



Evaluación de la Integridad Mecánica de la Tubería de Polietileno Expuesta a GLP

Julio César Pérez Angulo -CIG
Jorge E. Castellanos Hernández - EXTRUCOL
Manuel E. Cabarcas Simancas - CIG
Javier Augusto Lesmes - CIG
Moisés Rocha Carrascal - CIG

Centro de Investigación del Gas – CIG
Universidad Industrial de Santander
EXTRUCOL S.A.

INTRODUCCIÓN

Las tuberías de polietileno (PE) se han usado en líneas de distribución de GLP (gas licuado del petróleo) y gas natural desde los años cincuenta y sesenta en los Estados Unidos y a partir de finales de los años sesenta en Colombia. La tercera parte de las tuberías de distribución de gas en servicio y el 100% de las nuevas líneas de distribución son de polietileno. Las razones que han incrementado la popularidad de los materiales de polietileno para tales aplicaciones son su alto desempeño y mínimos costos de operación.

Es ampliamente conocido que los polímeros son permeables a los gases. En particular, se sabe que el polietileno es permeable al metano, etano, propano y demás gases hidrocarburos. Sin embargo, la tasa de difusión a través de las paredes de la tubería es muy pequeña y no se pierden cantidades significativas del gas que representen riesgos operacionales o públicos. A pesar de todo, desde hace algunos años se han registrado por parte de algunas compañías distribuidoras de gas ciertas inquietudes durante el proceso de unión por termofusión en tuberías que han estado previamente en funcionamiento.

En estas situaciones, al final de la fase de calentamiento, justo antes de la fusión, las superficies recién calentadas sufren anomalías debido a la aparición de burbujas sobre la superficie fundida.

La empresa Extrucol (Colombiana de Extrusión S. A.) dedicada desde hace más de catorce años a la fabricación de tuberías de polietileno para el transporte y distribución de gas natural y GLP a bajas presiones, en algunas ocasiones ha recibido de sus clientes la misma inquietud sobre la aparición de burbujas en los rebordes de la tubería al momento de la unión por termofusión pero en tuberías expuestas previamente a GLP gaseoso. Por esta razón y dado que es un compromiso del fabricante de tuberías entregar al cliente las condiciones de servicio bajo las cuales se garantiza la integridad y resistencia de las líneas de distribución, la empresa Extrucol encomendó al Centro de Investigación del Gas de la UIS emprender un proyecto de investigación que permita determinar:

- Si la presencia de las burbujas compromete la integridad de la fusión.
- El componente o los componentes gaseosos

responsables de las burbujas.

- Establecer las condiciones de operación óptimas de la tubería para el transporte de GLP.
- Las recomendaciones de campo para realizar las termofusiones.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Equipo Experimental

Sistema de inmersión de tubería en GLP

La ejecución del plan de trabajo propuesto requirió la construcción de un sistema para sumergir la tubería de polietileno en GLP por diferentes periodos de tiempo. En la figura 1 se muestra el sistema de inmersión.

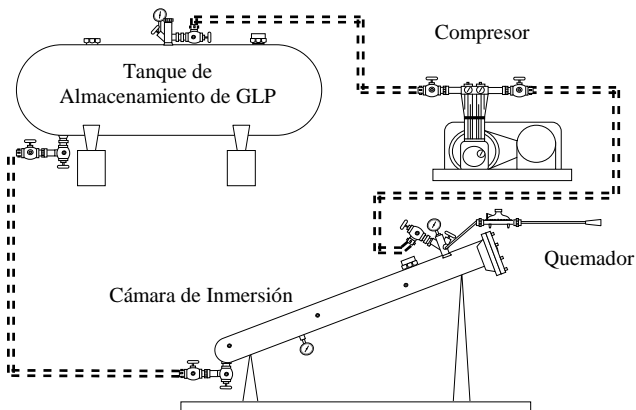


FIGURA 1. Diagrama del sistema de inmersión en GLP.

Se utilizó GLP líquido para acelerar el proceso de absorción de GLP en polietileno. Esto fue una necesidad debido a que la exposición a GLP gaseoso retardaría el proceso de absorción por años.

Los diámetros nominales de la tubería sumergida fueron 3 y 4 pulgadas en PE80 y 90 mm en PE100. También se probaron uniones socket y de electrofusión.

Por medio del Análisis Termogravimétrico y Cromatografía se detectaron los compuestos absorbidos en la tubería. La extracción de los compuestos se hizo mediante las técnicas de microextracción en fase sólida (SPME).

Modelo matemático de absorción de gases en tubería de polietileno.

Debido a la falta de modelos matemáticos en la literatura para simular la absorción de mezclas multicomponentes, el proceso de absorción de GLP a lo largo de una tubería de polietileno debió asimilarse al proceso de absorción de un único compuesto en un cilindro hueco de longitud infinita. Carslaw y Jaeger [1] dedujeron las ecuaciones para simular el proceso de absorción en este tipo de sistemas.

Dada la complejidad del modelo matemático de difusión de gases en polietileno, se hizo necesario desarrollar un software capaz de predecir el comportamiento de la tubería bajo diferentes esquemas o condiciones de operación.

Este *software*, además de contener el modelo matemático, también incluye correlaciones apropiadas para la solubilidad y difusión de los componentes del GLP en polietileno.

Ensayo de Tensión.

El ensayo de tensión se utiliza para evaluar la resistencia de las termofusiones a tope en tubería de polietileno. En esta prueba una probeta del material a ensayar se rompe por el sitio de unión o pega, en un periodo de tiempo relativamente corto a una velocidad constante.

En la figura 2 se muestra el tipo de probeta.

Se realizaron dos tipos de uniones: servicio – servicio SS y servicio – nueva SN; la primera, entre dos tramos expuestos al mismo tiempo de inmersión y la segunda, entre un tramo de tubería expuesto y uno no expuesto a GLP.

Adicionalmente, se decidió someter a ensayo de tensión muestras tomadas de tubería (sin unión) para evaluar la degradación de la resistencia.

El factor de resistencia de la pega establecido por la norma UNI 10520, se define como la resistencia de la unión dividida sobre la resistencia de la tubería sin unión,

$$F = \frac{\text{Esfuerzo de la pega}}{\text{Esfuerzo del tubo sin pega}}$$

y el mínimo valor permisible es 0.9.

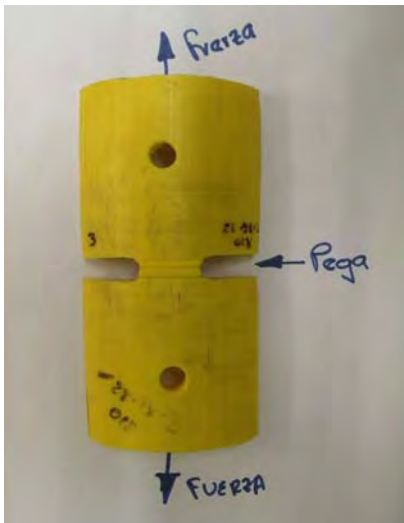


FIGURA 2. Probeta para ensayos de tensión tope.

Un segundo criterio que se utilizó para la evaluación de la tubería fue el establecido por la norma ISO/DIS 13953, el cual califica la calidad de la fusión de acuerdo a la forma en que ésta falla en el ensayo; los tipos de falla están categorizados como ALTA DUCTILIDAD, DÚCTIL, BAJA DUCTILIDAD, DÚCTIL – FRÁGIL, FRÁGIL y ALTAMENTE FRÁGIL. Los tipos de fallas

aceptables son: alta ductilidad, dúctil y baja ductilidad.

RESULTADOS

Ensayo de Tensión

De acuerdo con la metodología planteada, a partir de este ensayo se obtuvo la resistencia de la tubería y de las uniones en función del tiempo de exposición de la tubería al GLP.

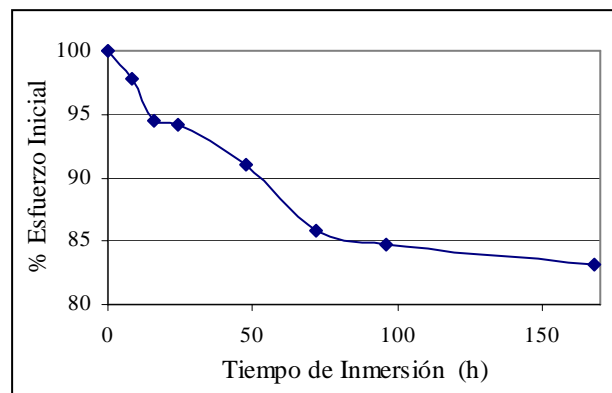


FIGURA 3. % Esfuerzo inicial vs. tiempo de inmersión, tubería de 3 pulgadas.

En la Figura 3 se observa una disminución del esfuerzo de la tubería a medida que aumenta el tiempo de inmersión.

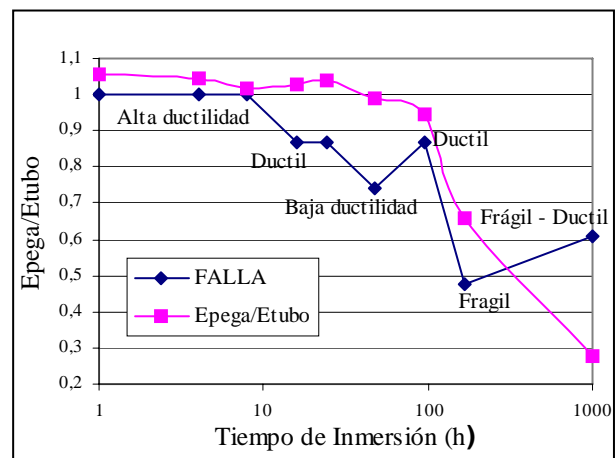


FIGURA 4. E.pega/E.tubo vs. tiempo de inmersión, uniones servicio – servicio, tubería de 3 pulgadas.

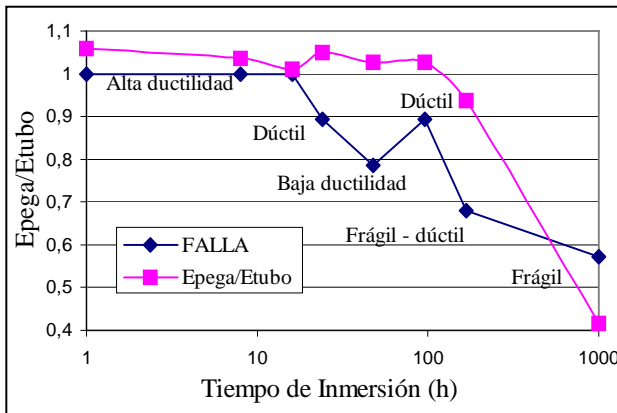


FIGURA 5. E.pega/E.tubo vs. tiempo de inmersión, uniones servicio – nueva, tubería de 3 pulgadas.

Se observó la aparición de burbujas en las uniones de tubería; también se observó que a medida que aumenta el tiempo de exposición de la tubería al GLP; el número y tamaño de las burbujas es cada vez mayor, el factor F de resistencia de la pega disminuye y el tipo de falla cambia de la zona dúctil a la frágil. Ver Figuras 4 y 5. En la figura 6 se muestra el mayor tamaño de burbujas observado en la investigación, correspondiente a un tiempo de inmersión de 1000 horas.



FIGURA 6. Abundante burbujeo en una unión servicio – servicio expuesta a mil horas de inmersión.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

El resultado directo obtenido del análisis TGA fue la concentración de GLP absorbida por la tubería en función del tiempo de inmersión. En la figura 7 se muestra el comportamiento de la concentración de GLP en función del tiempo de exposición para la tubería de 3 pulgadas, el tiempo de inmersión igual a cero corresponde a la tubería sin exposición a GLP que se tomó como referencia (muestra blanco).

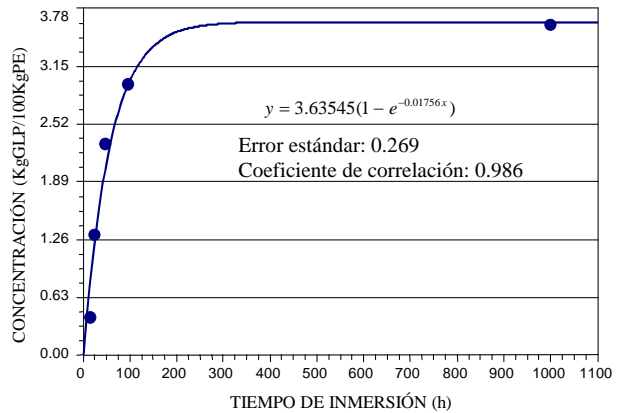


FIGURA 7. Comportamiento de la concentración de GLP en tubería de 3 pulgadas.

A partir de las figuras de Epega/Etubo vs. tiempo de inmersión y de las figuras de Concentración de GLP vs. tiempo de inmersión, se obtiene el comportamiento del esfuerzo en función de la concentración de GLP absorbida. La figura 8 muestra dicho comportamiento para cada tipo de unión y en este caso para tubería de 3 pulgadas.

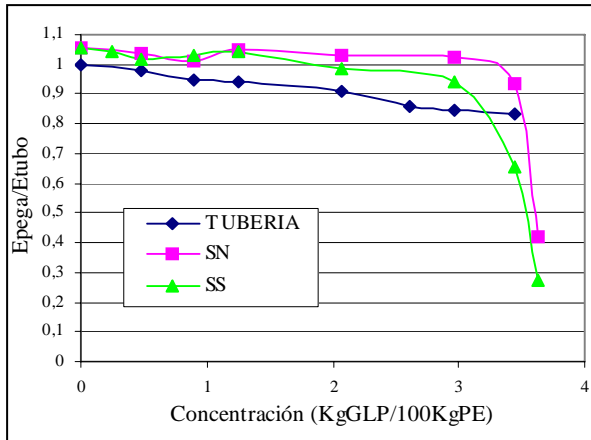


FIGURA 8. E.pegar/E.tubo vs. Concentración de GLP. Tubería de 3 pulgadas.

El valor de la concentración crítica de GLP que compromete la integridad mecánica de las uniones en tubería de polietileno se determina a partir de la norma UNI 10520, que regula la calidad de las uniones por termofusión a tope de tuberías de polietileno para el transporte de gases combustibles. Esta norma establece que el mínimo valor permisible para la relación E.pegar/E.tubo es de 0.9. En la tabla 1 se muestran las concentraciones críticas para los diferentes tipos de uniones y tubería.

TABLA 1. Concentración crítica de GLP en polietileno.

Tipo de Unión	Concentración crítica (KgGLP/100KgPE)	
	3 pulgadas	4 pulgadas
Unión SS	3.02	2.79
Unión SN	3.51	2.81
Tubería	1.99	2.49

Validación del modelo matemático.

Con base en los resultados de las pruebas con GLP gaseoso, se llevaron a cabo las simulaciones para validar el desempeño del modelo matemático. Las entradas del software consisten básicamente en propiedades de la tubería, propiedades del gas penetrante y condiciones de operación del sistema. Entre las propiedades del gas se encuentran el peso molecular, la temperatura crítica, el diámetro de

molécula y la fracción molar del gas en la mezcla. Se trató la mezcla como un pseudocomponente y como el n-butano. En la figura 9 se presentan los resultados de la simulación de las dos situaciones.

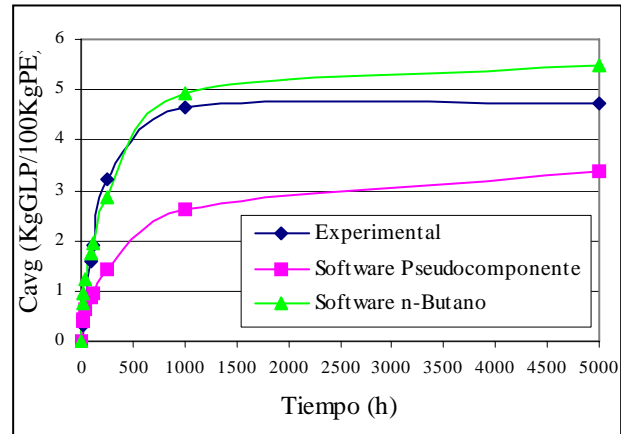


FIGURA 9. Concentración promedio de GLP vs. tiempo de exposición a GLP gas en tubería de 3 pulgadas PE 80.

Presión óptima de operación.

De acuerdo a la simulación del proceso de absorción de gas en tubería PE 80 para el caso del n-Butano. Se puede deducir que la tubería PE 80 de 3 y 4 pulgadas fabricada por la empresa Extrucol no sufrirá ninguna degradación mecánica de su resistencia, siempre y cuando la presión de operación del sistema sea inferior a la presión de rocío del GLP a la temperatura de trabajo.

ENSAYO DE TENSIÓN SOBRE UNIONES A TOPE DE TUBERÍA PE 100

Un tramo de tubería de 90 mm PE 100 se sumergió durante 186 h con el fin de comparar el comportamiento de las uniones hechas a partir de ella con respecto a las realizadas con tubería de 3 pulgadas PE 80. En la tabla 2 se presenta la comparación entre los dos tipos de tubería teniendo en cuenta los diferentes tipos de unión.

Tabla 2. Tabla comparativa entre los datos del ensayo de Tensión para tuberías de PE 80 y PE 100, respectivamente.

Unión	Tubería PE80 de 3 pulg		Tubería PE100 de 90 mm	
	Tinmersión (h)	Epega/Etubo	Tinmersión (h)	Epega/Etubo
NN	0	1.058	0	0.962
SS	168	0.657	186	0,843
SN	168	0.938	186	0,950

En general, las uniones de tubería PE 100 presentan mayor cantidad de burbujas (aunque de menor tamaño) que las observadas en uniones de tubería PE 80. Sin embargo, las uniones de tubería PE 100 presentan valores del factor de esfuerzo considerablemente mas altos que las uniones de tubería PE 80. Teniendo en cuenta que el tiempo de exposición para el PE100 fue mayor, esto demuestra que la tubería PE 100 puede permanecer expuesta a GLP por periodos de tiempo más largos que la tubería PE 80 sin sufrir una degradación significativa de su resistencia mecánica.

PRUEBA DE ANILLO MUESCADO SOBRE TUBERÍA PE 80 Y PE 100

Tabla 3. Registro de los datos del ensayo de Tensión en anillo muescado. Tuberías de 3 y 4 pulgadas PE 80 y PE 100 expuestas a GLP líquido.

	Tinmersión (h)	3 pulgadas ó 90 mm	4 pulgadas
		% Disminución en Tensión	% Disminución en Tensión
PE 80	0 (blanco)	0	0
	96	19	16
PE100	0 (blanco)	0	
	186	15	

Los resultados mostrados en la tabla 3 de esta prueba confirman un mejor desempeño de la tubería PE 100 sobre la tubería PE80. Es de resaltar que la tubería PE100 se expuso durante 186 h al contacto con GLP líquido mientras que

la tubería PE80 se expuso solamente durante 96 h y sin embargo los valores del factor de resistencia de la tubería PE 100 son más altos que los de la tubería PE 80.

UNIONES POR ELECTROFUSIÓN SOBRE TUBERÍA PE 80

Las uniones por electrofusión se presentan como una alternativa a seguir para mitigar la degradación mecánica de las uniones por termofusión. El ensayo de decohesión sobre las uniones por electrofusión se realizó siguiendo la norma ISO 13955. La norma ISO 8085-3.3 establece que el máximo porcentaje de decohesión permitido para asegurar la calidad de la unión es del 33.33%. Ver tabla 4

Tabla 4. Registro de los datos del ensayo de Decohesión sobre tubería de 25 mm y 3 Pulg. PE 80 expuesta a GLP líquido durante 186 hrs.

	25 mm	3 pulg.
Tipo de Unión	% Decohesión	% Decohesión
SS	11.2	
SS	9.6	9,4
SN-SERVICIO	3.9	9,7
SN-NUEVA	0	1,9

En la figura 10 puede apreciarse perfectamente la apariencia de la unión y el efecto de la liberación del gas sobre las burbujas formadas.

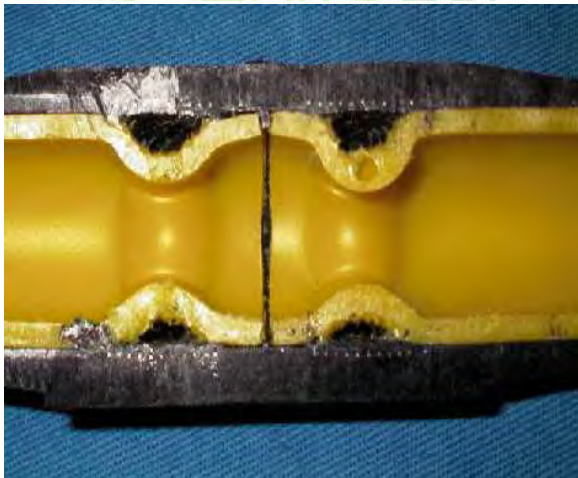


Figura 10. Unión por electrofusión sobre tubería de 25 mm PE 80 expuesta a GLP líquido durante 186 hrs.



Figura 11. Ensayo de decohesión sobre una unión por electrofusión en tubería de 3 pulgadas PE 80.

Aunque se observa claramente la formación de burbujas en la interfase entre el accesorio y la tubería, los resultados de la prueba de decohesión (ver Figura 11) indican que las uniones por electrofusión son una buena solución para evitar la disminución en la resistencia mecánica de las uniones entre tubería expuesta a GLP por largos periodos de tiempo.

UNIONES POR TERMOFUSIÓN A SOCKET SOBRE TUBERÍA PE 80

La inspección visual sobre las uniones a socket demostró que se presenta muy poca cantidad de burbujas alrededor de la unión y que dichas burbujas son muy pequeñas, debido esto tal vez al desplazamiento de las burbujas en el momento de penetrar el tubo en el accesorio. En ningún caso evaluado por el ensayo de tiraje axial se presentó desprendimiento de la termofusión. En la figura 12 se puede apreciar la sección transversal de una TEE.

Tabla 5. Registro de los datos del ensayo de Tiraje Axial sobre uniones por termofusión a socket - 186 h de exposición.

Accesorio	Tipo de Unión		
	NN	SN	SS
	% Esfuerzo inicial	% Esfuerzo inicial	% Esfuerzo inicial
Unión ½ pulg. IPS	1.000	0.991	0.963
Unión ¾ pulg. IPS	1.000	0.971	0.956
TEE ¾*½ pulg. IPS	1.000	0.896	0.899



Figura 12. Sección transversal de una unión por termofusión a socket a partir de una TEE ¾ * ½ pulgada IPS.

Los resultados del ensayo de tiraje axial demuestran que no existe una degradación significativa de la resistencia de las uniones. Ver Tabla 5. Se recomienda utilizar esta técnica de termofusión en líneas de distribución de pequeños y grandes diámetros.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación se ratifica que la tubería de PE es adecuada para la distribución del GLP en fase gaseosa y no lo afectan sus componentes.

La aparición de burbujas durante la fase de calentamiento del procedimiento de unión por termofusión, es ocasionada por la liberación de hidrocarburos livianos del GLP absorbido previamente por la tubería.

La presencia de burbujas en el reborde de la termofusión no implica necesariamente que la resistencia de la unión no se encuentre dentro de los valores establecidos por norma.

La degradación en la resistencia de las uniones y de la tubería como tal es mayor a medida que aumenta el tiempo de exposición a GLP.

La prueba de anillo muescado confirmó que realmente existe una degradación significativa en la resistencia de la tubería a medida que aumenta el tiempo de exposición a GLP líquido, llegando a alcanzar el valor del 12% establecido por norma.

Las uniones a tope en tubería PE 100 presentan valores notablemente superiores del factor de esfuerzo en comparación con los registrados para las uniones a tope en tubería PE 80 para los mismos tiempos de exposición a GLP.

La tubería PE 100 puede permanecer expuesta a GLP por periodos de tiempo mas largos que la tubería de PE 80 sin sufrir una degradación significativa de su resistencia mecánica.

Las uniones por termofusión a socket presentan un mejor comportamiento que las uniones por termofusión a tope de acuerdo a los criterios establecidos por la norma y se convierten en una buena alternativa de unión para la tubería.

Las uniones por termofusión a socket presentan un comportamiento similar a las uniones por electrofusión y mejor que las uniones por termofusión a tope para los mismos tiempos de exposición a GLP de acuerdo con los criterios establecidos por norma.

A pesar de que la resistencia de la tubería disminuye más rápidamente (a concentraciones menores) que la resistencia de las uniones, esto no amenaza la integridad física de las líneas de distribución puesto que son las burbujas presentes en la interfase de las uniones las que pueden propiciar puntos de falla a lo largo de dichos sistemas.

La tubería PE 80 de 3 y 4 pulgadas fabricada por la empresa Extrucol no sufrirá ninguna degradación mecánica de su resistencia, siempre y cuando la presión de operación del sistema sea inferior a la presión de rocío del componente más pesado del GLP del sistema a la temperatura de trabajo.

RECOMENDACIONES

Recomendamos dotar a las redes de distribución de sistemas de evacuación de condensados para purgarlas cuando sea necesario.

Mantener la presión de operación del sistema por debajo de la presión del punto de rocío del componente más pesado del GLP utilizado. Bajo esta presión de operación la tubería de 3 y 4 pulgadas no alcanza los valores de saturación crítica sin importar la temperatura de trabajo en Colombia y no existe peligro que un cambio drástico de temperatura origine la condensación de los compuestos pesados del GLP.



Las uniones por electrofusión a socket y termofusión a socket se presentan como una excelente alternativa a considerar en líneas de distribución expuestas a GLP.

La tubería PE100 es una alternativa mejor a la hora de diseñar redes de distribución de GLP.

Puede ser de gran utilidad para las cuadrillas de campo mantener un registro detallado de las localidades donde lleguen a presentarse burbujas, estos registros permitirán la identificación de problemas potenciales en la línea, tales como condensados cuyos niveles de concentración aceleren el proceso de absorción de GLP y la degradación de las propiedades mecánicas de la tubería.

BIBLIOGRAFIA

BARRER, R. M. Diffusion in and through solids. Cambridge : University Press, 1951.

CARSLAW, H. S. and JAEGER, J. C. Conduction of heat in solids. Oxford : Clarendon Press, 1959.

COLOMBIANA DE EXTRUSIÓN. Instalación de tuberías de polietileno para conducción de gases a presión. Bucaramanga : EXTRUCOL, 1995. 30 p.

MICHAELS, A. S. and BIXLER, H. J. Flow of gases through polyethylene. En: Journal of Polymer Science. Vol. 50 (1961); p. 413-439.