



## PREDICIENDO LA INTEGRIDAD A LARGO PLAZO DE LAS UNIONES POR FUSION A TOPE EN TUBERÍAS DE POLIETILENO

Mike Troughton, TWI, Cambridge, UK

Antonino Scandurra, Laboratorio Superfici ed Interfasi Catania  
Ricerche, Catania, Italy

Tomado de: 17 Simposio Internacional de Tubería Plástica para gas  
y combustibles celebrado en San Francisco – USA, Octubre 20-23 de  
2002.

Traducido por: Ing. Javier Fernando Rojas – UIS

Revisado por: Ing. Jorge Eléazar Castellanos – Extrucol S.A.

### RESUMEN

Este artículo describe un programa de trabajo para determinar el desempeño a largo plazo de las soldaduras por fusión a tope en tuberías de PE 100, usando un nuevo ensayo de tubo completo, el cual fue desarrollado para someter tramos de tubería soldada a un esfuerzo axial constante a temperatura elevada y medir el tiempo para la falla. Los resultados han mostrado que este método induce la generación de falla en la unión misma más que en los pares de tuberías, y por lo tanto, permite determinar la integridad a largo plazo de las uniones por fusión a tope.

El ensayo fue realizado en tuberías unidas por fusión a tope hechas bajo condiciones estándar y también en uniones conteniendo defectos deliberados tales como contaminación por partículas finas y gruesas e inclusiones planares, para determinar el mínimo de tamaño/nivel de contaminación que reduce el desempeño a largo plazo de la unión.

### INTRODUCCIÓN

Entre los muchos beneficios del polietileno (PE) para tuberías presurizadas es su capacidad de ser unido usando los procesos establecidos de soldadura por fusión a tope, el cual permite la fusión completa de sistemas a ser creados. Esto tiene ventajas



prácticas desde el punto de vista de la instalación y también reduce las posibilidades de fugas; un problema algunas veces asociado con tuberías de otros materiales unidas por el método de anillo de caucho y sello.

Las fallas de fusiones a tope en tuberías de polietileno son extremadamente raras. Sin embargo, para predecir en forma segura el tiempo de vida útil de un sistema de tuberías unidas, especialmente como se mueve la industria hacia condiciones de servicio más críticas y demandantes, es necesario tener un entendimiento del desempeño a largo plazo de las uniones de tal modo que el sistema completo esté garantizado para tener al menos una vida útil de 50 años a la presión nominal de trabajo.

Actualmente, los sistemas de tubería de polietileno presurizados son diseñados con base en las curvas de regresión experimental de esfuerzo de anillo versus tiempo de falla, generadas a partir de ensayos de presión hidrostática en el laboratorio en secciones de tubería completas. Tales ensayos, aunque satisfactorios para determinar el desempeño de la tubería original, son inadecuados para determinar el desempeño de las uniones por fusión a tope. La razón principal para esto es que las uniones por fusión a tope son vulnerables a esfuerzos en dirección axial, los cuales pueden ser generados en servicio debido a la flexión y contracción térmica. Sin embargo, en un ensayo de presión hidrostática en laboratorio, el esfuerzo en la dirección axial es solo la mitad que el esfuerzo en la dirección radial, lo cual significa que, en esos ensayos, invariablemente la falla sucederá en la pared de la tubería antes que en la unión soldada, dando datos no cuantificables de la integridad a largo plazo de la unión.

Por esta razón, un nuevo ensayo ha sido desarrollado, el cual somete unos tramos soldados de tubería a un esfuerzo uniaxial a temperatura elevada y mide el tiempo para falla de la unión soldada.

## EQUIPO DE ENSAYO

### ENSAYO DE TUBERÍA COMPLETA

El arreglo de tubería completa para ensayo de tensión de ruptura, el cual se muestra en la figura 1, es capaz de ensayar hasta 12 tubos de diámetro menor o igual a 180 mm y hasta 8 tubos de diámetro menor o igual a 355 mm, a temperaturas de hasta 95°C y cargas axiales de hasta 120kN.



Figura 1 equipo para el ensayo de ruptura de tubo completo

Figura 2 parte superior de equipo de ruptura de tubo completo



El equipo de ensayo consiste en un tanque de agua caliente, un sistema hidráulico de presión, un sistema de carga del tubo, y un sistema de control y monitoreo.

La parte superior del tanque de agua caliente se muestra en la figura 2, el cual consiste de 12 celdas individuales, una por estación. Las dimensiones internas del tanque son: longitud 2.0 m ancho 1.5 m y profundidad 1.8 m.

Uno de los problemas potenciales asociados con este sistema fue como prevenir que los acoples de los extremos se deslicen durante el ensayo. En un ensayo de presión hidrostática, la presión interna fuerza la pared exterior de la tubería contra el collar externo del acople en el extremo. Sin embargo, este no es el caso en un ensayo de tensión, y un nuevo acople tuvo que ser diseñado. Una figura esquemática de la disposición del tubo de carga se presenta en la figura 3.

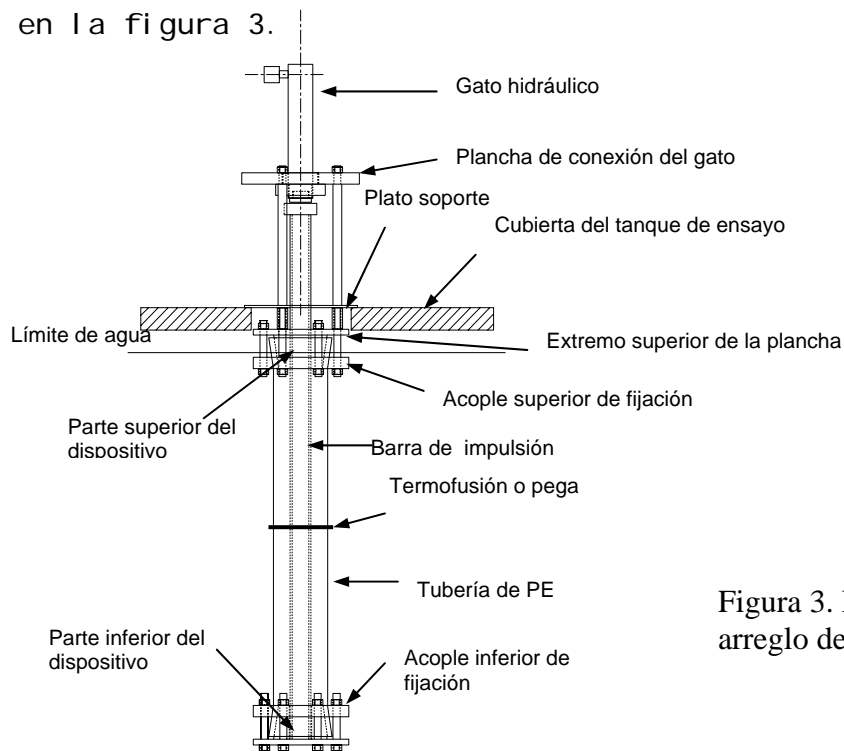


Figura 3. Diagrama de arreglo de carga del tubo

La carga de tensión es aplicada a la tubería de ensayo unida por medio de una varilla de empuje de acero inoxidable, la cual pasa hasta abajo por dentro de la tubería. La parte superior de la varilla de empuje está en contacto con el ariete de un gato hidráulico y la parte inferior se encuentra atada a la plancha en el extremo inferior del equipo. Las planchas de los extremos son sostenidas en los extremos de la tubería usando un tapón cónico interno y un anillo de anclaje externo. La presión de aceite en cada gato hidráulico es generada por una bomba, monitoreada por un transductor de presión y controlada por válvulas solenoides y de aguja. Hay un hueco en la placa inferior para permitir que el interior del tubo se llene de agua cuando se inserta en el baño.

La temperatura fue controlada dentro de  $1^{\circ}\text{C}$  y la carga dentro del 2% del valor del ensayo.

#### ESPÉCIMEN DE ENSAYO

Los especímenes de ensayo de tensión de ruptura fueron realizados de acuerdo a la norma BS EN 12814-3 (1), usando el equipo mostrado en la figura 4, el cual consiste en dos tanques de agua caliente, cada uno conteniendo 10 estaciones. La carga de tensión constante fue aplicada usando pesos muertos amarrados a los brazos de la palanca.



Figura 4. Equipo de ruptura

## ENSAYOS EN UNIONES ESTÁNDAR

Las uniones por fusión a tope fueron hechas en tuberías de 125 mm de diámetro, y RDE 11 hechas con Eltex Tub 121 usando parámetros de unión adoptados a través de Transco en el reino unido (vea tabla 1)

Tabla 1. Parámetros de Unión usados para tuberías de 125 mm PE 100

PARAMETRO	VALOR
Esfuerzo en la interfase para crear el reborde	0.15 MPa.
Temperatura de la plancha caliente	233°C
Tamaño aproximado del reborde inicial	2 mm
Tiempo de calentamiento	120 s
Esfuerzo mínimo en las interfases de calentamiento	0 MPa
Tiempo máximo para remoción de la plancha	10 s
Esfuerzo de fusión / enfriamiento de la interfase	0.15 MPa
Tiempo de enfriamiento en las mordazas	600 s

Después que se le permitió a la pega enfriarse, el reborde externo de la pega fue removido como para un procedimiento normal de QA (aseguramiento de Calidad) para instalación de tuberías de gas en el Reino Unido.

El ensayo de tensión de ruptura completo fue realizado a temperaturas de ensayo de 80°C y a cargas constantes entre 12.8 y 25.6 kN, los cuales produjeron esfuerzos de tensión entre 3 y 6 MPa.

## ENSAYOS DE TENSION EN UNIONES QUE CONTIENEN DEFECTOS DELIBERADOS

En el campo existen dos tipos principales de defectos por partículas que pueden contaminar las uniones por fusión a tope: polvo fino y partículas gruesas. En el laboratorio estas fueron simuladas con talco (tamaño de partícula  $< 45\mu\text{m}$ ) y arena de sílica natural (tamaño de partícula  $150\text{-}300\ \mu\text{m}$ ). Estos defectos fueron insertados dentro de la fusión a tope en tuberías de 125 mm de diámetro, y RDE 11 hechas de Eltex Tub 121 aplicándolos en el extremo de las tuberías cuando han sido refrentadas. Tres cargas diferentes, nominalmente descritas como pesadas, media y ligera, fueron aplicadas. La uniformidad del cubrimiento fue evaluada visualmente: ejemplos de carga de talco pesada y liviana son mostrados en la figura 5.

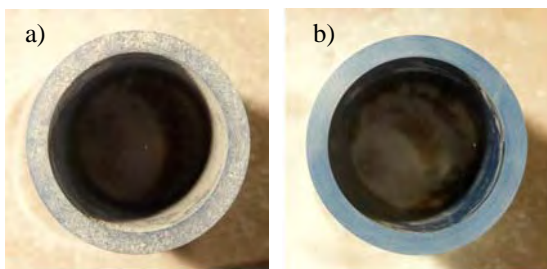


Fig. 5 Ejemplos de niveles de contaminación con talco: a) Pesado y b) ligero

Estas uniones fueron ensayadas usando el ensayo de tensión de ruptura de tubo completo, a una temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  y un esfuerzo de tensión de 5.5 Mpa.

Sin embargo, en orden para determinar los niveles críticos de partículas, sobre los cuales la integridad a largo plazo de la unión es reducida, fue necesario cuantificar el porcentaje real del área de la unión contaminada. Para hacer esto se aplicó cinta de poliámidas al extremo de la tubería que no debía ser contaminada, después de la etapa de refrentado, en cuatro posiciones equidistantes (figura 6). La cinta de poliámidas fue escogida para esta aplicación porque tienen la resistencia a la temperatura requerida y produce una rotura limpia en la interfase.

Uniones conteniendo contaminaciones tanto de talco como de arena fueron hechas en tuberías de PE 100 125 mm y 315 mm de diámetro y RDE 11. Después de la unión, lados paralelos con cintas, cada uno conteniendo cinta de poliamida, fueron cortados a partir de las uniones y cuidadosamente abiertas. Las superficies de la interfase fueron analizadas entonces usando Espectrografía electrónica de rayos X (XPS) para cuantificar el porcentaje del área contaminada.



Figura 6 localización de la cinta de poliamida

El porcentaje del área cubierta por arena fue determinada usando la ecuación 1.

$$S = \frac{Si * \frac{(n_c)_{PE}}{(n_{si})_{SiO_2}} * 100}{100 - C}$$

Donde

S es el porcentaje del área cubierta por arena.

Si es el porcentaje atómico de sílice encontrado por el análisis XPS.

C es el porcentaje atómico de carbono encontrado por el análisis XPS.

$(n_c)_{PE}$  es la densidad atómica de átomos de carbono en PE =  $4.6 \times 10^{22}$  átomos por  $cm^3$



$(n_{Si})_{SiO_2}$  es la densidad atómica de sílice en el cuarzo =  $203 \times 10^{22}$  átomos por  $cm^3$

Para la contaminación de talco, para tomar en cuenta el deslizamiento preferencial entre los planos cristalinos del  $SiO_2$  y  $MgO$  durante la unión, el cual podría cambiar la razón atómica esperada a partir de 1.33, el porcentaje de área cubierta fue calculada como la suma del porcentaje atómico del sílice y el porcentaje atómico de magnesio como se determinó en análisis XPS como se muestra en la ecuación 2.

$$T = \frac{(Si + Mg) * \frac{(n_c)_{PE}}{(n_{Si} + Mg)_{talco}} * 100}{100 - (Si + Mg)}$$

Donde:

T es el porcentaje de área cubierta por el talco.

Mg es el porcentaje atómico de magnesio encontrado en el análisis XPS

$(n_{Si} + Mg)_{talco}$  Es el promedio de densidad atómica de magnesio en el talco =  $3.0 \times 10^{22}$  átomos por  $cm^3$

Especímenes para los ensayos de ruptura también fueron cortados a partir de la misma unión y los niveles de contaminación fueron predichos por interpolación lineal. Estos especímenes fueron ensayados a una temperatura de  $80^\circ C$  y a un esfuerzo de tensión de 5.5 MPa.

Los otros tipos principales de defectos que pueden ocurrir en uniones por fusión tope en el campo son inclusiones planares. Estas pueden ser producidas, por ejemplo, por bolsas de aire, agua, grasa o huellas digitales. En orden para determinar el tamaño crítico de defectos planares, fue necesario producir defectos planares simulados de tamaño conocido. Esto se logró usando discos delgados de aluminio de  $25 \mu m$  de diferentes diámetros. Cada disco fue pegado adhesivamente al extremo de una de la tuberías en la posición de la mitad de la pared después de



La etapa de refrentado. Muestras unidas de PE 100 de 125 mm y RDE 11 conteniendo estos defectos planares fueron sometidas al ensayo de tensión de ruptura de tubo completo, también a una temperatura de 80°C y a un esfuerzo de 5.5 MPa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ENSAYOS EN UNIONES ESTANDAR

Fotografías de una fractura típica de una muestra de tubo, la cual falló después de una duración de ensayo de 1435 horas a un esfuerzo de ensayo de 5.5 MPa, son dadas en las figuras 7 y 8 y muestran que el ensayo de tensión de ruptura de tubo completo induce la generación de fracturas en la pega.

De hecho, como puede verse en la figura 7, hubo múltiples, al menos 3, puntos de iniciación de fallas alrededor de la circunferencia y, en lugar que se iniciara en la muesca entre el reborde interno de pega y el tubo como se hubiera esperado, la grieta se inició en el exterior del tubo en la línea de unión. La grieta entonces se propagó a lo largo de la interfase de unión por medio del mecanismo de crecimiento lento de grietas (SCG) (vea la figura 9), caracterizado por la superficie de fractura de zona de deslizamiento (ondulado) antes de fallar de una manera dúctil en el reborde interior.



Fig. 7 Falla externa por el reborde termofundido en tubería de 125 mm de diámetro.

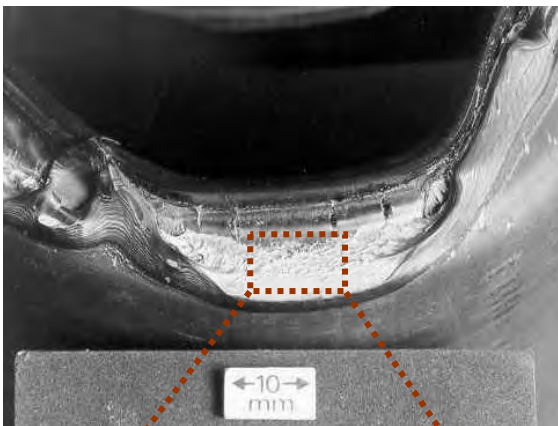


Figura 8. Superficie de fractura de uno de los puntos de falla en una unión estándar sin reborde en tubo de 125 mm de diámetro.

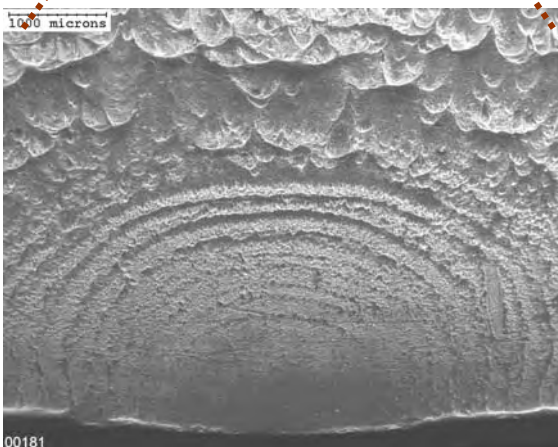


Figura 9. Microfotografía mostrando el área de iniciación de fractura en una unión estándar sin reborde.

Esto sugiere que la operación de remoción del reborde puede producir defectos que actúan como puntos de iniciación para SCG. Comparando los tiempos de falla del ensayo de tensión de ruptura de tubo completo con las curvas de regresión del esfuerzo de anillo de los productores contra el tiempo de falla para los tubos originales, dan un factor de unión de largo plazo, por ejemplo la relación entre el esfuerzo para causar la falla en la unión y el esfuerzo para causar la falla en el tubo original al mismo tiempo de falla alrededor de 0.96. Asumiendo que las pendientes de las curvas de ruptura en la unión son las mismas que para el material original, como las dadas en BS EN 1778 (3), los datos de falla para la unión han sido extrapolados a partir de la temperatura de 80°C a la ambiental. Los resultados de este análisis han indicado que es muy poco probable que tales fallas frágiles ocurran en el campo en las uniones por fusión tope sin reborde en tuberías de polietileno.

#### ENSAYOS EN UNIONES QUE CONTIENEN DEFECTOS DELIBERADOS

Las superficies de fractura de las uniones contaminadas por talco, sometidas al ensayo de tensión de ruptura de tubo completo, son mostradas en las figuras 10 y 11, las cuales revelan que las fallas son predominantemente frágiles, pero la ductilidad se incrementa a medida que decrece la carga de talco.

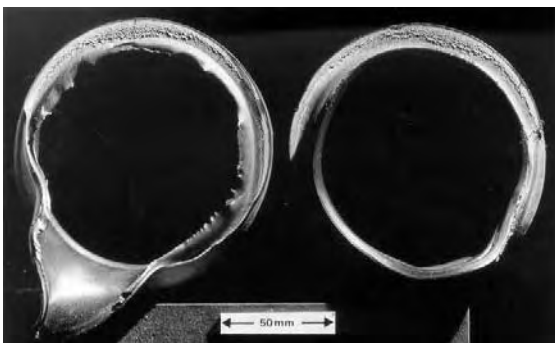


Fig. 10 Superficie de fractura de una termofusión a tope, que contiene una contaminación pesada con talco en una tubería de 125 mm de diámetro.

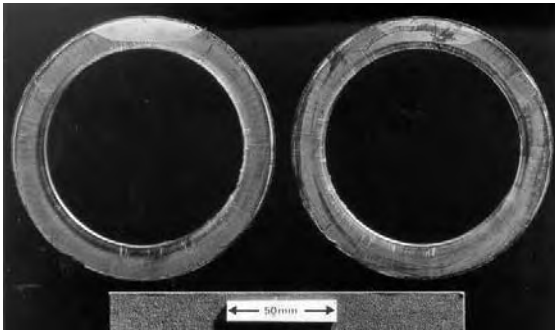


Figura 11 superficie de fractura de una termofusión a tope, que contiene una contaminación pesada con talco en una tubería de 125 mm de diámetro.

Los tiempos para falla son dados en la tabla 2, donde los factores de unión de largo plazo (1) han sido estimados por comparación con las curvas de regresión de los fabricantes extrapoladas a tiempos cortos de falla.

Tabla 2. Resultados de Ensayos de tensión de ruptura de tubo completo para uniones contaminadas por talco y uniones que no contienen contaminaciones deliberadas, en tubos de 125 mm de diámetro.

Carga nominal de talco	Duración del ensayo en horas	Factor de tensión de pega de largo plazo
Pesada	0.08	0.69
Medi a	0.5	0.74
Li vi ana	7.67	0.81
Ni nguna	1435	0.96

Partiendo de que los factores de unión de largo plazo son todos mayores que 0.5, esto podría sugerir que, si las muestras han sido sometidas a un ensayo de presión hidrostática estándar, la falla debe ocurrir en la tubería en lugar de en la pega, partiendo, que en este ensayo el esfuerzo de anillo es el doble del esfuerzo en la dirección axial, Sin embargo no se han obtenido datos cuantitativos acerca del desempeño de la pega.

Los ensayos de tensión de ruptura de los especímenes fueron realizados con uniones contaminadas con talco y arena, donde el nivel de contaminación fue cuantificado utilizando análisis XPS. Ejemplos de las superficies de fractura se muestran en las figuras 12 a 14.

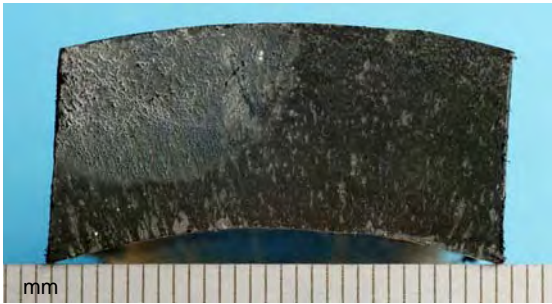


Fig. 12 Superficie de fractura de ruptura lenta del espécimen cortado de la termofusión, que contiene un 13% de talco en una tubería de 125 mm de diámetro.

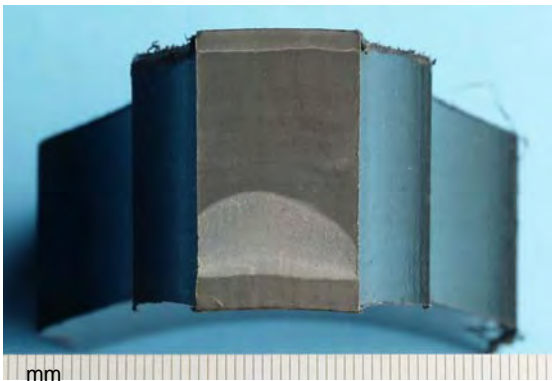


Fig. 13 Superficie de fractura de ruptura lenta del espécimen cortado de la termofusión, que contiene un 5% de talco en una tubería de 315 mm de diámetro.

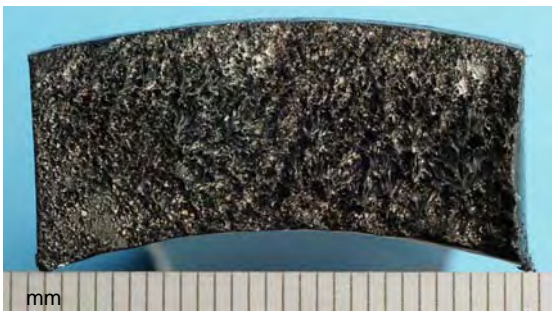


Fig. 14 Superficie de fractura de ruptura lenta del espécimen cortado de la termofusión, que contiene un 8% de arena en una tubería de 125 mm de diámetro.

A partir de las figuras 12 y 13 puede verse que las contaminaciones con talco producen superficies de fracturas frágiles. Todas las uniones en tubos de 315 mm conteniendo talco,

tenían muescas (por ejemplo áreas donde no había unión) de aproximadamente 2 - 3 mm de profundidad tanto en la línea interna y en las superficies externas (vea la figura 13).

La razón probable para estas muescas es que durante el proceso de unión, las partículas de talco, las cuales se encuentran en forma de platinas, se moverán por el límite fundido hacia las superficies internas y externas de la tubería. En la unión completa, habrá por lo tanto una concentración mucho mayor de contaminación de talco en esas regiones. Partiendo que los tubos de diámetro de 315 mm son más gruesos que los de tubos de diámetro 125 mm, uno podría esperar una mayor concentración de talco en los rebordes de pega en los tubos más grandes, aun cuando las concentraciones iniciales (por ejemplo antes de la unión) puedan ser las mismas. Este efecto podría explicar también por que los rebordes de pega externos removidos de la unión de 315 mm que contienen contaminación por talco se separan cuando son doblados hacia fuera (vea la figura 15) y el hecho que los tiempo para falla de estos especímenes sean de menos de 40 segundos.



Figura 15 Ensayo de doblamiento sobre el reborde externo de la termofusión de una tubería de 315 mm de diámetro, que contiene 5% de talco.

Las superficies de fractura en uniones que contienen contaminación por arena (figura 14) mostraron más ductilidad. Además, en ellas pareció haber evidencia de fallas dúctiles de pequeña escala alrededor de cada partícula de arena individual ó aglomeración de partículas de arena. Esto parece que, debido a que las partículas de arena son más granulares, no son movidas tan fácil durante el proceso de unión y no se concentran en los rebordes de la unión. Esto también fue confirmado por el hecho que los rebordes externos de pega removidos de las uniones tanto de tubos de 125 mm y 315 mm que contenían contaminación por arena no se separaron cuando fueron dobladas al revés.

Las superficies de fractura típicas de uniones que contienen defectos por inclusiones planares sometidos al ensayo de tensión de ruptura de tubo completo son mostradas en la figura 16 y 17, las cuales claramente muestran que, en todos los casos, la falla ocurre en la interfase de la pega en la región del defecto.

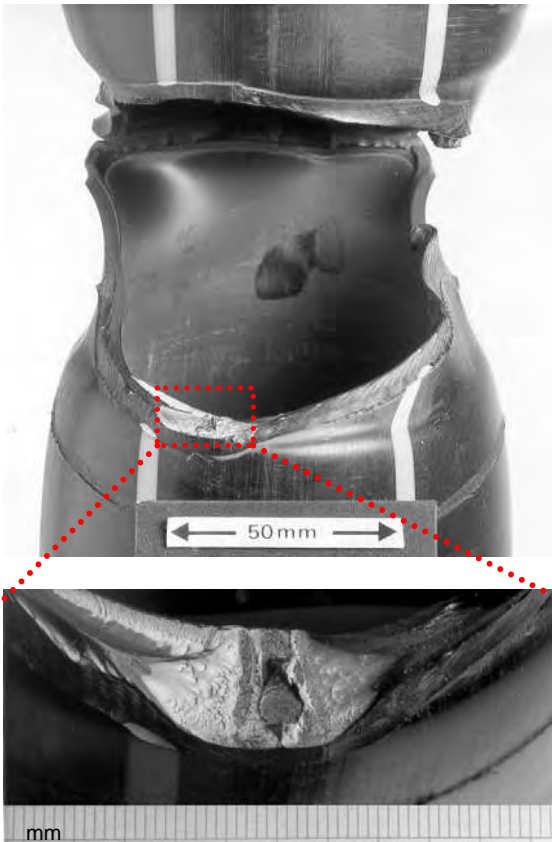


Fig. 16 Fotografías de una soldadura que falló en una tubería de 125 mm de diámetro, que contiene un defecto planar de 4 mm de diámetro.



Fig. 17 Fotografía del área de iniciación de la falla en una termofusión, en una tubería de 125 mm de diámetro que contiene un defecto planar de 2 mm de diámetro.



Observando las superficies de fractura en detalle , revelan que hay una fractura de superficie plana alrededor del defecto, corriendo a través del espesor de pared entero de la tubería, con fallas dúctiles de gran escala a ambos lados. También hay una pequeña región de falla local dúctil alrededor de la circunferencia del defecto y a través de la arista dúctil del espesor en línea con el defecto.

En orden para determinar el tamaño crítico del defecto y los niveles de contaminación, los gráficos de tamaño del defecto/ nivel de contaminación contra el tiempo de falla fueron producidos y los valores comparados con aquellos de uniones que contenían defectos no deliberados. Los resultados reales son confidenciales para los socios del proyecto. Sin embargo un ejemplo del tipo de gráfico producido es dado en la figura 18.

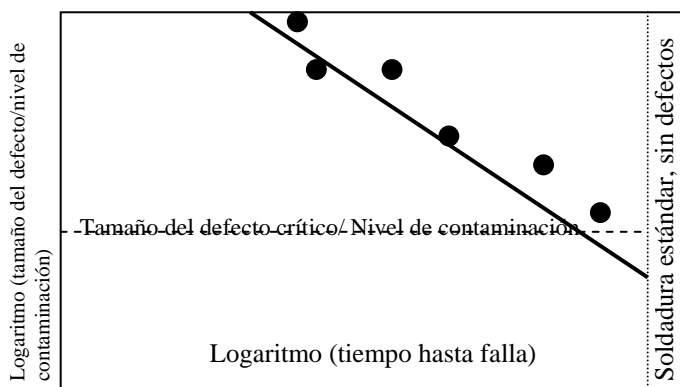


Fig. 18 Ejemplo del tipo de gráfico producido para determinar los tamaños de los defectos críticos, y los niveles de contaminación.

## CONCLUSIONES

Un ensayo de largo plazo ha sido desarrollado el cual somete unos tramos de tubería de polietileno unidos por fusión a tope a un conocido y constante esfuerzo de tensión a una temperatura elevada el cual genera la falla en la unión en lugar que en la tubería principal .



Los resultados a partir de este ensayo han mostrado que las uniones por fusión a tope en tubos de PE 100, hechas bajo condiciones estándar y externamente sin reborde, falla debido al crecimiento lento de grietas a través de la interfase de la unión, con la grietas iniciándose a partir de la superficie externa. El factor de unión de largo plazo ha sido predicho como 0.96 el cual sugiere que este tipo de falla es poco probable que suceda en el campo y además las fallas en tuberías de polietileno unidas por fusión a tope en campo son muy raros.

Los resultados también han mostrado que la inclusión de contaminaciones por talco en las uniones por fusión tope de tuberías de PE 100 tienen un efecto significativo en el desempeño a largo plazo de la unión. Reduciendo el tiempo para la falla en más de cuatro ordenes de magnitud en algunos casos. Sin embargo esto podría probablemente todavía no generar falla en la unión en ensayos estándar de presión hidrostática.

El efecto de contaminación con arena en el desempeño de largo plazo de la uniones no es pronunciado, probablemente por que estas partículas son granulares, en lugar de planares, y no son movidas tan fácilmente hacia los rebordes de unión durante el proceso de unión.

Finalmente este trabajo determinó el tamaño mínimo de los defectos planares y los niveles mínimos de contaminación por partículas finas y gruesas que puedan causar la falla prematura de las uniones por fusión tope en tubos de PE 100 de 125 mm y 315 mm de diámetro. Estos valores pueden ser usados, en conjunto con ensayos cuantitativos no destructivos, para determinar el desempeño de largo plazo en uniones por fusión tope de tuberías de PE 100 en el campo, sin necesidad de ensayos destructivos. (4)

## RECONOCIMIENTOS

Parte de este trabajo fue financiado por la Comisión Europea bajo el programa de industrias y tecnologías de materiales (proyecto BES2-5611, contrato No. BRST-CT98-5456). Las siguientes



organizaciones han patrocinado ó colaborado en este trabajo: El director de salud y seguridad del Reino Unido, Advantica Technologies Ltd, Nippon Kokan Koji KK, Simplast SpA, Ultrasonic Sciences Ltd, Sade C.G.T.H, Secteur Sud, SDG Engineering services Ltd, Georg Fischer Plastics Ltd, Solvay polyolefins Europe - Belgium SA and ATEV SAS di A Guiffri da.

## REFERENCIAS

1. BS EN 12814-3: 'Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products. Part 3 – Tensile creep test', 2001.
2. Buc Slay J, Bradley W L, Register D and Lamborn M: "Predicting the relative and absolute lifetime of plastic pipe", 16<sup>th</sup> International Plastic Pipe Fuel Gas Symposium, New Orleans, 1-4 November 1999, 233.
3. BS EN 1778: 'Characteristic values for welded thermoplastics constructions – Determination of allowable stresses and moduli for design of thermoplastic equipment', 1999.
4. Troughton M J: "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", Plastics Pipes XI Conference, Munich, Germany, 3-6 September 2001, 833.