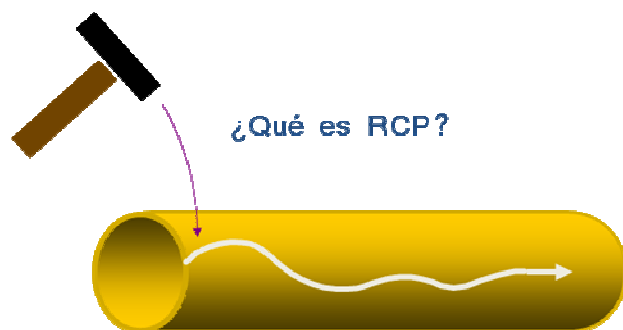


1 Introducción

El polietileno es el principal material utilizado en aplicaciones de tuberías para gas y transporte de agua. Las compañías de gas prefieren la instalación de tubos de polietileno de alta densidad que manejen altas presiones y de grandes diámetros en lugar de las tuberías de acero, primordialmente por su flexibilidad, facilidad en instalación, duración de largo plazo, nula corrosión y costos relativamente menores. Sin embargo, las tuberías fabricadas con este material presentan ocasionalmente fallas producidas por impactos directos sobre el tendido, traducidas en la aparición de grietas que se propagan a velocidades de hasta los 200 metros por segundo a lo largo de la línea presurizada de la tubería, ocasionando daños catastróficos⁵.



La falla descrita se conoce como **RCP** (por sus siglas en inglés: "Rapid Crack Propagation") o crecimiento rápido de grieta. El polietileno, al ser un material plástico dúctil y semicristalino, no es susceptible a la propagación rápida de grietas, sin embargo, la necesidad de utilizar mayores presiones (12 bares ó 180 psig) y diámetros más grandes (hasta de 760 milímetros) hacen que la característica de resistencia a la propagación de grietas se convierta en importante.

Las fallas por RCP pueden ser iniciadas a presiones muy por debajo del esfuerzo de diseño de la tubería, si las condiciones a la que se expone lo promueven. Por ejemplo, una tubería fabricada con una resina tipo PE-100, cuyo esfuerzo a largo plazo ronda los 10 MPa, puede fallar a menores esfuerzos, si la temperatura de uso es lo suficientemente baja. Es por ello que los fabricantes

de tuberías deben diseñar estos sistemas⁴ bajo las peores condiciones posibles, de tal forma que eviten RCP.

Estas circunstancias han conducido al desarrollo de métodos de ensayo que permiten el registro del desempeño de esta propiedad en tuberías plásticas, entre ellos están el método FS ("Full Scale" o escala real) y S4 (a pequeña escala en estado estacionario), que permiten detectar las condiciones de presión y temperatura a las que comienza a propagarse una grieta provocada por impacto.

No obstante, las causas que se asocian a las fallas por RCP de tuberías de PEAD dependen de varios factores, entre los más resaltantes se tienen:

- Geometría de la tubería (dimensiones).
- Presión interna.
- Temperatura de servicio.
- Propiedades de resistencia del material al RCP.
- Procesamiento de la tubería.

Las formas típicas de la falla se asocian a la aparición de una grieta ondulante a lo largo de la tubería.

La grieta generalmente va acompañada de marcas en forma de "plumas" sobre la superficie del tubo, en dirección de la propagación. También pueden producirse bifurcaciones de la grieta, que viajan paralelas a la grieta principal.

2 Métodos de ensayo

Método a escala real FS (Full Scale): considerado como el método más confiable, se describe en la norma ISO 13478, y emplea muestras de tubos de 18 metros de longitud de hasta 500 milímetros de diámetro. Sin embargo, su implantación es extremadamente elaborada y de costo muy elevado.

En la Figura 1 se observa un esquema de instalación del equipo de ensayo para RCP según el método FS³.

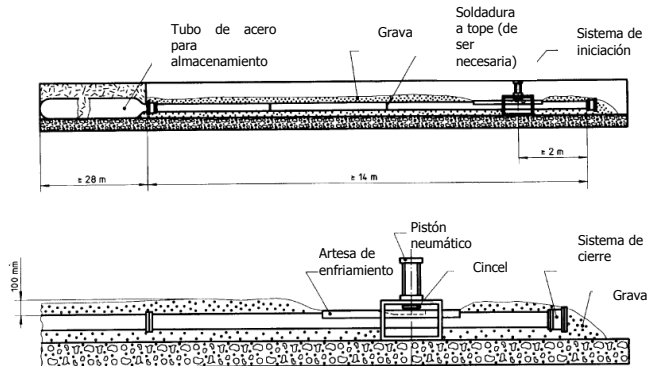


Figura 1: Instalación para ensayo FS

Método a escala reducida S4²: desarrollado como alternativa para minimizar los costos de inversión del método FS y poder establecer una correlación con éste. Utiliza muestras de tubos mucho más pequeñas y una serie de deflectores, descritos en la norma ISO 13477.

La Figura 2 muestra una instalación típica para la medición de RCP a escala reducida.



Figura 2. Equipo de RCP de escala reducida S4

Resultados claves: ya sea que se conduzca un ensayo usando el método de escala real FS o el método de escala reducida S4, existen dos resultados claves usados por la industria de tuberías: la presión crítica y la temperatura crítica.

a) La presión crítica: se obtiene al realizar una serie de ensayos a temperatura constante (usualmente 0°C) y variando la presión interna. A bajas presiones, donde hay una energía insuficiente para impulsar la grieta, apenas ésta inicia, se detiene. A presiones mayores, la grieta se propaga hasta el extremo del tubo. La presión crítica

es la transición entre la grieta detenida a bajas presiones y la propagación a presiones altas (ver Figura 3).

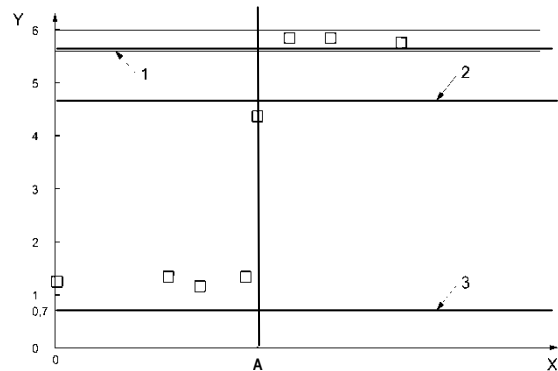


Figura 3. Gráfica típica del ensayo RCP a temperatura constante.

X= Presión de ensayo (bar o psi)
 Y= Longitud grieta/diámetro nominal
 A= Presión crítica (bar o psi)
 1= Longitud mínima de ensayo
 2= Longitud crítica de grieta
 3= Longitud mínima de grieta válida

b) La temperatura crítica: se obtiene al realizar una serie de ensayos a presión constante y variando la temperatura. A bajas temperaturas (rango sub-cero para el PEAD), el material es lo suficientemente frágil como para resistir la propagación de la grieta. A mayores temperaturas la grieta se detiene y apenas se propaga más allá de la longitud de impacto dada por la cuchilla. El punto Tc de la Figura 4 indica la temperatura crítica a la cual la longitud de grieta inducida por el impacto de la cuchilla deja de propagarse (se detiene) por efecto del incremento de la temperatura, observándose una transición que define este valor.

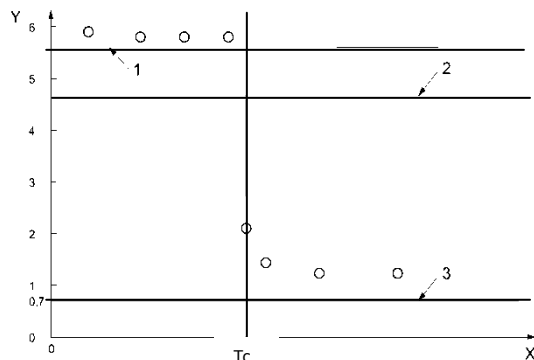


Figura 4. Gráfica típica del ensayo RCP a presión constante.

- X= Temperatura de ensayo (°C)
- Y= Longitud grieta/diámetro nominal
- Tc= Temperatura crítica (°C)
- 1= Longitud mínima de ensayo
- 2= Longitud crítica de grieta
- 3= Longitud mínima de grieta válida

En función de lo expuesto, un evento de RCP es posible si:

- Un sistema de tuberías está operando por debajo de la temperatura crítica, o
- Un sistema de tuberías está operando, o se ensaya, por encima de la presión crítica.

La Figura 5 ilustra las zonas donde puede o no ocurrir RCP en una tubería, dependiendo de las condiciones a la que está expuesta⁷.

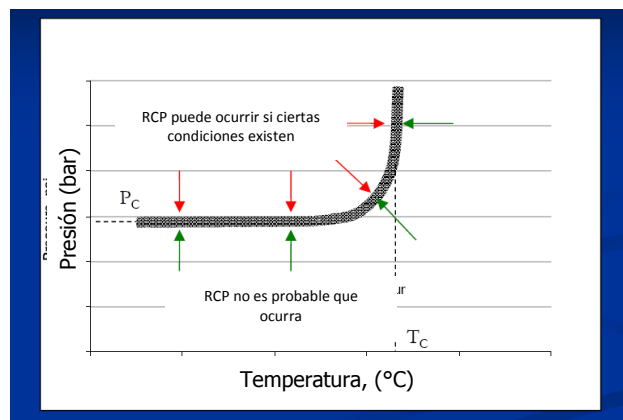


Figura 5. Gráfico presión crítica y temperatura crítica, con zonas de potenciales RCP

3 Tipos de Polietileno

El método a escala reducida S4 ha permitido realizar estudios comparativos de resistencia a RCP entre resinas de polietileno unimodal (un solo reactor) y bimodales (dos reactores) obteniéndose resultados que evidencian una dramática diferencia entre ambos productos¹

La Tabla 1 resume algunos valores típicos de presión crítica (S4 y los correspondientes valores convertidos al ensayo FS) para tipos de PE unimodal y bimodal, obtenidos a partir de ensayos efectuados sobre tubos de 12 pulgadas (Ø305mm) de diámetro nominal y SDR=11.

Tabla 1. Análisis de RCP para tipos de PE

POLIETILENO	P Crítica (S4) a 0°C (bar)	P Crítica (FS) a 0°C (bar)	T Crítica (Tc °C)
Unimodal MDPE	1	6.2	<15
Bimodal MDPE	10	38.6	<-2
Unimodal HDPE	2	9.8	<9
Bimodal HDPE (PE100+)	12	45.8	<-17

Las resinas de polietileno unimodales presentan una distribución de peso molecular (DPM) como la indicada en la Figura 6, donde se aprecia una distribución normal con un solo pico.

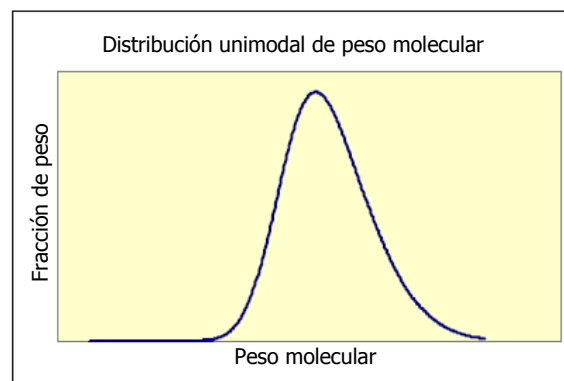


Figura 6. Resina de PE unimodal

Las resinas de PE bimodales presentan una distribución de peso molecular con dos picos, provenientes de la superposición de dos distribuciones de pesos moleculares individuales,

con la distribución del comonomero hacia las fracciones altas del peso molecular. Esta distribución de peso molecular muy particular (ver Figura 7) permite alcanzar propiedades mecánicas superiores sin sacrificar la capacidad de procesamiento de la resina, como es el caso del Venelene 7700M.

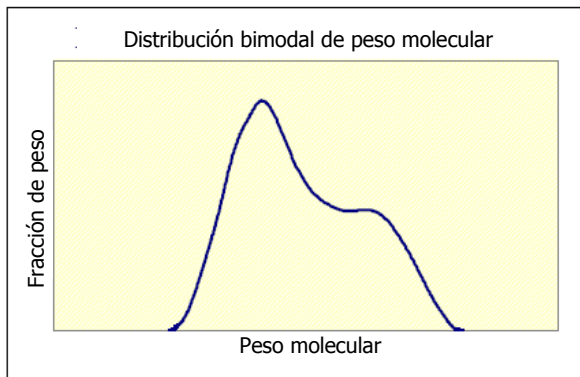


Figura 7. Resina de PE bimodal.

Temperatura Crítica: los eventos de RCP pueden presentarse en tubería de PE fabricadas con resinas unimodales, tipo PE100, a temperaturas por debajo de 15°C (60°F). Según puede observarse en la Figura 8, existen zonas bien identificadas para este tipo de material, donde la zona segura ("safe", color verde) está por encima de los 15°C para tubos mayores a Ø5 pulgadas (127mm) de diámetro⁶.

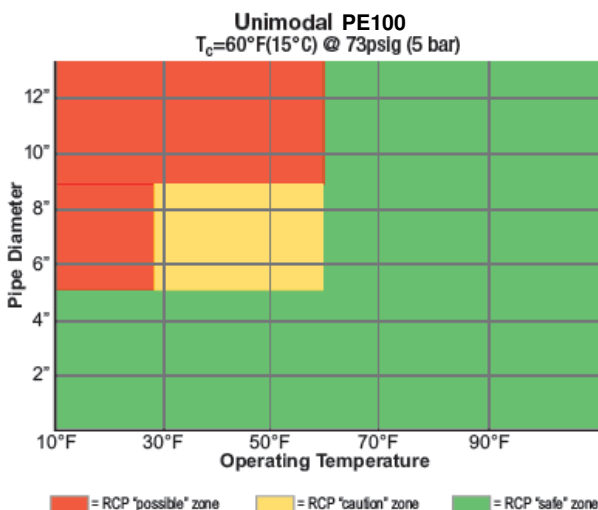


Figura 8. Temperatura crítica para tubos de PE unimodal

Para el caso de tuberías fabricadas con resinas bimodales, la temperatura crítica se sitúa alrededor de -2°C (28°F), con la eliminación de las zonas con posibles eventos RCP ("posible" - roja) para el rango de temperaturas considerado (ver Figura 9).

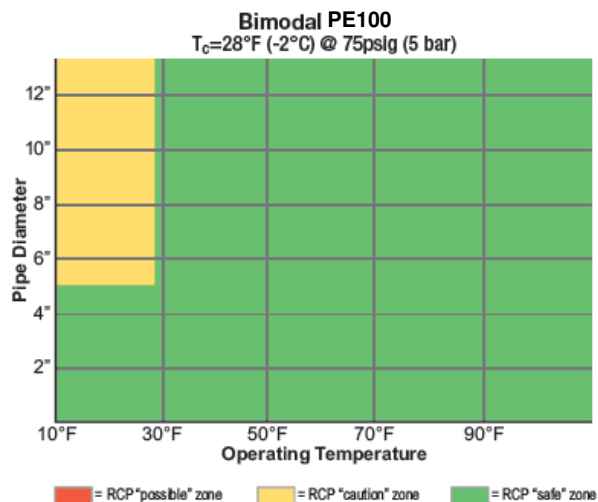


Figura 9. Temperatura crítica para tubos de PE bimodal.

Presión Crítica: en un sistema de tuberías fabricadas con PE 100 unimodal puede ocurrir un evento RCP cuando la presión de operación supera el valor de 90 psi (6 bares) a la temperatura de 0°C (32°F).

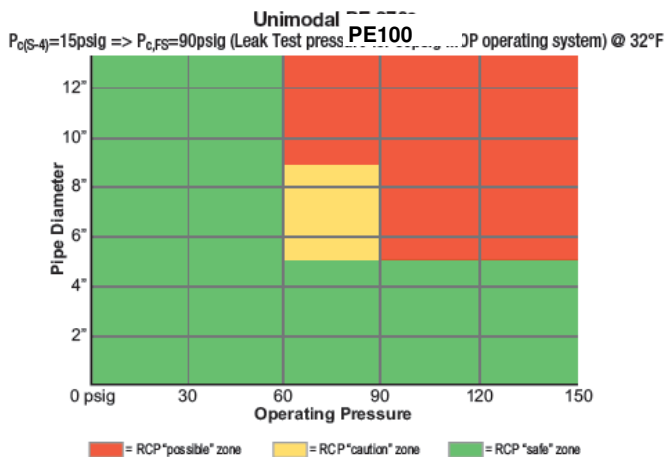


Figura 10. Presión crítica para tubos de PE unimodal.

Adicionalmente, existe una zona entre 60 y 90 psi (4 a 6 bares) llamada "zona de precaución" ("caution - amarilla en Figura 10) que debe considerarse como factor de seguridad de diseño para RCP de 1.5:1, al estimarse el SDR a fabricar.

La Figura 11 indica que no existen zonas críticas para los tubos fabricados con resinas bimodales pues poseen valores de presión crítica hasta de 560 psi (38 bares), a temperaturas de uso de 0°C (32°F).

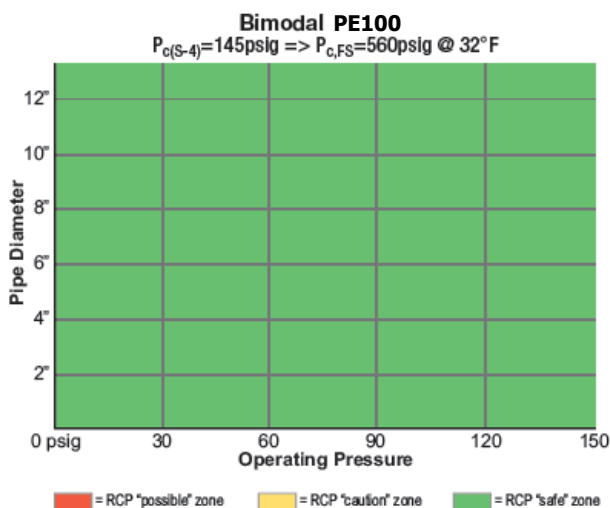


Figura 11. Presión Crítica para tubos de PE bimodal.

4 Resina Venelene 7700M

Polinter ofrece, dentro de sus productos, la resina tipo PE100 Venelene® 7700M, diseñada especialmente para la extrusión de tuberías, cuya caracterización permite identificarla como resina bimodal. Su mayor peso molecular y densidad promueven en los tubos fabricados con Venelene® 7700M un aumento en la resistencia al creep (crecimiento lento de grietas), aplicación de mayores presiones de trabajo y seguridad ante potenciales eventos de RCP.

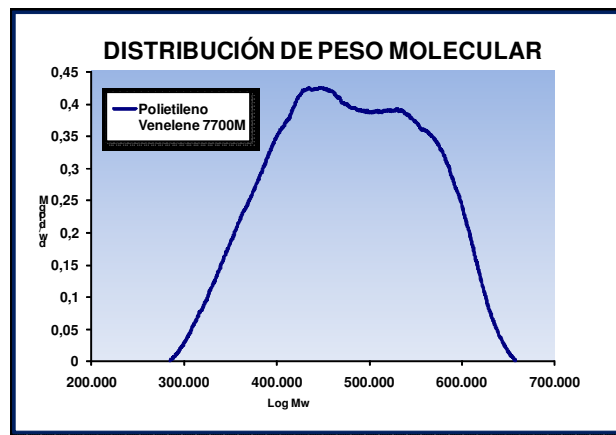


Figura 12. Distribución bimodal del Venelene 7700M

5 Variables que afectan RCP en tuberías de PEAD

Material plástico del tubo: la resistencia al impacto es una medida de la tenacidad de un material y permite detectar cuan frágil o dúctil es una resina y su capacidad para absorber el impacto sin fracturarse. En general, mientras más frágil es un material, más susceptible al RCP. El PEAD para tuberías es un material dúctil con elevada resistencia al impacto.

Dimensiones (diámetro y SDR): los eventos de RCP tienden a aumentar a medida que incrementa el diámetro de la tubería. Estos no ocurren en tuberías de Ø4 pulgadas (Ø100mm). Para transportar agua o gas se debe seleccionar el diámetro con especial cuidado de minimizar los eventos RCP. Para tubos de PEAD se debe

seleccionar un SDR 29 como valor mínimo para manejar la aparición de RCP, empleando valores típicos de 21, 17 y 13,5.

Presión interna: suministra la energía para propagar fisuras en la tubería. A mayor presión interna, mayor es la probabilidad que ocurra un evento de RCP y se debe diseñar considerando esta premisa. Para tuberías de PEAD ensayadas a RCP, el evento ocurre cuando es superada la presión de 600 psi (41 bares) para resinas bimodales (PE100), aspecto que prácticamente anula la aparición del evento para las temperaturas de trabajo usuales.

Temperatura del suelo: para todos los materiales plásticos es más probable que ocurra un evento RCP a temperaturas por debajo de 0°C, donde el material se vuelve frágil. A menor temperatura, mayor es la ocurrencia de RCP.

Aire atrapado en la tubería: debido a la ductilidad de la tubería de PEAD, la falla por RCP no ocurre cuando está totalmente llena de agua. La presencia de pequeñas cantidades de aire ayuda a la propagación de grietas, generando un patrón sinusoidal a lo largo de la tubería.

6 ¿Cómo diseñar tuberías de PEAD para evitar RCP?

- Seleccionar un PE 100 con alta resistencia a RCP. Prefiera PE con DPM bimodal.
- Elija como mínimo un SDR 29, preferiblemente SDR 21, SDR 17 o SDR 13,5.
- Promueva las mejores prácticas de fabricación durante la manufactura de la tubería.

7 Bibliografía

1. Fox, Rob J; Palermo, Gene. (2010). *Canadian standard revised to incorporate higher performance plastic pipe*. Pipeline & Gas Journal.
2. ISO 13477. (1997). *Thermoplastics Pipes for the Conveyance of fluids - Determination of resistance to rapid crack propagation (RCP) - Small - scale steady - state test (S4 test)* . Charlottenlund: Dansk Standard.
3. ISO 13478. (1997). *Tubos termoplásticos para el transporte de fluidos. Determinación de la resistencia a la propagación rápida de fisuras (RCP). Ensayo a escala real (FST)*. Geneve: ISO International.
4. Krishnaswamy, R., Lamborn, M., Sukhadia, A., Register, D., Maeger, P., & Leever, P. (October de 2006). Rapid crack propagation failures in HDPE pipes: structure--property investigations. *Polymer Engineering and Science* .
5. Palermo, G. (2008). Rapid Crack Propagation Increasingly Important in Gas Propagation: A Status Report. *Pipeline & Gas Journal* , 235 (12).
6. *Polypipe Incorporated*. (s.f.). Recuperado el 8 de 02 de 2011, de www.polypipeinc.com
7. Sandstrum, S., & Lively, K. (2009). *Using RCP Data to Design PE Gas Distribution Systems*. Pittsburgh, PA: AGA Operations Conference.

Este Boletín fue elaborado por la Gerencia de Mercadeo de Poliolefinas Internacionales, C.A. (POLINTER), con el apoyo de Investigación y Desarrollo, C.A. (INDESCA), en Caracas- Venezuela, en mayo de 2011.

Si desea hacer algún comentario o sugerencia, agradecemos nos escriba a la dirección electrónica: info@polinter.com.ve, la cual pueden acceder a través de nuestra página web www.polinter.com.ve o a través de nuestro agente comercial: Corporación Americana de Resinas, CORAMER, C.A. (<http://www.coramer.com>)

La información descrita en esta documento es, según nuestro mejor conocimiento, precisa y veraz. Sin embargo, debido a que los usos particulares y condiciones de transformación están enteramente fuera de nuestro control, el ajuste de los parámetros que permiten alcanzar el máximo desempeño de nuestros productos para una aplicación específica, es potestad y responsabilidad del usuario y confiamos en que la información contenida en el mismo sea de su máximo provecho y utilidad.

Para obtener información más detallada de los aspectos de seguridad relativos al manejo y disposición de nuestros productos, le invitamos a consultar las hojas de seguridad (MSDS) de los Polietilenos Venelene®.