

Cuáles son los mecanismos de falla de las tuberías de polietileno y cómo evitarlos

Por **María Camila Quintana, Federico Rueda, Nahuel Rull y Patricia María Frontini**

Autora responsable: **Patricia Frontini**

Este artículo describe los mecanismos y los métodos de prueba para estudiar el comportamiento de la propagación rápida y el crecimiento lento de fisuras en las tuberías de polietileno sometidas a presión de acuerdo con las normativas vigentes.

El polietileno (PE) ha revolucionado el diseño de sistemas de tuberías sometidas a presión interna a nivel mundial. Debido a una combinación especial de sus propiedades, el PE y otros sistemas plásticos han reemplazado de manera progresiva e irreversible a los materiales tradicionalmente utilizados en la fabricación de tuberías para todo tipo de fluidos durante los últimos 50 años.

Los grados comerciales específicos de PE han evolucionado hasta proporcionar un buen equilibrio entre la resistencia mecánica, la rigidez, la dureza y la durabilidad consistente con los requisitos a largo plazo para la conducción de gas y agua, la acción del suelo y el entorno en servicio. Los sistemas están diseñados normalmente sobre una base de diseño de 50

años, pero actualmente, los tiempos de vida previstos están por encima de los 100 años.

La tubería de PE es durable y flexible. El PE es altamente resistente a la corrosión y a los productos químicos cuando se encuentra enterrada. Por tanto resulta muy adecuado para el transporte de gas natural, ya que es menos propenso a las fugas que las tuberías de acero. Las tuberías y accesorios de PE se usan ampliamente en los sistemas de distribución de gas y agua, en revestimientos anticorrosión y en minería ya que poseen un excelente historial de eficiencia y confiabilidad, además de las ventajas económicas (Figura 1).

El PE ofrece a la industria de tuberías las siguientes ventajas:

- Fabricación económica y flexibilidad de diseño: bajo costo de



Figura 1. Tuberías y accesorios de polietileno

material y de transformación mediante extrusión y moldeo por inyección. Las instalaciones de tuberías de PE tienen ventajas de costo a largo plazo, debido a sus propiedades físicas, juntas libres de fugas y costos de mantenimiento reducidos.

- Diseño integrado: componentes multifuncionales, elementos de ensambles (acoples y accesorios)

estándares.

- Flexibilidad: facilidad de transporte y manipulación, puede usarse con tecnologías “sin zanjas”; presenta gran resistencia a la actividad sísmica. La tubería de PE es semirrígida para soportar altas cargas externas. Su naturaleza flexible se expande con sobretensores que aumentan la vida útil de la tubería.

- Biológicamente inerte.
- Alta resistencia al impacto y a la abrasión.
- Durabilidad a largo plazo: vida útil de 50 a 100 años.
- Baja fricción: la tubería de PE no acumula incrustaciones mejorando la eficiencia del flujo de transferencia.
- Beneficios ambientales por ser reciclable.
- Se trata de tuberías ligeras que se instalan fácilmente sin equipos pesados de elevación. Los métodos de instalación alternativos (perforación direccional horizontal, explosión de tuberías, deslizamiento, arado y planta, tubería sumergida o flotante, etc.) pueden ahorrar tiempo y dinero considerables en la mayoría de las aplicaciones.

Por los motivos mencionados, el PE y otros sistemas plásticos se utili-

zan para una amplia gama de aplicaciones, destacándose en el suministro de gas, en caso de fugas, tiene consecuencias potencialmente graves. Una primera evaluación de la confiabilidad de los sistemas de tuberías plásticas se logró mediante el análisis estadístico de fallas y de los mecanismos que las produjeron (1-4). Si bien los primeros sistemas de PE demostraron un rendimiento satisfactorio en comparación con los materiales de tuberías tradicionales, como el hierro, el acero y el hormigón, tales estudios también sirvieron para identificar los aspectos que necesitaban una mejora: la calidad de las juntas y la resistencia al agrietamiento prematuro por esfuerzos que surgen de la carga puntual con piedras, sistemas de raíces y el asentamiento del suelo. Estas observaciones dieron como resultado la generación de códigos de práctica estrictos para la fabricación y la instalación de tuberías plásticas, acompañadas por el desarrollo de nuevos grados comerciales de PE de mayor rendimiento, así como metodologías de prueba asociadas que permitieron evaluar y validar su rendimiento (5-16).

Los estudios pioneros revelaron que los sistemas de tuberías de plástico fallan por dos mecanismos principales de fractura que pueden clasificarse como "Crecimiento lento de fisuras" (SCG) y "Propagación rápida de fisuras" (RCP) (Figura 2).



Figura 2. Fracturas frágiles típicas de tuberías de polietileno: a) a largo término, sin daño lateral; b) propagación crítica de grieta, rápida; grieta dinámica con de material, espesor de pared grueso; d) grieta "running crack", propagación a muy alta velocidad, comportamiento cíclico y frágil con efecto de latemperatura. Extraído de *Reliability index computation for HDPE pipe using critical stress intensity factor*. Kamel CHAOUI a, Latifa ALIMI a,b, Salaheddine AZZOUEZ. 23ème Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017.

Qué implica para las tuberías de PE el fenómeno conocido como crecimiento lento de fisuras (SCG)

La mayoría de las fallas en campo de las tuberías son atribuibles a roturas por crecimiento lento de fisuras (SCG, en inglés *Slow Crack Growth Propagation*). Estas fracturas se caracterizan por el crecimiento estable de una grieta con poca deformación plástica a través de la pared de la tubería. Este mecanismo suele ocurrir cuando la tubería se encuentra sujeta a fuerzas de flexión continuas como resultado, por ejemplo, del movimiento del suelo (17).

El fenómeno consiste en la propagación de una grieta, generalmente desde la superficie externa a la superficie interna de la tubería. Esta grieta puede iniciarse en fallas microscópicas por el aumento local de la tensión, inherentes al producto básico de la tubería o, más probablemente, por defectos. Son fallas mecánicamente frágiles, típicamente fracturas tipo hendidura paralelas a la dirección de extrusión de la tubería. La tensión circunferencial en la pared de la tubería es la fuerza impulsora para la apertura de grietas.

La propagación de la grieta a través de la pared de la tubería puede demorar varios años antes de provocar una fuga de gas. También, pueden iniciarse fisuras circunferenciales en la superficie exterior o interior de las tuberías, debido a tensiones secundarias, como la flexión o el impacto sobre el material. La falla prematura de las uniones termofusionadas constituye una falla común donde el agrietamiento se inicia por la presencia de concentraciones de tensión generadas por malas prácticas de instalación. Visualmente, las superficies de fractura son típicamente lisas, sin signos de deformación plástica como se muestra en la figura 3.

Los tres modos principales en que fallan las tuberías de PE son dúctil (modo I), frágil (modo II) y frágil/químico (modo III) (Figura 4). La falla dúctil se asocia con la fluencia del material y refleja su propensión a sufrir deformación plástica irreversible cuando está bajo sollicitación mecánica superior a su tensión de fluencia. Este mecanismo, resulta de la deformación plástica localizada con adelgazamiento de pared, producido generalmente en una zona de espesor

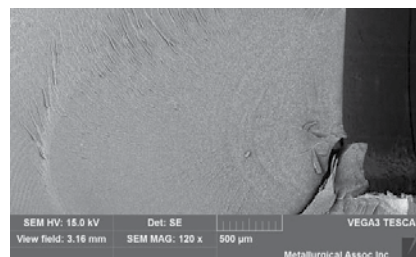


Figura 3. Micrografía SEM que muestra una superficie muy lisa coincidente con el origen de la grieta indicativa de fractura frágil a través del fenómeno de crecimiento lento de grietas. Extraído de *Case studies of plastic failures associated with metal fasteners*, Jeffrey A. Jansen, The Madison Group; ANTEC 2016.

de pared más bajo. A esto le sigue la expansión de la zona deformada y la ruptura final de la misma cuando la tensión local excede la resistencia mecánica del polímero orientado durante el proceso de estiramiento bajo esfuerzo (17-20).



Figura 4. Esquema ilustrativo de la falla de tuberías de PE presurizadas con el tiempo.

El SCG se produce en las zonas más tensionadas antes de la falla global por reventado. Las tuberías fallan de manera frágil con tensiones significativamente más bajas que la tensión de fluencia del material. Como es sabido, los polímeros, como el PE son materiales viscoelásticos y su respuesta mecánica es una combinación de la de sólidos elásticos y fluidos viscosos. En consecuencia, exhiben una relación no lineal, tensión-deformación y sus propiedades dependen del tiempo bajo carga, temperatura, ambiente químico y el nivel de tensión o deformación aplicado (21) (Figura 5).

Los diseñadores son conscientes de que muchos polímeros pueden soportar niveles de deformación del 300% o más. Sin embargo, a largo término la ventana para el esfuerzo admisible es considerablemente más pequeña. Todos los polímeros cuando se



Calendario de Cursos Streaming

Este año el IAPG puso en marcha la capacitación vía streaming que pone de manifiesto el dinamismo y creatividad en su oferta pedagógica para la industria. Los cursos fueron diseñados en módulos cortos, utilizando la plataforma Cisco WebEx Training a través de la cual los participantes acceden a presentaciones; cuentan con herramientas que facilitan el aprendizaje y tienen instancias de intercambio con el instructor. Todo esto, desde cualquier lugar del mundo con acceso a Internet, en PC, tablet o celular. Al inscribirse, los participantes reciben un instructivo sobre el uso de la plataforma. Los cursos In Company del IAPG incluyen el dictado de estas capacitaciones Streaming. Asimismo, todos los cursos se pueden presentar al Programa de Crédito Fiscal para Capacitación Pyme del Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación.

**03 al 07
AGOSTO****Introducción a la Industria del Petróleo**

Instructores: L. Stinco, A. Liendo, M. Chimienti, P. Subotovsky, A. Heins

**04 al 07
AGOSTO****Mediciones de Hidrocarburos**

Instructor: D. Brudnick

**18 al 21
AGOSTO****Auditoría y Control en Empresas de Oil & Gas**

Instructor: R. Campo

**24 al 28
AGOSTO****Métodos de Levantamiento Artificial**

Instructor: P. Subotovsky

**25 al 28
AGOSTO****De la Roca Madre al Reservorio No Convencional**

Instructor: R. Veiga

**31 AGO al
04 SEP****Introducción a los Sistemas de Gestión de la Energía y la Norma ISO 50.001**

Instructora: A. Heins

**07 al 11
SEP****Estaciones de Medición y Regulación de Gas Natural**

Instructor: D. Brudnick

**07 al 11
SEP****Eficiencia Energética en Industrias de Procesos**

Instructora: A. Afranchi

Para más información solicitarla a cursos@iapg.org.ar

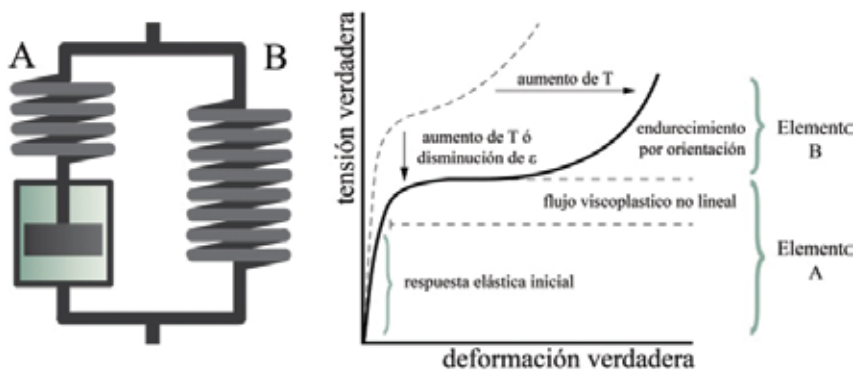


Figura 5. Representación reológica del comportamiento mecánico del PE.

exponen a una sollicitación de tensión constante exhiben *creep*, una deformación no reversible dependiente del tiempo. La ruptura por *creep* constituye el evento terminal y es una medida del tiempo que un material tarda en fallar bajo una carga constante. La misma puede acelerarse por un aumento de la temperatura, concentradores de tensión como muescas, esfuerzos cíclicos y el contacto con entornos químicos específicos (líquido o vapor), comúnmente conocidos como agrietamiento por estrés ambiental (ESC).

A nivel microscópico, existen muchos defectos inherentes dentro de la microestructura de la pared de la tubería que promueven la concentración de esfuerzos. Con la aplicación de unos pocos MPa de esfuerzo, el límite elástico del polímero se excederá localmente. El desarrollo de zonas de micro-fluencia localizada inhibe la acción de estos defectos e inicialmente los estabiliza. En consecuencia, se generan zonas delgadas en forma de placa que crecen en planos normales a la dirección de la tracción principal. Dentro de la zona afectada se produce una expansión del volumen llamada cavitación. Este fenómeno se denomina "*craze*", en español podríamos llamarlo microcavitación (23) (Figura 6). Con la subsiguiente multiplicación de las cavidades, la zona continúa desarrollándose y el material entre cavidades se estira para formar fibrillas altamente orientadas que soportan las cargas hasta que se alcanza un punto en el que las fibrillas más estiradas se rompen. Con la ruptura de fibrillas, aumenta la tensión en el vértice del *craze* y, por tanto, también la tasa de

crecimiento del mismo con la consecuente extensión de las fibrillas adyacentes. Esta secuencia se repite hasta que el *craze* se convierte en una fisura. La grieta continúa avanzando detrás del *craze* hasta que alcanza una longitud crítica que da como resultado la fractura completa y falla de la tubería.

Propagación rápida de fisuras (RCP): qué significa para la tubería de PE para gas

La propagación rápida de grietas (RCP) es un tipo de falla por fractura rápida que puede iniciarse en una soldadura termofusionada defectuosa, daño producido por terceros como impacto de alta velocidad provocado por el equipo de excavación o un pulso de presión de la tubería. Una vez iniciadas, las fisuras pueden viajar a alta velocidad a lo largo de la tubería en distancias significativas siempre que la energía almacenada de la fuente de presión contenida sea suficiente para impulsar la grieta más rápido que la velocidad a la que se libera la energía. La propagación se produce a una velocidad crítica que se aproxima a la

velocidad del sonido. Entonces, la grieta se volverá inestable, ramificándose en un patrón sinusoidal, hasta que disminuya la velocidad y se detenga.

Las características típicas de una grieta RCP son una trayectoria sinusoidal a lo largo de la tubería, una superficie de fractura frágil y "marcas *hackle*" en la dirección de la grieta. Los operadores, cuando eligen una tubería de PE, deben probar la presión que puede soportar para asegurarse de que limitan la posibilidad de RCP (24).

La propagación rápida de fisura depende de varios factores:

- Diámetro del tubo: a medida que aumenta el diámetro exterior, aumenta la posibilidad de RCP.
- Presión de operación: a medida que aumenta la tensión/presión de la tubería, aumenta la posibilidad de que ocurra RCP.
- Temperatura de operación: a medida que la temperatura disminuye, la posibilidad de RCP aumenta; y la resistencia del material de la tubería a la fractura por impacto y a la RCP.

Si bien este modo de falla no ha sido muy común en las tuberías de PE, sus potenciales y nefastas consecuencias son muy significativas para la distribución de gas (Figuras 2c y 2d). Para evitar fallas catastróficas, los sistemas de tuberías deben ser diseñados para que la RCP no se produzca. Por tanto, las compañías operadoras de tuberías se deben asegurar que las tuberías sean aptas para operar a temperaturas invernales que podrían promover el fenómeno de RCP. La presión también es un factor significativo, ya que un pulso de presión en la tubería podría contribuir a la RCP por aumento de la tensión en la pared de la tubería. En el caso de que se produzca una RCP, las consiguientes ondas de presión pue-

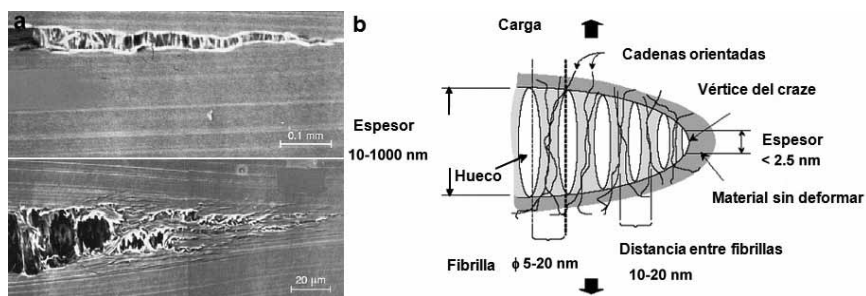


Figura 6. Estructura de *craze* y micrografías mostrando red fibrilar del *craze*, transición de grietas en PE y *craze* multiples. Adaptado de "*Crack Growth in PE*" PhD thesis of T. Riemsdijk (1997) University of Delft.

den dar lugar a la fragmentación de la tubería, haciendo que los pedazos se desplacen a gran velocidad alcanzando grandes distancias.

La normalización como impulsora del éxito de sistemas de tuberías de polietileno sometidas a presión

Las especificaciones normalizadas proporcionan una serie de requisitos mínimos de calidad para el material y los productos asociados. Estos requisitos impulsan mejoras en los materiales y proporcionan las bases para la definición de sistemas de mejor desempeño.

El desarrollo de materiales más adecuados brinda mayor seguridad, durabilidad, permite un mejor funcionamiento, un uso de instalaciones más exigentes, la utilización de técnicas innovadoras y la operación de sistemas en condiciones menos benignas.

La industria de tubos de plástico ha desarrollado con éxito normas para garantizar la durabilidad y la alta confiabilidad, gracias a un fuerte compromiso de toda la cadena de valor: proveedores de materias primas, fabricantes de productos, laboratorios de prueba y no menos importante, de los usuarios finales. A su vez, las normas han generado el incentivo para que los proveedores mejoren el rendimiento del material y que los fabricantes desarrollen productos más innovadores (19).

La industria es dinámica y, durante los últimos 25 años, se ha dado un gran paso en cuanto riguarda a la calidad de los materiales comerciales. Esto se tradujo en sistemas que soportan mayores presiones y niveles más altos de durabilidad, lo que permite utilizar técnicas de instalación más desafiantes o que se puedan emplear en condiciones más agresivas.

En las aplicaciones de tuberías PE sometidas a presión se deben satisfacer las propiedades físicas básicas del material, cumplir con las clasificaciones dimensionales con fines de diseño, demostrar la resistencia al crecimiento lento de grietas y a la propagación rápida según se indica en la especificación del producto.

Los estándares regionales e internacionales incluyen pruebas para determinar la resistencia de la tubería a los principales mecanismos de fractura: crecimiento lento de grietas

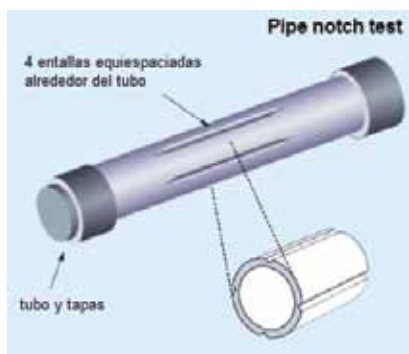


Figura 7. *Pipe notch test* según Norma ISO 13.479.

(SCG) y propagación rápida de grietas (RCP). Los procedimientos de diseño deben seguirse para garantizar que no se produzcan fallas por fractura durante el funcionamiento. La normalización vigente tiene en cuenta estos fenómenos pero es de esperar que siga evolucionando para incluir nuevos desarrollos e innovaciones con vistas a una mayor promoción de la industria específica.

Normas específicas

Normativa NAG 140

En relación con los mecanismos descriptos, recientemente la Resolución del Ente Nacional de Regulación de Gas, ENARGAS Nº 1/3665 del 26-02-2016, estableció que a partir del 1 de enero de 2019 solo se certificarán productos del "Sistema de Tuberías Plásticas de Polietileno (PE) (Materia Prima, Tubos, Accesorios y Válvulas) para el Suministro de Combustibles Gaseosos" conforme a la NAG140 (2016). <http://www.enargas.gov.ar/MarcoLegal/Normas/Grupofil.php>. En la Parte 2 de la Norma NAG140 se propone la calificación de las tuberías según las Normas ISO 13479, 13480 y 13477. Estas son: i) ISO-13479 – "Tubos de poliolefinas para el transporte de fluidos. Determinación de la resistencia a la propagación de la fisura. Método de ensayo de la propagación lenta de la fisura de un tubo con entalla (ensayo de entalla)"; ii) ISO-13480 – "Tubos de Polietileno. Resistencia al crecimiento lento de la fisura (ensayo del cono)" y iii) ISO-13477 – "Tubos termoplásticos para el transporte de fluidos. Determinación de la resistencia a la propagación rápida de fisuras (RCP). Ensayo a pequeña escala en régimen permanente (ensayo S4)".

Pruebas de crecimiento lento de fisuras: resistencia al agrietamiento por esfuerzo

Pipe notch test

La resistencia al crecimiento lento de grietas (SCG) es una propiedad crítica para el polietileno (PE), especialmente para el utilizado en tuberías a presión. Se han desarrollado varios métodos de prueba a lo largo del tiempo, tanto para la resina como para las tuberías. Los métodos intentan acelerar el mecanismo para obtener tiempos de prueba razonables (*Fast Tests for Slow Cracks*). Lo hacen a través de temperaturas elevadas, concentradores de tensión, geometrías restringidas, tensioactivos o alguna combinación de estos factores.

Las tuberías de PE se prueban a temperaturas elevadas para predecir el comportamiento a largo plazo a temperaturas más bajas. Las tuberías se han probado en un amplio rango de presiones y de temperaturas de hasta 80 °C. Se ha comprobado que mientras las presiones más altas dan lugar a fallas dúctiles, las presiones más bajas promueven fallas frágiles, relacionadas con el fenómeno de resistencia al crecimiento lento de grietas. El cambio en el comportamiento se denomina punto de inflexión ("rodilla") con un descenso en la curva de esfuerzo de ruptura seguido de fallas predominantemente frágiles (Figura 4). El "*Pipe notch test*" (Figura 7) se describe en la Norma ISO 13479 "*Polyolefin pipes for the Conveyance of fluids - Determination of resistance to crack propagation - Test method for slow crack growth on notched pipes (notch test)*" o – "Tuberías de poliolefina para el transporte de fluidos - Determinación de la resistencia a la propagación de grietas - Método de prueba para el crecimiento lento de grietas en tuberías con entalla". Las *notch resistance/Slow crack growth notched pipe*/Las pruebas de Resistencia al Crecimiento lento de grietas de tuberías con entallas de acuerdo con los principios de la ISO 13479 se han incluido en NAG 140. Para el HDPE, se usaron los mismos requisitos de la prueba sin entalla para el PE80 (tensión hidrostática de tubería sin entallas de 4.0MPa, 80°, C_≥ 165 h). En consecuencia, resulta posible simular directamente el efecto de las entallas externas que podrían aparecer durante la instalación de la tubería. La pro-

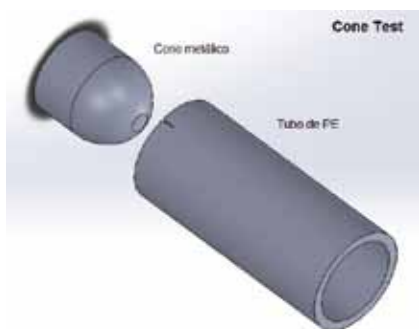


Figura 8. Esquema del test *small-scale steady-state* (S4 test) según Norma ISO 13477.

fundidad de la entalla es del 20% del grosor de la pared de acuerdo con las profundidades de defectos similares observados en la práctica (25).

La prueba simula el crecimiento lento de grietas y el tiempo de falla real registrado en tuberías con entallas. El medio de prueba cumple con la norma ISO 1167 en términos de temperatura y presión interna constantes. Las tuberías de PE se prueban a 80 °C bajo ciertos niveles de presión que dependen del SDR (*Standard Dimension Ratio*).

La norma ISO requiere un tiempo de prueba de 165 h a 80 °C a 9, 20 Bar para PE 100.

Cone Test

El agrietamiento producido por efectos de las tensiones y el medio ambiental, ESCR, se evalúa mediante una prueba de agrietamiento por estrés ambiental llamado prueba de cono de acuerdo con la norma ISO 13480. Las condiciones de relajación por tensión utilizadas en la prueba son similares a las condiciones de carga de los sistemas subterráneos. Esta prueba permite una clasificación fácil, rápida (la duración de la prueba es de aproximadamente cinco días) y económica de los materiales en función de su resistencia a la fisuración. La prueba del cono utiliza un cono sobredimensionado que se coloca en un tubo con muescas previamente mecanizadas. La deformación es inducida por la inserción del cono de diámetro graduado en un extremo de la tubería. La velocidad de crecimiento de la grieta es entonces una medida de la resistencia de las tuberías al SCG. También en estas pruebas, la elección del medio tensioactivo y la temperatura es esencial para obtener resultados en un tiempo razonable, en especial para los grados de mayor resistencia al fenómeno (27).

En la práctica, se corta un tramo de tubería de 15 cm de largo y se le practica una única entalla de 10 mm de largo con hoja de afeitar nueva a lo largo de la dirección axial en la pared exterior de la tubería en un extremo, como se muestra en la figura 8, luego, se inserta un mandril a un ritmo constante.

Debido a que el diámetro del mandril utilizado en la prueba de cono es 1,12 veces mayor que el diámetro interno nominal de las tuberías, la tubería se expandirá y se generará una tensión constante en toda la tubería después de la inserción del mandril. A continuación, se sumerge el conjunto en una solución acuosa al 5% en peso de un tensioactivo no-iónico: nonilfenol-poliglicoléter con 11 Mol EO a una temperatura bien controlada de 80 °C.

El incremento de la longitud de fisura de los tubos se mide a intervalos de tiempo regulares. Luego se traza la curva del incremento de la longitud de la grieta frente al tiempo y se extrapola al eje de tiempo. El punto de intersección de la curva y el eje de tiempo se define como el tiempo de inicio de la grieta y la pendiente de la curva resulta ser la tasa de crecimiento de la grieta. Se permite una tasa de crecimiento de fisuras de 10 mm/día como máximo.

Resistencia a la propagación rápida de fisuras

Simulación del fenómeno RCP en tuberías de plástico: Ensayo S4

Los principales métodos de prueba para estudiar la propagación rápida de

grietas (RCP) son la prueba de escala completa (*Full Scale Test*) y la prueba de estado estable a pequeña escala (*Small Scale Steady State*, S4). La prueba de escala completa (ISO 13478:2007) proporciona la evaluación más confiable de la presión crítica (pc). La presión crítica pc es el valor crítico de la presión de operación a la cual una grieta rápida recorre toda la longitud de la tubería (27).

Esta presión resulta función de las propiedades del material, las dimensiones de la tubería y las propiedades del fluido a presión. No obstante, la prueba de escala completa es demasiado costosa y laboriosa en su ejecución. Por lo tanto, la prueba S4 fue desarrollada para lograr un RCP de estado estacionario sobre muestras más pequeñas restringiendo la descompresión que normalmente acompaña a la propagación de la grieta (28). La prueba sirve para determinar los efectos de parámetros que influyen fuertemente en el comportamiento de la RCP, como el espesor de la pared de la tubería, el diámetro de la tubería, la temperatura de prueba y el grado del material de la tubería, entre otros.

La prueba S4 está estandarizada en la norma ISO 13477 "Tubos termoplásticos para el transporte de fluidos - *Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids - Determination of resistance to rapid crack propagation* - Determinación de la resistencia a la propagación rápida de grietas (RCP)". La prueba simula el fenómeno de RCP en tuberías de plástico y mide la capacidad de detención o propagación de una grieta iniciada. En las tuberías, una grieta frágil podría viajar por una longitud de varios cientos de metros, casi a la velocidad del sonido.



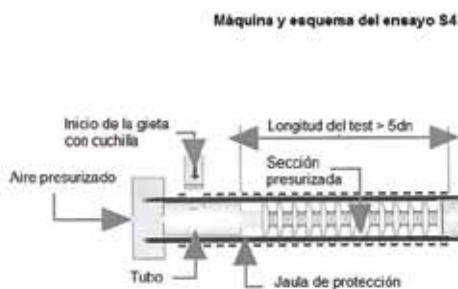
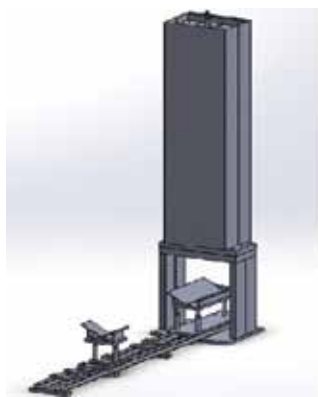


Figura 9. Cone test según Norma ISO 13.480.

Las normas ISO actuales permiten un máximo de 10 Bar para gas natural y 25 Bar para tuberías de agua potable como presión de funcionamiento. Las muestras de tubería de prueba rectas tienen una longitud igual a siete veces el diámetro externo de la tubería. Todas las pruebas se especifican con tubos SDR 11 de 110 mm con una longitud de 800 mm y se llevan a cabo a una temperatura de acondicionamiento de 0 °C usando nitrógeno o aire para presurizar la tubería. Las tuberías están preparadas con tapas estancas que se montan sobre cada extremo. El aparato de prueba está diseñado para simular la propagación de una grieta longitudinal de tipo rápida que se inicia en una pequeña muesca realizada dentro de la tubería (Figura 9).

La energía obtenida durante el impacto producido por la caída repentina de un peso con una cuchilla, pretende asegurar el no inicio de la propagación rápida de una grieta si la resistencia al RCP está por debajo del nivel energético impuesto. La condición requerida para el arresto de las fisuras se define cuando la grieta inducida no iguale o exceda 4.7 veces el diámetro externo de la tubería.

Conclusiones y perspectivas

Recientemente la *American Gas Foundation* realizó un informe titulado "Gas Distribution Infrastructure: Pipeline Replacement and Upgrades" que indica claramente que las tuberías plásticas son actualmente el material preferido en la industria de la distribución de gas (29, 30, 35). La Argentina no es la excepción a esta tendencia. Se

espera que continúe una alta tasa de crecimiento de la industria de tubos de plástico, impulsada por el aumento de muchas aplicaciones dentro del mercado, la inversión en infraestructura en los países emergentes y la renovación de sistemas metálicos corrosivos en los países desarrollados.

No hay duda de que la estandarización ha apuntalado el éxito de la industria de tuberías plásticas. La industria ha apoyado firmemente la estandarización, involucrándola en toda la cadena de valor, desde los proveedores de materias primas hasta los usuarios finales, lo que ha generado el desarrollo de materiales y productos de mejor desempeño en servicio.

El Instituto Argentino del Petróleo y el Gas (IAPG) en un informe del año 2015 (31, 33) manifiesta que la distribución de gas natural se asoma como una de las cuestiones estratégicas más

importantes del país. La Argentina posee una de las reservas más importantes de *shale-gas* en el mundo con excelentes perspectivas de desarrollo: Vaca Muerta ha sido señalada como la segunda mayor del mundo.

Actualmente, el grupo de Ing. de Polimeros de Intema (www.polymer-engineering.com, figura 10) está instalando un laboratorio para brindar soporte altamente calificado en integridad estructural de tuberías plásticas para el transporte de gas natural (Proyecto Start-Up 2018-0608).

Las instalaciones serán aptas para realizar los ensayos que demandan las normas internacionales más importantes actualmente en vigencia en el país y la región (30, 34-35). En especial se construirá un equipo para realizar el Test S4, sin necesidad de enviar las muestras a los laboratorios europeos y evitando los inconvenientes que esta operación conlleva. Por otra parte, se fortalecerá el dictado de cursos específicos de formación en desempeño mecánico de tuberías plásticas para sectores industriales. El grupo ha desarrollado fuertes vínculos con la industria nacional y extranjera de tuberías plásticas para el gas y petróleo, entre otras, desarrollando métodos de prueba y estrategias para termoplásticos resistentes al impacto y a la propagación lenta de fisuras región (36).

Lugar de trabajo

Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA).

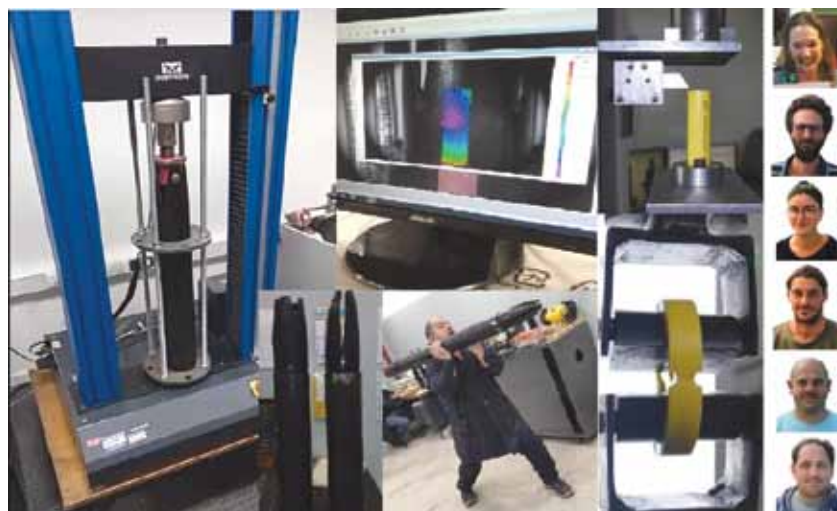


Figura 10. Grupo y laboratorio de ingeniería de polimeros de INTEMA.

Referencias

1. T. Hill, Assessment of PE pipe systems, condition and residual life. *Plastics Pipes X*, 1998.
2. F. Scholten, M. Wolters, M. Wenzel, J. Wust, J. Heinemann, A. Bockenheimer, Structural integrity of PE gas/water pipes of the first generation, 3R Special Edition, 2 / 2011.
3. W. Mueller, Development of polymers for pipemaking. *Plastics Pipes Conference 3*, 1974.
4. R. Dewitt, High performance PE compounds for safer gas and water transportation. *PPVIII*, 1992.
5. ISO 12162:2010, Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications — Classification, designation and design coefficient.
6. ISO 4427-1/2/3/5 Plastics piping systems – Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply.
7. ISO 4437-1/2/3/5 Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels – Polyethylene (PE)
8. ISO 9080:2012, Plastics piping and ducting systems - Determination of the longterm hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation (ISO 9080:2012).
9. ISO 13479:2009, Polyolefin pipes for the conveyance of fluids - Determination of resistance to crack propagation - Test method for slow crack growth on notched pipes
10. ISO 13478:2007, Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids – Determination of resistance to rapid crack propagation – Full scale test (FST).
11. ISO 13477:2008, Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids – Determination of resistance to rapid crack propagation – Small scale Steady state test (S4 test)
12. ISO 16770:2004, Plastics — Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene — Full-notch creep test (FNCT).
13. EN 12201-1/2/3/4/5:2011, Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE).
14. EN 1555-1/2/3/4/5:2010, Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels — Polyethylene (PE).
15. Plastic Pipe Institute TR-4 - HDB/HDS/SDB/PDB/MRS Listed Materials, 3/12/2013.
16. Plastic Pipe Institute TR-3 - HDB/HDS/PDB/SDB/MRS/CRS Policies, 3/2012.
17. A. Suhkadia, M. Lamborn, P. Deslauriers, R. Garcia, C. Dominguez, Assessing the slow crack growth resistance of polyethylene resins and pipe service lifetime predictions, *Plastics Pipes XV*, E. Palermo, Comparison between PE 4710 (PE 4710 PLUS) and PE 100 (PE 100+, PE 100RC).
18. Low temperature performance; 30/9/2019 The nature of polyethylene pipe failure | *Plastics Today*: <https://www.plasticstoday.com/extrusion-pipe-profile/nature-polyethylene-pipe-failure/6347137615310> 2/9.
19. Proceedings of the 17th Plastic Pipes Conference PPXVII September 22-24, 2014, Chicago, Illinois, USA. Standardisation driving the success of Polyethylene pressure piping systems. S H Beech P Belloir C Salles.
20. Modeling of axisymmetric slow crack growth of high-density polyethylene with circular notched bar specimen using crack layer theory. Jung-Wook Wee, Byoung-Ho Choi. *International Journal of Solids and Structures* 97–98 (2016) 189–199.
21. Deformation and failure of semi-crystalline polymers under dynamic tensile and biaxial impact loading. J.P. Torres a*, P.M. Frontini a, M. Machado b, Z. Major. *International Journal of Impact Engineering* 98 (2016) 52–61.
22. *Polymer* Volume 19, Issue 10, October 1978, Pages 1186-1188. Polymer A theory of the environmental stress cracking of polyethylene. H. R. Brown.
23. Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network. May 2011 *Polymer* 52(14):2979-2990. DOI: 10.1016/j.polymer.2011.03.055. Project: Slow Crack Propagation in Polyolefins Rudy Deblieck Rudy Deblieck D. J. M. van Beek K. Remerie K. Remerie Iani Macmillan Ward Iani Macmillan Ward.
24. “Increasing Importance of Rapid Crack Propagation (RCP) for Gas Piping Applications –Industry Status”. Presented at: *Plastics Pipes Conference XIV* By: Dr. Gene Palermo Palermo Plastics Pipe (P3) Consulting www.plasticspipe.com William J. Michie, Jr. Dr. Dane Chang.
25. The development of the “notched pipe test” for the assessment of the slow crack growth resistance of polyethylene pipe W. J. Allwood and S.H. Beech- *Construction and Building Materials* 1993 Volume 7 Number 3 157.
26. *Polymer Bulletin*. September 2010, Volume 65, Issue 6, pp. 609-621 Cite as High-density polyethylene pipe with high resistance to slow crack growth prepared via rotation extrusion. Min Nie Shi Bing Bai Qi Wan.
27. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 42, Issue 4, July 1992, Pages 663-673. Rapid crack propagation in pressurised plastic pipe—I. Full-scale and small-scale RCP testing. Author links open overlay panel J. M. Greig P. S. Leever P. Yayla.
28. *Polymer Testing*. Volume 23, Issue 6, September 2004, Pages 727-735. Test Method. Specimen temperature conditioning and drift before an S4 pipe fracture test. P.S. Leever S. Hillman Sena L. de F. F. Moreno.
29. S. Tymkowicz. Gas distribution infrastructure: pipeline replacement and upgrades – cost recovery issues and approaches. Technical report, Yardley Associates, 2012.
30. URL <https://www.enargas.gob.ar/secciones/normativa/normas-tecnicas-items.php?grupo=1>.
31. De vaca muerta al hogar de los argentinos. Technical report, IAPG, 2015. URL <http://www.iapg.org.ar/download/Downstream.pdf>.
32. Julieta del Canto Juliana Comunelli. Logística de hidrocarburos en argentina. Technical report, UIDIC - Área Transporte, 2016.
33. Fernando Risuleo. Análisis de la infraestructura de gas natural en la república argentina. Technical report, Cámara argentina de la construcción, 2010. URL <http://create.usc.edu/research/50788.pdf>.
34. Audiencia pública número 87. Technical report, Metrogas, 2016. URL https://www.enargas.gob.ar/secciones/audiencias-publicas/RTI/metrogas/A2016_39846.pdf.
35. Polyethylene piping distribution systems for components of liquid petroleum gases. Technical report, Plastic Pipe Industry, 2013.
36. Agnelli, S., Baldi, F., Blackman, B. R. K., Castellani, L., Frontini, P. M., Laiarinandrasana, L., ... Visser, R. (2015). Application of the load separation criterion in J-testing of ductile polymers: A round-robin testing exercise. *Polymer testing*, 44, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.polymer-testing.2015.03.01>