

UTILIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL CONTROL DE FRACTURAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PRESIONES OPERATIVAS

Autores: Ing. Fernando Carlos Silva
Ing. Pedro Martín Hryciuk
Empresa: Transportadora de Gas del Norte S.A.
Buenos Aires, Argentina

ABSTRACT

En este artículo se describen sucintamente los mecanismos de iniciación y propagación de fracturas en cañerías y se muestra un método de adecuación de presiones operativas que permite efectuar reparaciones programadas o de emergencia en forma segura para los operadores y público en general.

INTRODUCCIÓN

La fractura en servicio de una cañería se puede iniciar a partir de defectos existentes. En un recipiente sometido a presión interna, la orientación más crítica del defecto es la axial, ya que el campo de tensiones máximas es normal al eje del mismo. En una cañería, dichas tensiones son las circunferenciales debidas a la presión interna, y son generalmente 2 a 3 veces mayores que las tensiones longitudinales, dependiendo si la cañería está restringida o no de moverse axialmente.

Los estudios experimentales de presurización sobre defectos no pasantes orientados axialmente, indican tres pasos en el proceso de falla. El primer paso es el *abultamiento* gradual del defecto, causado por el incremento de la presión interna. El segundo paso, llamado *crecimiento estable del defecto*, ocurre a medida que el incremento de presión continúa. Si la presurización se detiene durante este período, dicho crecimiento se detiene. Si la presurización continúa se conduce al tercer paso, llamado *crecimiento inestable del defecto*. Este puede llevar a una rápida penetración del espesor de la cañería y con ello a una pérdida o rotura.

Esto nos lleva a la conclusión que si se detecta un defecto en un sistema y se quiere evitar producir una pérdida o rotura, el nivel de presión no debería superar los niveles de presión de la primera etapa.

Dentro del proceso de fractura, por lo tanto, podemos reconocer dos etapas diferentes:

- La iniciación de la fractura
- La propagación de la fractura

Los ensayos demostraron que la tenacidad a la “iniciación de la fractura” depende del tipo de acero utilizado y de la temperatura a la cual es sometido. El valor de tenacidad se refiere a la resistencia del material al crecimiento *inicial*, tanto estable como inestable, de un defecto. Mientras que, para el primer caso, dicha resistencia se relaciona con la resistencia al impacto del acero, la segunda se relaciona con la temperatura a la cual se produce la fragilización de la rotura. Por lo tanto, la primera característica se puede medir en laboratorio a través de un ensayo de Charpy a una dada temperatura, en tanto el segundo se puede medir realizando ensayos de Charpy a temperaturas decrecientes.

La resistencia que presenta el material a la “propagación de la fractura” se relaciona con la energía requerida para crear nuevas superficies de fractura. Por lo tanto la velocidad con que se propaga una fractura es función de la tenacidad del material, de la geometría de la cañería, del fluido transportado, y de la temperatura y presión de operación. Este valor de tenacidad del material también se relaciona con su resistencia al impacto y por lo tanto se puede determinar partiendo del ensayo de Charpy.

De lo anterior surge que una adecuada resistencia al impacto de la cañería jugará un papel preponderante en el caso de producirse una fractura. También surge que dicho valor será tanto más crítico cuanto menor sea la temperatura a la cual deba operar el sistema.

Durante la descompresión generada por la propagación de una grieta, se genera en el interior de la cañería una onda continua de descompresión, que se mueve hacia ambos lados de la fractura con una velocidad única de traslación igual a la velocidad del sonido en el fluido, y que depende de la presión o tensión circunferencial inicial. Por otro lado, la velocidad con que se propaga la grieta, es independiente de la velocidad de la onda de descompresión, y depende de la presión en la punta de la grieta (función de la composición del gas, su presión y temperatura inicial, y de la velocidad de la fractura).

Si la velocidad de la onda de descompresión del gas es mayor que la velocidad de propagación de la grieta, la presión o tensión en la punta de la grieta decaerá a tal punto que la velocidad de la fractura tenderá a cero y se detendrá la propagación de la fractura.

Eventualmente, habrá por lo menos un valor de presión tal que la velocidad en la punta de la grieta y la velocidad de la onda de descompresión sean iguales. Si este estado se mantiene, la presión en la punta de la grieta no cambiará, y la fisura se propagará indefinidamente.

De lo dicho podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Si comparamos la velocidad de propagación de una onda de presión en el gas natural (velocidad del sonido), siendo la misma del orden de los 340 m/s, con la velocidad de propagación de una onda en el agua que es del orden de los 1000 m/s, comprobaremos que mientras las roturas en las cañerías que transportan líquidos tienden a longitudes de pocos diámetros de cañería, en las cañerías que transportan gas las mismas tienden a ser considerables.
- La liberación de energía -y por lo tanto el daño potencial- será mucho mayor para fluidos compresibles que para fluidos incompresibles.

De lo anterior concluimos que las pruebas de resistencia previas a la operación, siempre que fuere posible, son mucho más seguras si son pruebas hidráulicas.

Finalmente, teniendo en cuenta que detectado un determinado nivel de falla en la cañería es necesario intervenir sobre la misma a fin de eliminarla o repararla, o bien continuar operando con seguridad, surge la necesidad de acondicionar el sistema a fin de lograr dichos objetivos. Para ello es necesario mantener un estado tensional de la cañería lo más alto posible y compatible con la intervención a realizar.

Para una cañería enterrada que no haya perdido sustentación respecto al piso la única variable que el operador puede ajustar, a fin de variar el estado tensional de la misma es la presión de operación.

Por lo tanto el operador necesita un procedimiento claro y preciso respecto a las condiciones de presiones operativas para realizar los trabajos que se requieran con motivo de una emergencia o de una reparación.

A fin de establecer los criterios en que se basarán las presiones operativas una respuesta adecuada puede encontrarse en la resistencia de materiales y la tecnología de control de fracturas.

Diagrama correspondiente a Trabajos Especiales

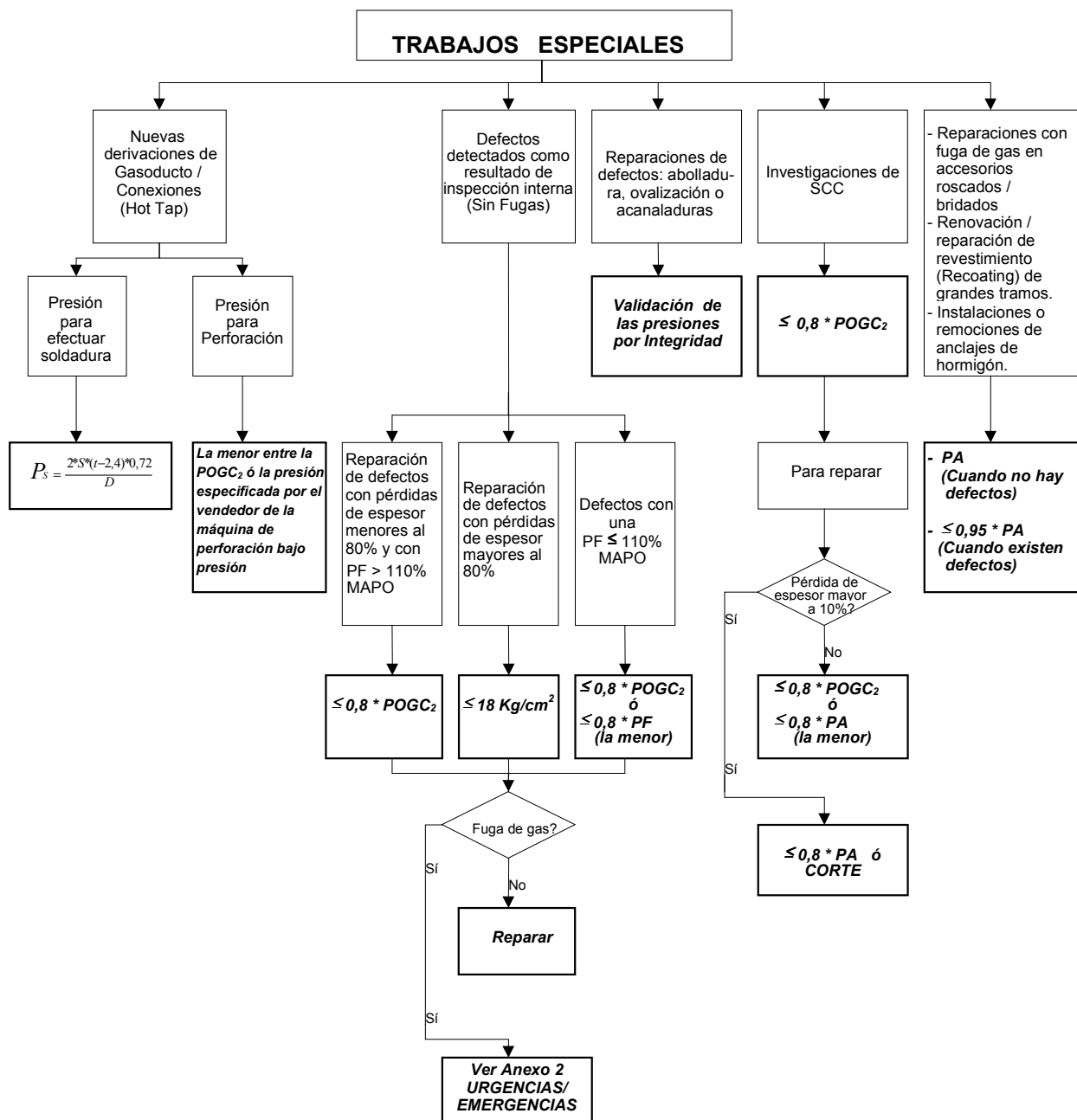


FIGURA 1

Diagrama correspondiente a Urgencias / Emergencias

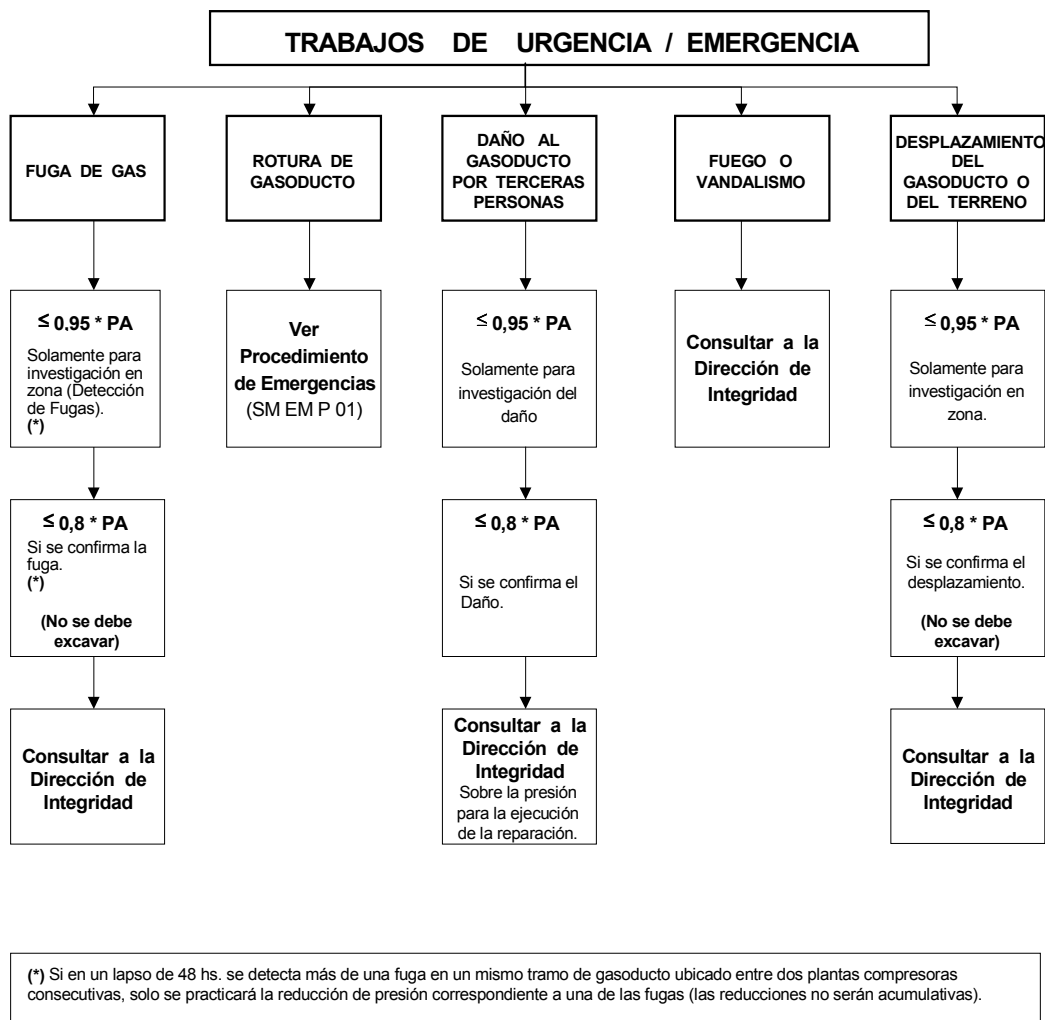


FIGURA 2.

Las figuras 1 y 2 muestran los diagramas de flujo correspondientes a la toma de decisiones para establecer las presiones operativas a establecer para trabajos especiales y trabajos de urgencia / emergencia.

Como se puede apreciar en el diagrama correspondiente a trabajos especiales, la reparación de defectos y la investigación de Stress Corrosion Cracking requieren para su realización un acondicionamiento de presiones que varía desde 18 Kg/cm² hasta la máxima presión de operación que se hubiere registrado en los últimos dos meses por lo menos durante cuatro horas (POGC₂).

En el diagrama correspondiente a Urgencias / Emergencias vemos que los acontecimientos tales como fuga de gas, daño al gasoducto por terceras personas y desplazamiento del gasoducto o del terreno requieren acondicionamientos que varían entre el 95% y el 80% de la presión existente al momento de producirse el evento para la investigación y luego de confirmado el mismo. Dada la gravedad de estos incidentes, cualquier acción o trabajo a posteriori a fin de efectuar la reparación requiere un asesoramiento particular para cada uno de estos casos.

En lo que sigue expondremos la base racional que sustenta la adopción de estas acciones, relacionándolas con el tipo de falla o fractura que se espera encontrar.

DESARROLLO

Dentro de las posibles fallas que se pueden producir en una cañería enterrada podemos considerar dos grupos bien definidos de acuerdo al tipo de rotura que se produce:

- a) Roturas que dependen de la tensión de flujo del material de la cañería.
- b) Roturas que dependen de la tenacidad del material de la cañería.

Para el primer tipo de rotura podemos relacionar la tensión de falla con la tensión de flujo del material de la siguiente forma: (Ver apéndice de nomenclaturas)

$$\sigma_h = \bar{\sigma} \left(\frac{A_0 - A}{A_0 - \frac{A}{M_T}} \right)$$

Para un perfil de defecto rectangular la anterior puede escribirse:

$$\sigma_h = \bar{\sigma} \left(\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t \cdot M_T}} \right)$$

y para un defecto pasante (100% de pérdida de espesor) resulta:

$$\sigma_h = \frac{\bar{\sigma}}{M_T}$$

Ésta puede relacionarse con la presión de falla mediante:

$$\sigma_h = \frac{p_h \cdot D}{2 \cdot t}$$

siendo además:

$$M_T = \left[1 + 1,255 \cdot \frac{c^2}{\left(\frac{D}{2} \cdot t \right)} - 0,0135 \cdot \frac{c^4}{\left(\frac{D}{2} \cdot t \right)^2} \right]^{0,5}$$

Para aquellas fallas en que el material se comporta como dependiente de la tenacidad, la relación entre el factor de intensificación de tensiones del estado plano y la tensión de rotura viene dada por:

- Para el caso de defectos no pasantes:

$$K_c^2 = \frac{8}{\pi} \cdot c_{eq} \cdot \bar{\sigma}^2 \cdot \ln \sec \left[\frac{\pi \cdot M_P \cdot \sigma_h}{2 \cdot \bar{\sigma}} \right]$$

Donde el factor de intensificación de tensiones puede relacionarse con la tenacidad del material, determinada por el ensayo de Charpy mediante la siguiente expresión:

$$K_c^2 = \frac{E \cdot C_v}{A_C}$$

Siendo:

$$M_P = \frac{1 - \frac{d}{t \cdot M_T}}{1 - \frac{d}{t}}$$

La longitud de fisura equivalente c_{eq} es para una fisura rectangular igual a la mitad de la fisura medida en la superficie del metal ($c_{eq}=c$).

- Para el caso de un defecto pasante (100% de pérdida de espesor) resulta:

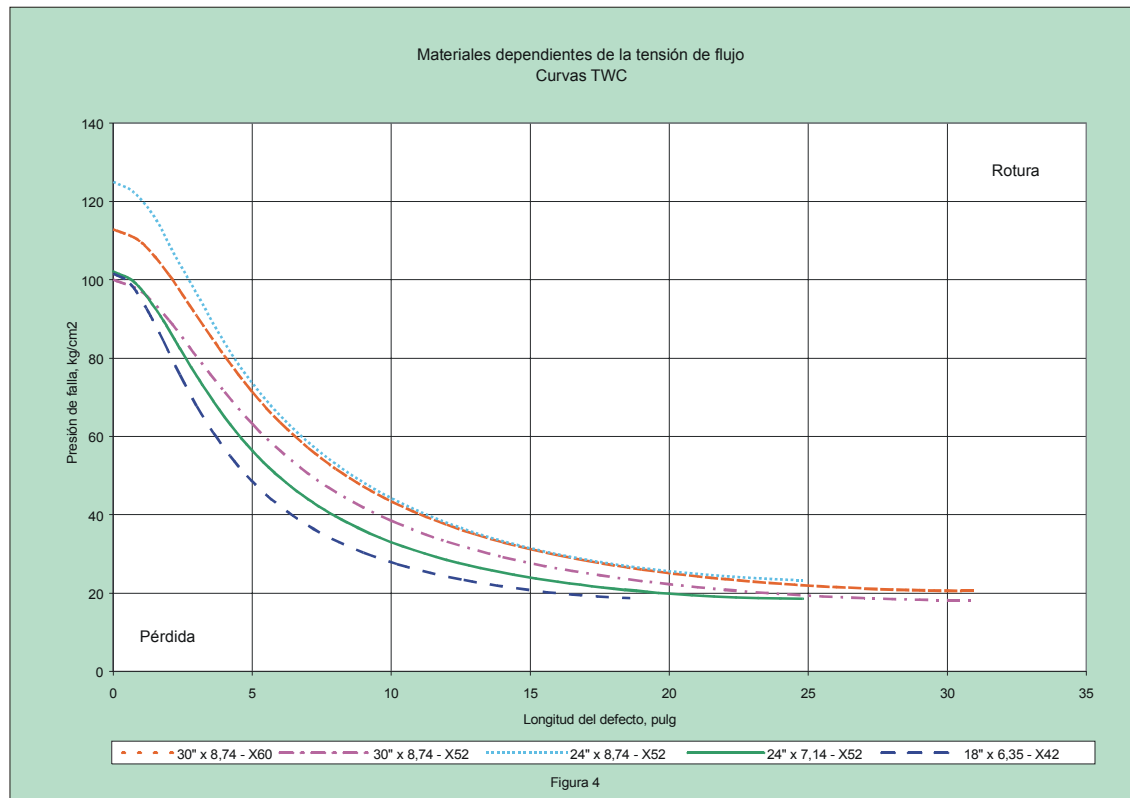
$$K_c^2 = \frac{8}{\pi} \cdot c \cdot \bar{\sigma}^2 \cdot \ln \sec \left[\frac{\pi \cdot M_T \cdot \sigma_h}{2 \cdot \bar{\sigma}} \right]$$

Si identificamos los diferentes tipos de cañerías que componen un sistema de transporte podemos graficar para ambos casos las curvas de presión de falla para defectos pasantes (tensión de flujo dependientes y los dependientes de la tenacidad).

Criticidad	Características	Longitud Km	TWC Presión kg/cm2	TWC Presión kg/cm2	TWC Presión kg/cm2	TWC Presión kg/cm2	TWC Presión kg/cm2	TWC Presión kg/cm2
3	30" x 8,74 - X52	577,40	99,9945876	97,0887181	89,7022249	80,4598745	71,3429803	63,2434690
4	18" x 6,35 - X42	135,57	101,5545042	99,0986297	92,6886072	84,3349596	75,7432884	67,8312497
5	24" x 7,14 - X52	1153,01	102,1111779	99,2026754	91,7865163	82,4634419	73,2235620	64,9822356
8	30" x 8,74 - X60	957,90	112,8971151	109,6162946	101,2767055	90,8417937	80,5485261	71,4039166
13	24" x 8,74 - X52	491,00	124,9932345	122,0617393	114,3796387	104,3049602	93,8740170	84,2114458

Figura 3

En la figura 3 se pueden observar los diferentes diámetros, espesores y tipo de material, que componen un sistema de gasoductos de transporte.



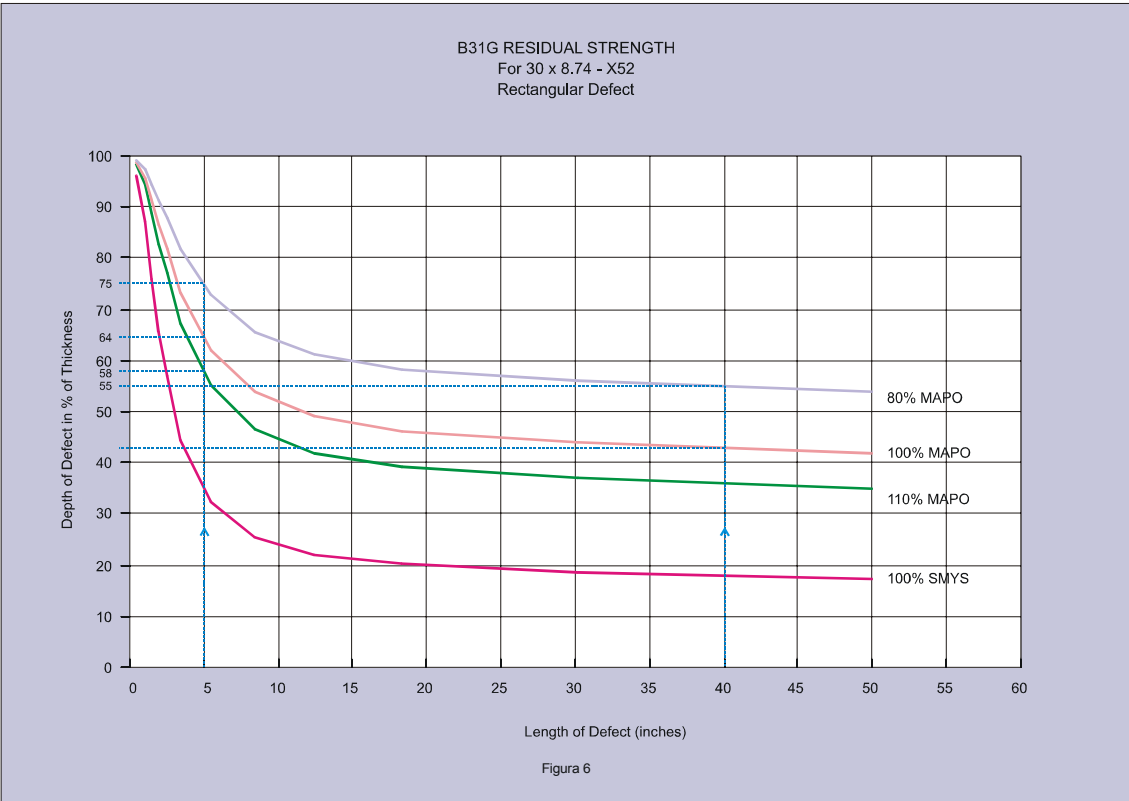
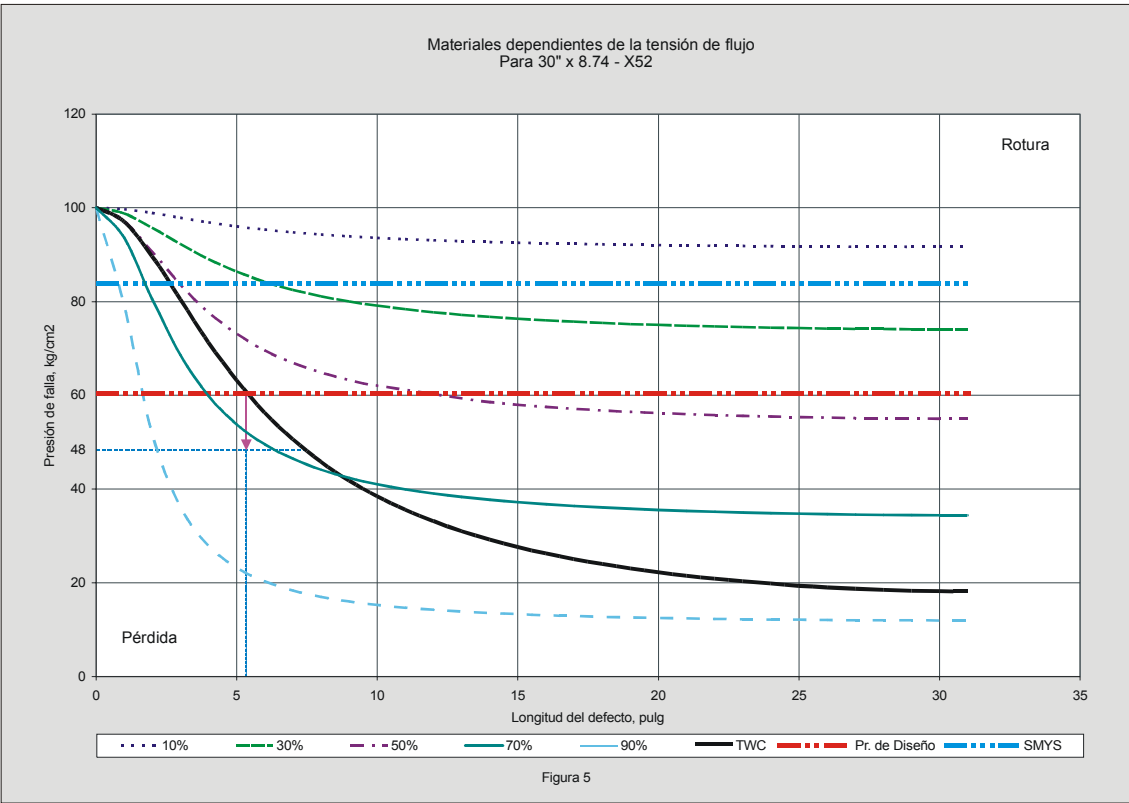
En la figura 4 se han graficado las curvas correspondientes a presión de falla versus longitud del defecto, para defectos pasantes en fallas dependientes de la tensión de flujo, para todos los materiales indicados en la figura 3. Las curvas de defectos pasantes separan dos zonas que permiten predecir el comportamiento del defecto en esta condición:

- En la zona superior la falla producirá una rotura del gasoducto.
- En la zona inferior la falla producirá simplemente una fuga sin rotura.

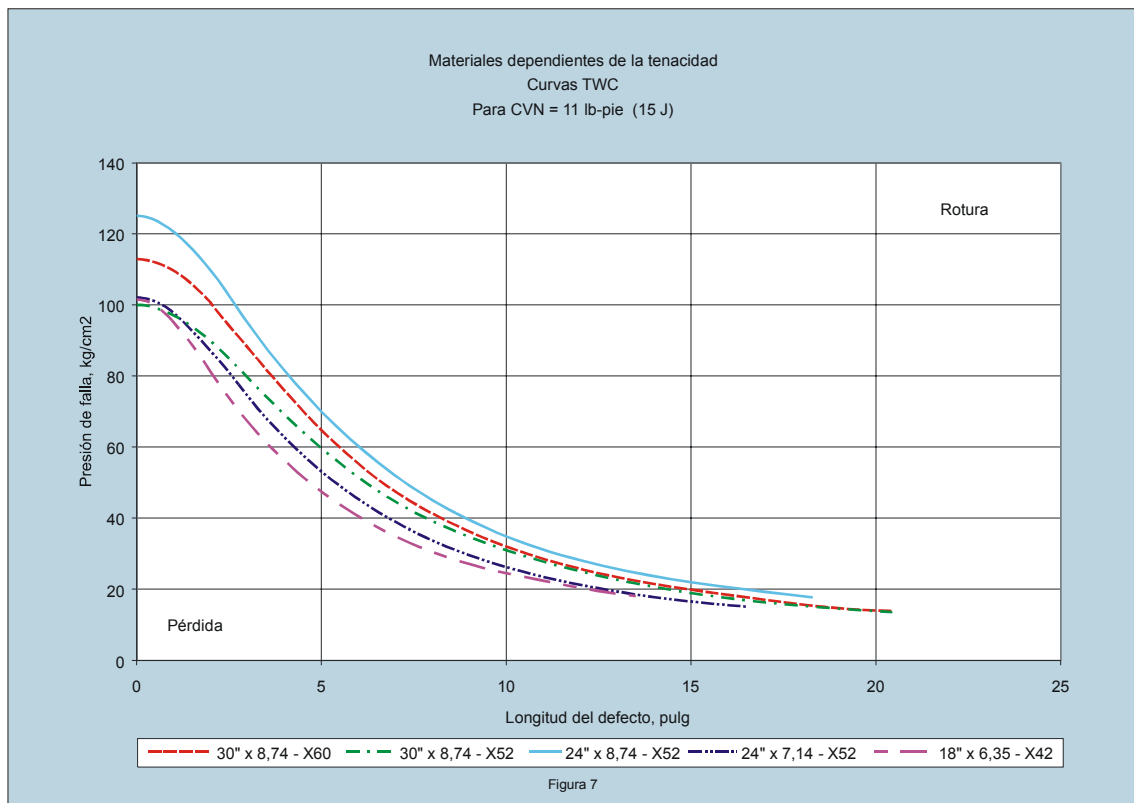
En la figura 5 se ha graficado un caño típico del sistema que además coincide con las cañerías de menor presión de falla dentro del grupo indicado en la figura 3. Allí pueden apreciarse las diferentes presiones de falla para defectos pasantes y no pasantes con diferentes porcentajes de pérdida de espesor.

En la figura 6 podemos observar los porcentajes de profundidad crítica en función de la longitud del defecto para los distintos niveles de presión a la cual opera la cañería

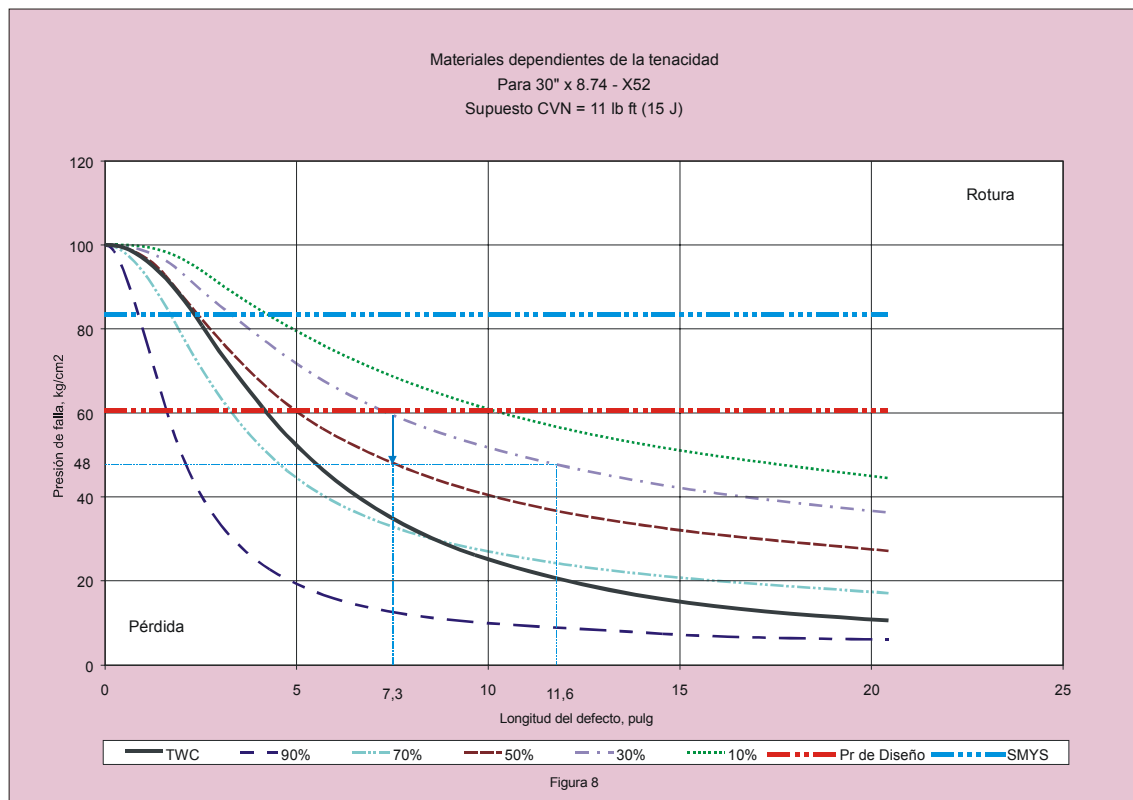
respecto de la MAPO. Esta figura nuevamente se ha construido para el mismo caño que el de la figura 5.



En la figura 7 se ha graficado las curvas para defectos pasantes, pero para materiales dependientes de la tenacidad.



En la figura 8 se ha graficado la presión de falla correspondiente a defectos pasantes y no pasantes para la cañería más comprometida del sistema.



El valor de tenacidad adoptado corresponde a los valores medios de los materiales que componen el sistema y ensayados mediante el ensayo de Charpy. Para este sistema en particular dicho valor corresponde a una energía superior de 15 Joules.

Estos gráficos nos permiten establecer una base racional para determinar las reducciones de presión a realizar para cada trabajo.

Comenzaremos analizando el diagrama correspondiente a trabajos especiales (Figura 1), y en primer lugar la columna correspondiente a defectos detectados como resultado de inspección interna, sin fugas.

Siendo estos defectos debidos a corrosión interna o externa el tipo de falla al que darán lugar será el correspondiente a fallas dependientes de la tensión de flujo.

Se pueden presentar tres casos:

a) El defecto tiene una pérdida de espesor superior al 80% del espesor nominal.

Estos defectos son del tipo severo y con una gran incerteza, cuando son resultado de una inspección interna, pues los actuales medios de inspección reportan como 80% aquellos defectos que están entre 80 y 100% de pérdida de espesor. Si bien previamente a la reparación se procederá a una detección de fugas, aún en caso de ser la misma negativa será conveniente tomar la hipótesis conservativa de asimilar estos defectos a defectos pasantes. Por lo tanto será conveniente acondicionar el conducto de forma tal que para una longitud del defecto tendiendo a infinito, no se produzca rotura sino simplemente una pérdida.

Como se puede ver en la figura 4 para un nivel de presión menor a 18 Kg/cm^2 , la longitud de la falla tiende a infinito para cualquier cañería del sistema. Por lo tanto estableciendo este nivel de presión para cualquiera de los gasoductos del sistema, la reparación de defectos con profundidades mayores al 80% se hará en forma segura para los operadores.

b) El defecto tiene una presión de falla menor o igual al 110% de la MAPO.

El tratamiento correspondiente a este tipo de defectos consiste en practicar una reducción de presión del 20 % de la presión de falla o bien un 20% de la POGC₂ la que fuere menor.

Aquí debe advertirse que la reducción lleva implícito un factor de seguridad de 1,25, pues el defecto ha resistido sin fallar una presión 125% superior a la presión de falla (utilizando el mismo concepto que para la prueba hidráulica) en los últimos dos meses.

Desde el punto de vista de la profundidad crítica y basándonos en la figura 6, podemos ver que para un defecto con longitud de falla moderada, por ejemplo 5" (12,7 mm), la reducción del 20% en la presión de operación, da lugar a que la profundidad crítica, es decir la profundidad para la cual se alcanza la presión de falla, aumenta de 64 a 75%. Esto significa un incremento del 11%, lo cual es mayor que el error de la medición esperada en una inspección interna realizada con un scraper inteligente de última generación. En caso de un defecto de mayor longitud el incremento es ligeramente mayor. Esto implica también una condición segura, pues los defectos cortos tienden a comportarse como pérdidas, ya que la rotura se produce a presiones de falla mayores. En cambio, los defectos largos rompen a presiones menores y por lo tanto son potencialmente más peligrosos.

c) El defecto tiene una presión de falla mayor que el 110% de la MAPO y una profundidad menor al 80%.

Este tipo de defecto se repara de acuerdo a un plan de reparación programado que usualmente está dentro de los ciento veinte días de recibido el informe definitivo, es decir aproximadamente ciento ochenta días después de realizada la inspección interna. Mientras se implementa esta campaña, la corrosión puede seguir avanzando por lo cual en el momento de la reparación la profundidad puede ser mayor que la indicada inicialmente por la inspección interna.

Tomando la tasa de corrosión más desfavorable, que en el sistema en estudio es 0,32 mm/año, el aumento en la pérdida de espesor sería de 0,16 mm (0,006”).

Si suponemos tener un defecto con presión de falla 1,1 respecto de la MAPO, es decir que se encuentra justo en la frontera, y quisiéramos conservar el factor de seguridad de 1,25; deberíamos evitar que la pérdida de espesor por el avance de la corrosión no alcance el valor de presión de falla correspondiente a la MAPO, puesto que hemos practicado una reducción del 80% en la $POGC_2$ ($0,8 \text{ MAPO} \times 1,25 = \text{MAPO}$).

La profundidad crítica para una presión de falla de 1,1 de la MAPO para un defecto con una longitud de 5” resulta ser del 58% del espesor de la pared, en tanto que para la MAPO la profundidad crítica resulta 64% para la cañería típica en estudio. La diferencia resulta ser de 6% que corresponde a 0,52 mm, que es mucho mayor que la corrosión que podría ocurrir durante el tiempo que transcurra desde la detección hasta la reparación, es decir que la presión establecida resulta segura.

Para fallas emergentes de Stress Corrosion Cracking en cambio, el tipo de rotura a esperar es el correspondiente a fallas dependientes de la tenacidad del material.

Sin embargo de la figura 7 vuelve a ser claro que por debajo de 18 Kg/cm^2 el defecto puede crecer en forma infinita pero aún así no se producirá una rotura brusca.

Como la reparación de este tipo de defectos requiere una investigación previa a fin de determinar la profundidad de la falla, se practica una reducción del 20% de la $POGC_2$.

Los motivos son:

Operar durante la investigación como si se hubiera realizado una prueba hidráulica a una presión 125% mayor a la máxima registrada en los últimos dos meses, de modo de asegurarse la pasivación de la propagación del posible defecto existente.

Además basándonos en los estudios de fractomecánica, si observamos en la figura 8 una fisura de 7,3” (185 mm) de longitud con una profundidad de 30% del espesor de la cañería, operando a una presión cercana a la de diseño, el defecto estará próximo a fallar como rotura, pero al reducir la presión un 20% su longitud crítica aumentará en un 58,9%.

En caso que existan fisuras, se determinan sus dimensiones y se las elimina por amolado o se realiza un cambio de cañería. Si la grieta se extrae por amolado la resistencia remanente es nuevamente calculada pero considerando el comportamiento del material como dependiente de la tensión de flujo.

Respecto al diagrama correspondiente a Urgencias / Emergencias (figura 2) las reducciones para el caso de fugas de gas se basan en el siguiente razonamiento:

Por tratarse de eventos que implican la existencia de defectos pasantes, y por ser lo usual que estos defectos sean debidos a corrosión interna o externa, estas son fallas en que el material se comporta como dependiente de la tensión de flujo. Además se debe evitar el

activar las mismas, como ocurriría en caso de aumentar la presión respecto de la presión en el momento en que se detectó el problema (por ejemplo detección de fugas en defectos con más de 80% de espesor de falta de metal). Por lo tanto cuando se procede a realizar la detección de fugas una reducción del 5% en la presión en el momento de detectar el problema garantiza que no se activen los mecanismos de propagación de falla.

Cuando se confirma que existe una fuga (detección de gas positiva) la presión citada en el párrafo anterior se baja aún más (al 80%).

Si suponemos que la longitud del defecto que produce la fuga es tal que la presión de operación en ese momento es la MAPO (igual a la Presión de Diseño) y que coincide con la presión de falla (longitud del defecto aproximadamente 5,3" en la figura 5), la reducción de presión garantizará que no se produzca la rotura de la línea. En este caso cobra fundamental importancia la presión en el momento de producirse la fuga, en lugar de la presión de operación en un período determinado.

Nótese que la reducción de presión no tiene un efecto importante sobre la masa de gas que está fugando. Dado que el caudal teórico que desagua por un orificio perfecto viene dado por las ecuaciones de flujo isoentrópico para un gas perfecto por:

$$G^* = \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}}$$

donde G^* es el caudal másico de gas que está escapando a la atmósfera. De esta ecuación se deduce que una reducción en la P_0 del 20%, representa solo un ahorro del 20% del caudal que está fugando, y dado que las condiciones de mezcla explosiva no son directamente proporcionales a esta masa, concluimos que la reducción de presión solo tiene justificación por razones resistenciales.

El nuevo valor de presión que se establece es a los fines de no detener la línea y seguir transportando hasta el momento en que se puedan arbitrar los medios para la reparación. Para la reparación de fugas lo usual es ventear el tramo de cañería de forma de reparar sin la presencia de gas.

Este mismo razonamiento es válido para los acondicionamientos a efectuar en el caso de daños por terceras personas y desplazamiento de gasoductos.

Nomenclatura

σ_h	Tensión circunferencial nominal al nivel de falla, <i>en ksi o Mpa.</i>
$\bar{\sigma}$	Tensión de flujo del material, ($= \sigma_y + 10 \text{ ksi}$), <i>en ksi o Mpa.</i>
σ_y	Tensión de fluencia del materia, <i>en ksi o Mpa.</i>
A_o	Área transversal del defecto (a lo largo del eje de la cañería), <i>en pulg² o mm².</i>
A	Área transversal original del defecto (a lo largo del eje de la cañería), <i>en pulg² o mm².</i>
M_T	Factor de Folias.
M_P	Factor de Folias para defectos superficiales.
d	Profundidad del defecto, <i>en pulg o mm.</i>
P_h	Presión interna al nivel de falla, <i>en ksi o Mpa.</i>
D	Diámetro externo de la cañería, <i>en pulg o mm.</i>
t	Espesor de la cañería, <i>en pulg o mm.</i>
K_c	Factor de intensificación de tensiones, <i>en ksi · $\sqrt{\text{pulg}}$ o Mpa · $\sqrt{\text{mm}}$.</i>
c	Es la mitad de la longitud axial de un defecto axial pasante, <i>en pulg o mm.</i>
c_{eq}	Es la mitad de la longitud axial equivalente de un defecto axial no pasante, <i>en pulg o mm.</i>
E	Módulo elástico del acero, <i>en ksi o Mpa.</i>
C_v	Energía de la meseta superior en el ensayo Charpy con entalla en V, <i>en libras-pie o Joules.</i>
A_c	Área de fractura de la probeta en el ensayo Charpy con entalla en V.
G^*	Caudal másico en el orificio de fuga (garganta) a velocidad sónica.
k	Relación de calores específicos.
R	Constante universal de un gas ideal.
P_0	Presión de referencia (Presión interior).
T_0	Temperatura de referencia (Temperatura interior).
SMYS ó S	Tensión de fluencia mínima especificada.
TWC	Curva correspondiente a defectos pasantes.
MAPO	Máxima presión admisible de operación.
POGC ₂	Máxima presión operativa en el punto a intervenir, registrada dentro de un período de dos meses (60 días) anteriores a la fecha de inicio de los trabajos, la cual debe haber sido mantenida por lo menos durante cuatro horas consecutivas.
PF:	Es la presión estimada a la que se romperá una cañería con defectos. Este valor es calculado en base a los datos obtenidos de la Inspección interna (ILI) o a través de otros métodos.
PA:	Presión a la que se encontraba operando el gasoducto al momento en que se detecta el problema que origina la ejecución de un trabajo especial o de emergencia.
P_S :	Presión máxima a la que se puede realizar la soldadura.

Bibliografía

- R. J. Eiber, T. A. Bubenik, W. A. Maxey, "Fracture Control Technology for Natural Gas Pipelines", American Gas Association, Project PR-3-9113, Report NG-18 No.208, December 1993.
- Irving H. Shames, "La mecánica de los fluidos", M^c Graw Hill, 1970.

El Ing. Fernando Carlos Silva es egresado de la Universidad de Buenos Aires donde obtuvo en el año 1978 el título de Ingeniero Electromecánico Orientación Mecánica. Desde entonces ha tenido una activa participación en la Industria del Petróleo y el Gas. También desde el año 1978 ha ejercido la actividad docente Universitaria. En la actualidad el Ing. Silva se desempeña como Jefe de Ingeniería e Integridad de Gasoductos en la Empresa Transportadora de Gas del Norte S.A. y como profesor titular de Hidráulica en la Universidad Tecnológica Nacional Regional Buenos Aires.

El Ingeniero Pedro Martín Hryciuk es Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Tecnológica Nacional en el año 1999. Desde el año 1998 forma parte del laboratorio de CAD-CAM-CAE de la Universidad Tecnológica Nacional Regional Buenos Aires, y en la actualidad se desempeña en el sector de Acondicionamiento de Presiones que forma parte de la Dirección de Ingeniería e Integridad de Gasoductos en la Empresa Transportadora de Gas del Norte S.A.