

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

¿Qué es el polietileno de alto rendimiento PE4710?

El polietileno de alto rendimiento es un compuesto mejorado de polietileno que se utiliza en tuberías de presión y está designado como PE4710. En comparación con los materiales convencionales de las tuberías de presión tales como PE3408, varias de las características importantes de rendimiento se potenciaron considerablemente. PE3408 no cumple con los requisitos de PE4710.

- Mayor densidad

Su mayor densidad aumenta la resistencia a la tracción, la rigidez y la resistencia química. Las densidades de las resinas base de los materiales de PE3408 (clasificación de celda D 3350 345464) son superiores a los 0,940 a 0,947 gm/cc, y con un 2 % de negro de humo, la densidad es de 0,949 a 0,956 gm/cc. Las densidades de las resinas base de los materiales de PE4710 (clasificación de celda D 3350 445574) son superiores a los 0,947 a 0,955 gm/cc, y con un 2 % de negro de humo, la densidad es superior a los 0,956 a 0,964 gm/cc.

- El crecimiento lento de grietas (Slow Crack Growth, SCG) no puede presentarse antes de que transcurran 50 años.

En los materiales de tuberías de polietileno (PE) de presión, este crecimiento lento de grietas constituye el modo de fallo a largo plazo. SCG no es lo mismo que fragilidad. La tensión causada por factores tales como la presión interna hace que se produzcan y se expandan las grietas en la pared de la tubería donde dicha tensión esté concentrada. Para calificar como PE4710, las pruebas y los análisis deben demostrar que la transición a SCG (un “codo” o caída en la curva de ruptura por tensión) no se presenta antes de que transcurran las 438 000 horas (50 años), que es un aumento de 4 a 1 en comparación con la tubería de polietileno de alta densidad (High-density polyethylene, HDPE), y también deben demostrar que el cálculo de resistencia será correcto por lo menos un 90 % de las veces, que es una reducción del 33 % en la variabilidad permisible de los datos de prueba de la tubería.

Para determinar la base del diseño hidrostático (hydrostatic design basis, HDB), que parte del rendimiento dúctil, se utilizan las normas ASTM D 2837 y PPI TR-3. La HDB de los materiales de tubería termoplástica de presión, entre ellos el PVC, CPVC, PP, PE, ABS, PB, PA, etc., es un régimen de tensión de 100 000 horas para el diseño de las tuberías de presión. El método de la norma ASTM D 2837 no es apto para el tipo de fallo por SCG, por lo cual se debe demostrar la capacidad de ductilidad para obtener el valor de HDB a las 100 000 horas para los materiales de la tubería convencional de HDPE. Para PE4710 se debe demostrar el rendimiento dúctil posterior a los 50 años de uso, que es cuatro veces mayor que la tubería de HDPE convencional. La norma ASTM D 2837 requiere que el análisis de datos demuestre que la HDB sea por lo menos 85 % correcta. Los requisitos de PE4710 especifican que la HDB debe ser por lo menos 90 % correcta.

- Este es un aumento de cincuenta veces la resistencia de SCG.

Los materiales de PE3408 (clasificación de celda D 3350 345444) tienen una resistencia a SCG según PENT (ASTM F 1473) de por lo menos 10 horas. La investigación de la prueba PENT correlaciona empíricamente la resistencia a SCG según PENT de 25-35 horas a 100 años de uso con gas a presión. Los materiales de PE4710 (clasificación de celda D 3350 445474) deben tener como mínimo una resistencia de 500 horas a SCG según la prueba PENT, que es un aumento de 50 a 1. Los compuestos PE4710 de WL Plastics generalmente superan las 2500 horas, con lo cual proporcionan una resistencia a SCG considerablemente mayor que la de los compuestos de PE3408. Esto quiere decir que la posibilidad de fallo por SCG, el modo de fallo a largo plazo de las tuberías de polietileno, es extremadamente remota.

La ventaja del alto rendimiento de PE4710

- La tubería PE4710 tiene un régimen de presión mayor que el de la tubería PE3408 para la misma relación de dimensión (dimension ratio, DR), o proporciona un aumento de la capacidad de flujo para las tuberías PE3408 y PE4710 que tienen regímenes similares de presión.

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

Tabla 1 Regímenes comparativos de presión de las tuberías para agua a 80 °F (26 °C) y menos, psi

DR	7	7,3	9	11	13,5	15,5	17	21	26	32,5
PE4710 PR	336	320	252	202	161	139	126	101	81	64
PE3408 PR	267	254	200	160	128	110	100	80	64	51

Tabla 2 Aumento de la capacidad de circulación de agua de PE4710 vs. PE3408, %

Presión del sistema, psi	100	150	200	250
Aumento de la capacidad de PE4710 vs. PE3408, %	7,5	10,8	15,4	19,8

¿Por qué PE4710 tiene un régimen de presión mayor?

En Norteamérica, el régimen de presión de las tuberías se determina a partir de la tensión del diseño hidrostático (HDS) para el material y la aplicación. La HDS es la HDB multiplicada por un factor de diseño (design factor, DF) para una aplicación. Se usa un multiplicador de factor de diseño para evitar la confusión con los factores de seguridad que generalmente se aplican como divisores a fin de reducir la resistencia mecánica a corto plazo. Los factores de diseño pueden variar en función de los distintos requisitos regulatorios y aplicaciones.

En las etapas iniciales de la industria de la tubería termoplástica, hace aproximadamente cincuenta años, la Junta para Tensión Hidrostática de PPI desarrolló factores de diseño que resolvieran las reducciones de los regímenes de tensión del diseño producidos en el laboratorio y la falta de precisión en los materiales, la fabricación de la tubería, la manipulación, la instalación, y las características de operación de las aplicaciones, además de los factores desconocidos. Como resultado, se obtuvo un factor de diseño de 0,50 para la tubería termoplástica para agua bajo presión que se usa en la mayoría de los materiales termoplásticos de tubería bajo presión en toda Norteamérica. Se desarrolló al determinar los factores de diseño de los componentes para el uso con agua, del modo siguiente:

- Base de partida de 1,00
- 0,25 para la variabilidad de los materiales entre un lote y otro, y para la variabilidad en las pruebas y los métodos de prueba
- 0,05 para la variación en la calidad de la extrusión
- 0,10 para aumentar la HDB de 11,4 años a 50 años
- 0,20 para las variaciones de aumentos repentinos de presión (basado en la capacidad de golpe de ariete del PVC)
- 0,20 para la manipulación y la instalación
- 0,20 para factores desconocidos

La suma de los valores para estos componentes produce el factor total de diseño que es 2,00. El inverso es 0,50. A lo largo de los años, el factor de diseño de 0,50 ha demostrado ser un valor conservador y en general satisfactorio para los materiales termoplásticos de tuberías para agua, entre ellos el PVC, CPVC, ABS, PP y el polietileno convencional, y para las aplicaciones generales de las tuberías termoplásticas de presión.

Sin embargo, como se indicó anteriormente, los materiales de PE4710 demuestran un mayor nivel de rendimiento, ductilidad superior y resistencia a las fracturas ante mayor tensión. Estas propiedades de mayor rendimiento permiten un aumento de la presión interna sin que se corra el riesgo de una reducción en la vida útil del producto. Los materiales de PE4710 deben demostrar un mayor rendimiento al reunir los requisitos de normas más altas de PPI para un factor de diseño de 0,63 para agua y aplicaciones similares. El factor de diseño de 0,63 se determina del modo siguiente, usando la misma base técnica del factor de diseño de 0,50:

- Base de partida de 1,00

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

- 0,25 para la variabilidad en las pruebas y los métodos de prueba, y las variaciones de los materiales entre un lote y otro.

Los requisitos considerablemente mayores para la calidad de los datos de prueba de las tuberías para la base del diseño hidrostático, y para el análisis y la evidencia de la comprobación de ductilidad superior a los 50 años reducen la variabilidad de los materiales y no requieren un componente de factor del diseño que prolongue dicha base del diseño hidrostático a un valor de 50 años.

- 0,05 para la variación en la calidad de la extrusión

Se reducen las variaciones entre un lote y otro de los materiales, con lo cual la capacidad de procesamiento de tales materiales es más uniforme, y se reduce también el componente del factor del diseño de la variabilidad de la calidad de la extrusión.

- 0,30 para la operación, la manipulación, la instalación y factores desconocidos.

El factor del diseño original de 0,50 asigna 0,20 a la tolerancia de aumentos repentinos, 0,20 a la manipulación y la instalación y 0,20 a los factores desconocidos. Sin embargo, la tolerancia de aumentos repentinos de 0,20 se basa en la restricción de la presión de aumentos repentinos del PVC para prevenir las explosiones y la separación de las juntas. En contraste, los materiales de polietileno de alto rendimiento toleran aumentos repentinos de la presión mucho mayores y las juntas de tuberías están completamente sujetadas. Para un sistema de agua común de 100 psi, PE4710 tolera aumentos repentinos momentáneos de presión superiores al régimen de presión constante de los cambios instantáneos de velocidad del agua hasta 10 pies por segundo.

Las tolerancias restantes para la manipulación, la instalación y los factores desconocidos se combinan en un valor de 0,30. Los materiales de PE4710 tienen mayor densidad, mayor peso molecular y mayor resistencia a la SCG, lo cual a su vez produce mayor dureza, mejor resistencia a la abrasión y a las sustancias químicas, y un mejor rendimiento a altas temperaturas. Así se asegura que las tuberías PE4710 tengan una clasificación conservadora para la aplicación, y que los mayores regímenes de presión del factor del diseño de 0,63 se deriven sin que aumenten los riesgos.

Esta derivación produce un factor total conservador de diseño para servicio de agua de 1,60 (0,63 DF) para PE4710 *sin aumento del riesgo de fallo prematuro ni reducción del potencial de vida útil.*

Las tuberías termoplásticas reciben una clasificación de presión que utiliza la HDB, DF y DR de la tubería del modo siguiente:

$$PR = \frac{2 \times HDB \times DF}{(DR - 1)} = \frac{2 \times HDS}{(DR - 1)}$$

Por lo tanto, los regímenes de presión para las tuberías PE4710 y PE3408 con DR 11 utilizadas con agua a temperatura ambiente son:

$$\text{PE4710 RD 11: } PR = \frac{2 \times 1000}{(11 - 1)} = 200 \text{ psi}$$

$$\text{PE3408 RD 11: } PR = \frac{2 \times 800}{(11 - 1)} = 160 \text{ psi}$$

PE4710 vs. PE100 – Realidad vs. mito

Se han creado algunos mitos en relación a PE100 en Norteamérica, principalmente debido a falta de conocimiento y comprensión. PE100 es una designación de ISO para una clasificación de material de polietileno apto para resistir presión. Esta designación significa simplemente que el material es polietileno (PE) y que califica para un valor mínimo de resistencia requerido (Minimum Required Strength, MRS) de 10 MPa (100 bar, 1450 psi) a 20 °C (68 °F). No significa nada más. También existen los materiales de polietileno PE80 y PE63, cuyos valores MRS son de 8,0 MPa

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

(80 bar, 1160 psi) y 6,3 MPa (63 bar, 914 psi) respectivamente, a 20 °C (68 °F). El MRS (valor mínimo de resistencia requerido) es un valor de resistencia categorizado a largo plazo, similar a la base del diseño hidrostático, pero desarrollada mediante los estándares ISO 9080 y 12162, los cuales son bastante similares a la norma ASTM D 2837 cuando se combinan. Sin embargo, estos dos valores, MRS y HDB, **no** son idénticos. Estas son algunas de las diferencias entre los métodos de la organización ISO y la ASTM para caracterizar la resistencia de los materiales a largo plazo:

- **Temperatura nominal: MRS a 20 °C (68 °F) vs. HDB a 23 °C (73 °F)**

La resistencia de todos los materiales termoplásticos es mayor a menor temperatura.

- **Tiempo nominal: MRS a 50 años (438 300 horas) vs. HDB a 11,4 años (100 000 horas)**

Los valores de resistencia del material de MRS y HDB a largo plazo se basan en proyecciones estadísticas (cálculos aproximados) de resistencia para el futuro. ISO se vale de una fórmula estadística más compleja y prolonga el cálculo aproximado a una fecha más lejana en el futuro, pero a medida que los cálculos estadísticos aproximados se alejan más y más en el futuro, disminuye la exactitud de la predicción y su fiabilidad. Tanto para los métodos de ISO y ASTM, la proyección de resistencia futura se realiza en escalas logarítmicas, es decir, cada aumento de puntos de escala es de 10 a 1: 1, 10, 100, 1000, 10 000, 100 000, 1 000 000, etc. Para los dos métodos, es necesario contar con datos de prueba de hasta 10 000 horas. En general, la fiabilidad de las proyecciones al siguiente punto de escala (10 veces más) es buena. Para aumentar la fiabilidad de la proyección más allá del primer punto de escala, ISO aplica límites un poco más estrictos a la variabilidad de los datos y determina el valor MRS con un límite de confianza menor. HDB es un valor medio (promedio).

- **Validación: ISO permite un “codo” de transición de dúctil a quebradizo dentro del período nominal. ASTM no lo permite.**

La fórmula ISO 9080 para calcular la resistencia a largo plazo en el futuro permite el uso de datos de fallo por rotura (SCG o crecimiento lento de grietas) y de fallo por ductilidad, y permite que haya un codo o caída en la curva de rotura por tensión antes del tiempo nominal previsto. El método de ASTM D 2837 requiere que haya validación para demostrar que no haya un codo en la curva de rotura por tensión durante el período nominal. La evidencia demuestra que la curva de rotura por tensión se prolonga a 50 años antes de que se presente el fallo por SCG.

- **Los valores MRS y HDB no son idénticos y carecen de equivalentes**

debido a que los métodos estadísticos utilizados para determinar los valores MRS y HDB son diferentes. Sin embargo, el mismo material puede clasificarse en ambos sistemas. En el sistema de ISO, PE3408 puede ser PE80 o PE100. Del mismo modo, PE100 puede ser PE4710 o PE3408 en el sistema de ASTM.

- **MITO: los materiales de polietileno de PE100 son de alto rendimiento.**

PE100 identifica solamente un material y un valor de resistencia. Ningún elemento de la designación PE100 o del método de régimen de tensión de ISO identifica propiedades de alto rendimiento ni establece requisitos de alto rendimiento. No obstante, la designación PE4710 solo puede obtenerse si se cumplen requisitos de alto rendimiento. Solamente califican como PE4710 los mejores materiales PE100.

- **MITO: el régimen de presión de la tubería PE100 es mayor.**

ISO 12162 aplica un divisor mínimo de coeficiente de diseño de 1,25 para el polietileno clasificado para valor mínimo de resistencia (MRS), y también recomienda que el diseñador del sistema aumente el coeficiente del diseño en función de las condiciones de uso, la instalación y la manipulación. Al usar únicamente el coeficiente mínimo de diseño se tiene en cuenta solo la variabilidad del material. Por lo tanto, es posible que no sea adecuado para las condiciones de campo. El coeficiente de diseño de PE100 para su uso en agua en condiciones de campo debe ser de 1,73 (0,58 DF), aplicado al valor MRS según ISO, al efectuar la comparación con los componentes adicionales del factor de diseño que se incorporan en este factor de 0,50 en Norteamérica para los materiales termoplásticos convencionales, al añadir los componentes del factor de diseño necesarios

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

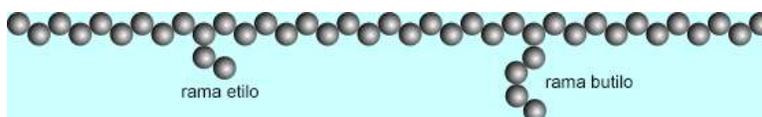
para la variabilidad de la extrusión (0,05), la manipulación y la instalación (0,20), y las condiciones desconocidas (0,20), y al ajustar el valor MRS a 23 °C (0,03). (Nota: En el factor de diseño de 0,50 para Norteamérica se incluye un componente adicional de 0,20 para aumentos repentinos de presión). **Los regímenes de presión para la tubería PE100 son comparables a los regímenes para la tubería PE3408 cuando el régimen de presión según ISO se ajusta a la misma temperatura y el coeficiente de diseño de ISO incluye los componentes relacionados con las condiciones de aplicación en el campo ya integrados en el factor de diseño de Norteamérica.**

Tabla 3 Regímenes comparativos de presión de las tuberías de polietileno para agua a 23 °C (73 °F), psi

DR	7	7,3	9	11	13,5	15,5	17	21	26	32,5
PE100	279	266	209	167	134	116	105	84	67	53
PE3408	267	254	200	160	128	110	100	80	64	51
PE4710	336	320	252	202	161	139	126	101	81	64

¿Cómo se produce la tubería PE4710 de alto rendimiento?

El rendimiento del material de polietileno depende de la estructura molecular de este. Las moléculas de polietileno son cadenas largas de carbono con ramificaciones de la cadena lateral. El peso molecular (molecular weight, MW) corresponde al peso total de los átomos en la cadena molecular, incluidas las ramificaciones de la cadena lateral.



Los materiales de la tubería de polietileno se producen en reactores de polímeros. La longitud molecular (el peso) varía durante la producción. La variación total del peso molecular se describe en términos estadísticos como distribución del peso molecular (molecular weight distribution, MWD). La curva típica de MWD tiene una forma de campana característica.

Durante años, con la tecnología de reactores de polietileno se produjeron materiales de polietileno “monomodo”, lo que quiere decir que la curva de MWD tenía forma de campana, con una cresta. Sin embargo, en la década pasada se desarrolló una nueva tecnología en la que se usan dos reactores de polímeros para producir polietileno con una singular distribución de peso molecular “bimodo”, además de propiedades físicas mejoradas.

Las propiedades del polietileno dependen de las interrelaciones entre las propiedades de densidad, peso molecular, distribución del peso molecular, ubicación y tipo de ramificaciones de la cadena lateral de la molécula de polietileno. Al aumentar la densidad se crea una mayor resistencia a corto plazo, pero se reduce la resistencia a largo plazo. Al aumentar el peso molecular se mejora la resistencia a largo plazo, pero se reduce la capacidad de procesamiento en el interior de la tubería y de unión de las tuberías mediante fusión térmica. Un valor MWD más amplio (o sea, una campana más ancha) mejora la capacidad de procesamiento. Por último, el tipo y la ubicación de las ramificaciones de la cadena lateral de la molécula de polietileno afectan la resistencia para retardar la expansión de grietas, que es el modo de fallo a largo plazo de la tubería de polietileno.

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

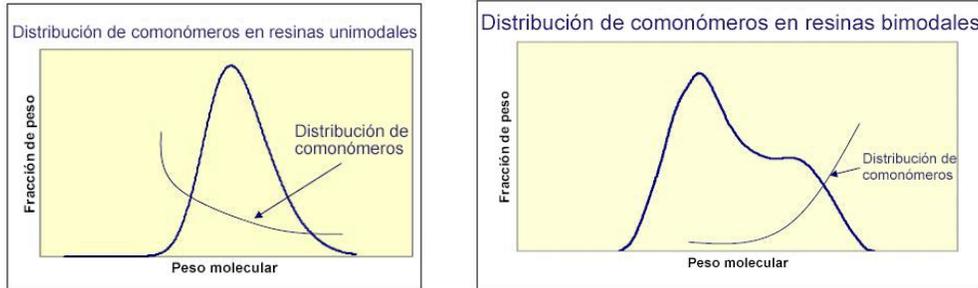


Figura 1 Distribución de peso molecular unimodal y bimodal¹

Se descubrió que el procesamiento de polietileno en un solo reactor (tecnología monomodo) generalmente colocaba ramificaciones de la cadena lateral en las moléculas más cortas, en las que la resistencia a SCG sufría el menor impacto. Existe una nueva tecnología para materiales de alto rendimiento PE4710 bimodo en la que se utilizan dos reactores de polímeros en serie. Mediante esta nueva tecnología, las ramificaciones de la cadena lateral generalmente se colocan en las moléculas de mayor longitud, con lo cual se aumenta en gran medida la resistencia a SCG. Es posible obtener un valor diez veces mayor (incluso más) en la resistencia a SCG. Asimismo, con la nueva tecnología bimodo de doble reactor, la densidad puede aumentarse, con lo que aumentan también la resistencia a la tracción y a las sustancias químicas. Además, se conserva la resistencia a largo plazo e incluso puede mejorarse significativamente.

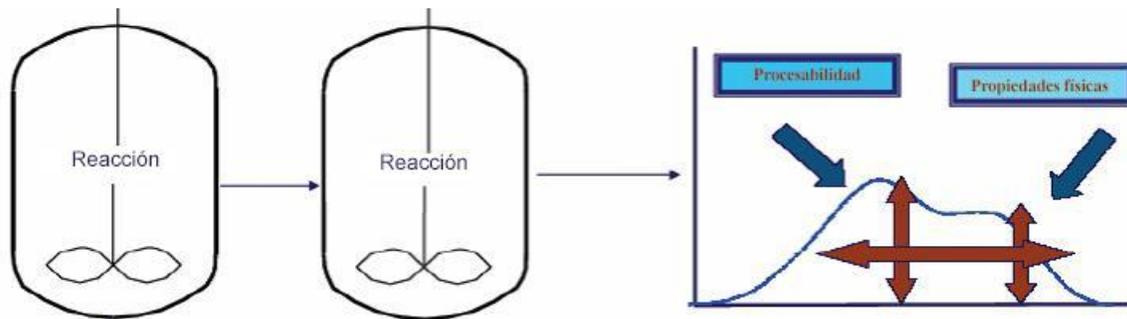


Figura 2 Tecnología bimodal de doble reactor del PE4710¹

WL123 – POLIETILENO DE ALTO RENDIMIENTO PE4710

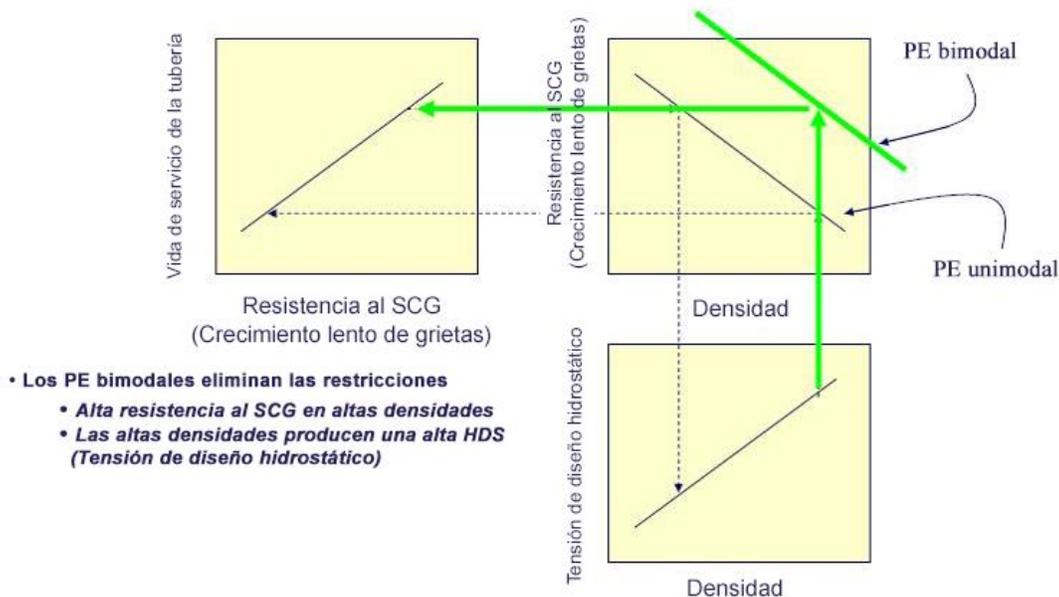


Figura 3 Relaciones de las propiedades físicas - Tecnologías unimodal y bimodal¹

¿Qué pasará en el futuro?

Los materiales de alto rendimiento PE4710 son el siguiente paso evolutivo en tuberías de polietileno, con regímenes mayores de presión, mayor capacidad de circulación y rendimiento mejorado a largo plazo: todo ello sin sacrificar las ventajas tradicionales de flexibilidad, unión de fusión térmica a prueba de fugas, resistencia a las sustancias químicas y facilidad de instalación. Gracias al establecimiento de características y requisitos de rendimiento para los materiales PE4710, las especificaciones de los materiales y las tuberías están actualizándose para incluir PE4710, además de los códigos para aplicaciones como gas y agua, que se actualizarán más adelante. Por último, los productos PE4710 no pueden usarse correctamente sin contar con información técnica precisa y útil. Es necesario proporcionar capacitación para que la industria pueda comprender y conocer la forma de utilizar correctamente los productos PE4710 para aprovecharlos al máximo. WL Plastics, los proveedores de resinas, Plastics Pipe Institute (PPI), las organizaciones a cargo de formular normas tales como ASTM y AWWA, las instituciones que expiden certificaciones tales como NSF, las que expiden los códigos y otras organizaciones, están trabajando para ofrecer los beneficios de la tubería PE4710 de alto rendimiento a clientes tanto de Norteamérica como del resto del mundo.

Esta publicación tiene como fin servir de guía para los sistemas de tuberías. No debe utilizarse como reemplazo al criterio o asesoramiento de un ingeniero profesional, ni tiene como fin servir de instrucciones de instalación. La información incluida en esta publicación no constituye una garantía ni un aval para las instalaciones de tubería y no puede garantizarse debido a que las condiciones de uso están fuera de nuestro control. El usuario de esta información asume todos los riesgos asociados con su uso. WL Plastics Corporation ha hecho el mayor esfuerzo posible por garantizar su exactitud, pero es posible que la información incluida en esta publicación no esté completa, en especial si se trata de usos especiales o poco comunes. Esta publicación puede estar sujeta a cambios cada cierto tiempo sin aviso previo. Comuníquese con WL Plastics Corporation para verificar si usted tiene la edición más actualizada. Está permitida su reproducción sin modificaciones.



¹ Las figuras 1, 2 y 3 son cortesía de Lyondell Basell Chemical Company.