacar que el radio de curvatura del túnel fue calculado sobre la base de los límites naturales de la



Figura 14. Soporte completo con base de hormigón (BH) y rodillo de acero amurado (RA).

flexión de la cañería con el objeto de evitar tensiones residuales que puedan perjudicar a la misma.

Una vez colocada la columna, se procedió a la conexión de la misma a la línea. Para ello, se acondicionaron los sectores adyacentes a los portales (figuras 18 y 19). El objetivo



Figura 15. Preparación de las columnas de tuberías para su posterior colocación.



Figura 16. Inicio de la colocación del encolumnado por el portal norte.



Figura 17. Tubería ya colocada en su posición final en interior del túnel, vista desde el portal sur. Obsérvese la curvatura final de la misma por flexión natural en el fondo de la fotografía.

principal fue que la tubería, tanto en el portal norte como sur, debía salir enterrada desde el interior del túnel (figura 20). Una vez logrado ello, se realizaron los últimos controles y se taparon las excavaciones de conexión, con lo cual finalizó el proyecto (figura 21).

## Control y monitoreo

Se ha desarrollado un programa de control y monitoreo que incluye, no solo la integridad estructural del túnel, sino también las instalaciones asociadas (soportes y cañería en servicio).

En el caso particular del túnel, si bien la ausencia general de grietas en el shotcrete evidencia una manifiesta estabilidad, es importante conocer cualquier tendencia o cambio en la deformación de la excavación. Algunos factores asociados a ello guardan relación con cambios en la presión hidrostática en las adyacencias de la misma, por infiltración de aguas estacionales, por reajuste tensional del macizo a las nuevas condiciones de equilibrio, o incluso por la ocasional pérdida de capacidad de soporte que puedan sufrir algunos de los elementos de sostenimiento.



Figura 19. Ensamblado de la cañería a la línea en el portal sur.



Figura 18. Ensamblado de la cañería a la línea en el portal norte.

Para controlar las manifestaciones que puedan causar estos factores, se ha dispuesto básicamente de dos tipos de controles:

1. Inspecciones mensuales de carácter visual: Relevamiento del estado del shotcrete (fisuras, crecimiento de las mismas, descascaramientos, infiltraciones) y estado de los elementos de sostenimiento (cimbras, pernos de anclaje).
2. Medición microgeodésica: Se colocaron 7 puntos espaciados equidimensionalmente cada 100 m. El objetivo de ello es registrar en el tiempo los desplazamientos de más de 3 cm que pudieran experimentar dichos puntos. Este tipo de mediciones es de carácter anual bajo condiciones normales. En caso de aceleración de movimientos se preverá otro tipo de programación.
3. Con respecto a las instalaciones de gas, se realiza conjuntamente con la inspección del túnel, se detectan pérdidas, estado de los soportes, estado del revestimiento del ducto y control de alimañas.

## Consideraciones finales

- Desde la construcción del Gasoducto Nor Andino, la Cuesta de Mal Paso ha sido uno de los puntos de mayor riesgo geotécnico para el tendido de la línea.



Figura 20. Tapada final y enterramiento de la cañería a la salida del portal sur.



Figura 21. Disposición final de la cañería y finalización del proyecto con el terminado de la fachada del portal sur con sus puertas de seguridad.

- Las investigaciones y análisis geológicos-geoestructurales, complementariamente con los resultados brindados por el instrumental de medición, demostraron a lo largo de una década que el macizo manifestaba una significativa inestabilidad con un riesgo de alto potencial de rotura para la cañería.
- Simultáneamente, diferentes tipos de obras de mitigación y control fueron realizadas; sin embargo, la necesidad de un cambio de traza como una medida de remediación definitiva fue necesaria.
- Entre las alternativas analizadas se determinó que la solución más propicia era la construcción de un túnel.
- Un ambicioso proyecto fue puesto en marcha, conocido como Túnel Mal Paso.
- El mismo fue realizado según lo proyectado y programado con cero accidentes a las personas y bienes.

- En la actualidad, el túnel está prestando pleno servicio con un plan de control y monitoreo programado.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Nor Andino S.A. por la confianza depositada en la elaboración de este trabajo.

### Referencias

- [1] Bustinza, Juan (2005). "Cuesta de Mal Paso - Análisis geológico y geotécnico - Auscultación de deformaciones - Condiciones de estabilidad" (Informe Técnico). Red Ingeniería S.R.L.
- [2] Carnicero, Martín y Hryciuk, Pedro (2009). Gasoducto Nor Andino. Evaluación de Integridad del Gasoducto en el Macizo de Mal Paso (Informe Técnico n° O1T-501-IXIF-08E2101, 39 p). Buenos Aires. TGN.
- [3] Canosa, Darío (2013). Medición geodésica-Red de puntos de control del Gasoducto Nor Andino, progresiva 87-112 (Informe Técnico, 76 p). Buenos Aires.
- [4] Bustinza, Juan (2010). "Cuesta de Mal Paso - Descripción del Proyecto Básico (Informe Técnico) Red Ingeniería S.R.L.
- [5] Ponce, José Manuel y López, Daniel (2012). Identificación, control y mitigación de movimientos de remoción en masa sobre el tramo 501 de la línea de gasoducto Pichanal-Paso de Jama en el noroeste argentino. Primer Encuentro de Geología y Geotecnia para Ductos, Lima, Perú.
- [6] Bustinza, Juan (2013). Cuesta de Mal Paso - Túnel - Informe final de construcción. TecnoRed Ingeniería S.R.L. Rocca, Ricardo., Zeballos, Marcelo., Terzariol, Roberto. (2011). Mal Paso - Túnel - Determinación de tensiones y deformaciones en la excavación, Red Ingeniería S.R.L. (No mencionado en el texto). ■