

02-021

FAULT DIAGNOSIS IN POLYETHYLENE PIPES

Romero Sedó, Antonio Manuel ⁽¹⁾; *Arrué Burillo, Paloma* ⁽²⁾; *Romero Miquel, Jordi*
Françesc ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València

Due to the high number of leaks in the existing potable water supply networks in an Execution Unit of a locality, the study is carried out with the objective of knowing the causes that are causing the ruptures of the polymeric pipes of drinkable water supply. This study tackles the problem from an interdisciplinary point of view. An analysis of the hydraulic behaviour of the network and the study of the compatibility of the type of water with the material is performed. The different pathologies are studied by computational calculation by MEF in order to determine the breaking states. And laboratory tests are carried out to know the physical-chemical characteristics of the pipe and to know the resistance to internal pressure, as well as the morphology of the rupture by SEM. The results of the study indicate the causes and corrective actions to be taken in order to correct the fault in service.

Keywords: supply network; fault diagnosis; polymer pipes

DIAGNÓSTICO DEL FALLO EN LAS TUBERÍAS DE POLIETILENO

Debido al elevado número de fugas en las redes de abastecimiento de agua potable existentes en una Unidad de Ejecución de una localidad se procede a realizar el estudio con el objetivo de conocer las causas que están provocando las roturas de las tuberías poliméricas de abastecimiento de agua potable. Este estudio aborda el problema desde un punto de vista interdisciplinar. Se realiza un análisis del comportamiento hidráulico de la red y el estudio de la compatibilidad del tipo de agua con el material. Se estudian las distintas patologías mediante cálculo computacional por MEF con objeto de determinar los estados límites de rotura. Y se realizan los ensayos de laboratorio para conocer las características físico-químicas de la tubería y conocer la resistencia a presión interna, así como la morfología de la rotura por SEM. Con los resultados del estudio se indican las causas y las acciones correctoras a realizar con la finalidad de corregir el fallo en servicio.

Palabras clave: red de abastecimiento; diagnóstico del fallo; tuberías poliméricas

Correspondencia: Antonio Manuel Romero Sedó aromeros@csa.upv.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En multitud de municipios en las redes de abastecimiento de agua potable de baja presión se producen un elevado número de fugas que conllevan un grave perjuicio socioeconómico, tanto para los usuarios de la red, como para las empresas gestoras que deben plantear soluciones a medio y largo plazo. Este artículo realiza el diagnóstico del fallo de los materiales en servicio de las tuberías de polietileno (PE) instaladas en una Unidad de Ejecución (UE) de una localidad valenciana, donde de forma proporcional se ha producido 1 fuga cada 6.17 metros en la red mallada entre los años 2015 y 2018, cuya acta de recepción provisional de las instalaciones data del 31 de diciembre de 2004. El desconocimiento de los factores que intervienen en este tipo de problemática y la amplia casuística requieren de un extenso conocimiento multidisciplinar. El diagnóstico del fallo requiere necesariamente de un protocolo adecuado para la toma de datos, así como, la identificación de las líneas de investigación a desarrollar, la metodología específica de cada disciplina en base a las patologías identificadas, la toma de decisiones y el planteamiento de las estrategias de actuación en la resolución del problema.

2. Objetivos

El objetivo principal es determinar la diagnosis del fallo en las tuberías de PE, y para ello se propone establecer una guía técnica que abarca desde la toma de datos, hasta la identificación del proceso del fallo, así como la búsqueda de la causa o causas principales y su evaluación, realizar estudios de compatibilidad del material con el fluido a transportar, cálculos hidráulicos de las redes y modelización computacional por elementos finitos (MEF) para el cálculo mecánico. Se analizan un total de cuatro muestras y doce hipótesis de cálculo (en este artículo se describe una de ellas), y por último, se proponen las medidas o acciones correctoras a realizar con la finalidad de corregir el fallo en servicio en el supuesto que sea posible, siempre desde el punto de vista técnico y económico.

3. Materiales y métodos

3.1 Identificación de indicadores y causas probables de las patologías

Según la naturaleza de la instalación y de los materiales en servicio, la rotura de las tuberías puede producirse por una o combinación de varias causas. Las patologías más frecuentes en las redes de abastecimiento de agua potable son debidas a presiones excesivas, presión de trabajo de la tubería y accesorios inferior a la presión máxima a la que va a estar sometidas las redes (presiones de servicio, transitorios, etc.), elección inadecuada de los materiales desde el punto de vista de compatibilidad química del agua potable con los materiales instalados, pérdida de las propiedades mecánicas en los materiales con el paso del tiempo, defectos de fabricación de los materiales, mala ejecución de obra, escasa o inexistente regulación hidráulica en las redes de abastecimiento y/o falta de mantenimiento en las instalaciones.

La identificación previa de las posibles causas es indispensable para determinar las líneas de actuación a desarrollar.

3.2 Información previa

La red está formada por tuberías de polietileno PE100, SDR 17 serie S de tensión mínima requerida (MRS) de 10 MPa y diámetro nominal DN-110. El suministro de agua potable a la UE se realiza mediante la conexión a las tuberías existentes en el casco urbano de la

localidad, en ambos casos del tipo mallado.

Tras un análisis previo de las patologías encontradas en la red de abastecimiento de la UE, y al carecer la empresa gestora de agua potable de un protocolo para la toma de datos, se confecciona un cuadro de trabajo que viene dado por la tabla 1.

Tabla 1. Toma de datos y análisis previo

ADMINISTRACIÓN PÚBLICA	EMPRESA CONSTRUCTORA	EMPRESA FABRICANTE DEL MATERIAL	EMPRESA ALMACENISTA
1 Proyecto de urbanización Unidad de Ejecución (UE) 2 Pliego de condiciones de contratación 3 Periodo de garantía de la obra 4 Libro de ordenes 5 Certificado final de obra 6 Informes técnicos municipales 7 Denuncias del servicio por los usuarios de la UE 8 Daños en la propiedad privada provocado por las fugas	1 Clasificación empresa constructora 2 Tipo y tiempo de acopio de los materiales 3 Tipo de transporte del material 4 Seguro de responsabilidad civil 5 Calificación profesional del encargado de las obras e instalaciones	1 Fecha de fabricación del material 2 Certificado de fabricación del material 3 Normativa de fabricación	1 Fecha de recepción de los materiales 2 Tipo y tiempo de acopio de los materiales 3 Fecha de suministro del material

EMPRESA GESTORA AGUA POTABLE	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	LABORATORIO HOMOLOGADO	NORMA UNE
1 Análisis completas agua potable 2 Historial de fugas y ubicación en la UE 3 Historial de mantenimiento 4 Informe de regulación de la red 5 Maniobras en las redes de la UE y fecha 6 Ficheros digitalizados de las redes en la UE 7 Puntos de conexión y presión de la red mallada existente con la UE 8 Incidencias de transitorios 9 Quejas de los usuarios del servicio en la UE 10 Alquiler de loggers, caudal y presión	1 Toma de muestras de las fugas de agua durante un periodo de 8 meses 2 Preparación de las muestras para su análisis 3 Análisis morfológico de las patologías mediante microscopio metalúrgico 4 Búsqueda bibliográfica científica americana en ASM HANDBOOK 5 Indicación de los puntos donde deben instalarse los loggers de presión y caudal en la UE, durante el periodo de tiempo estimado	1 Índice de fluidez 2 Alargamiento a la rotura 3 Retracción longitudinal 4 Tiempo de inducción a la oxidación 5 Dispersión de negro de carbono 6 Determinación de negro de carbono 7 Presión interna estática 8 Análisis morfológico por SEM	EN ISO 1133-1 ISO 6259 EN ISO 2505 EN ISO 11357-6 ISO 18553 53-375-3 EN ISO 12201-2

Cabe destacar que las redes de abastecimiento de la UE durante el periodo en las que se produjeron las roturas de la tubería carecían de sistemas automáticos de regulación de presión y de caudal. Es importante destacar que el desnivel topográfico entre el depósito de agua potable y la UE es de 71 m.

3.3 Compatibilidad del material, cálculos hidráulicos, mecánicos y patológicos

Se analiza la compatibilidad del material con los parámetros fisicoquímicos del agua (temperatura, cloro residual libre, pH, conductividad eléctrica, calcio disuelto, magnesio, bicarbonatos, ion carbonato) para determinar la dureza total del agua y el índice de estabilidad de Langelier. El cálculo de las redes malladas se modeliza por computadora en función de las curvas de demanda y presión obtenida con los logger, se modeliza la rotura de tuberías provocada por transitorios en los puntos más críticos de la malla. Y, por último, se analizan los tipos de rotura encontradas desde el punto de vista mecánico y posteriormente se modeliza por MEF. Todo este estudio unido a los resultados del laboratorio homologado, así como los datos facilitados por las empresas constructora, fabricante del material y del almacenista permite obtener las conclusiones del informe del diagnóstico del fallo.

4. Resultados

4.1 Análisis hidráulico de las instalaciones

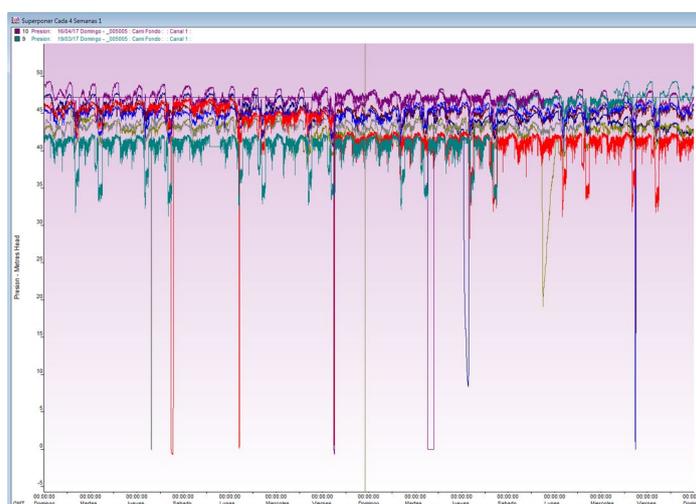
El análisis hidráulico de las instalaciones se realiza para conocer si ha habido sobrepresiones superiores a la presión de trabajo de las tuberías que justifiquen su rotura. Para ello se ha instalado en la UE un data logger facilitado por la compañía suministradora de agua potable. El logger posee una frecuencia de 60 Hz (un registro cada 60 s), aunque hubiese sido aconsejable utilizar otro de mayor frecuencia (100 Hz) con la finalidad de detectar transitorios en las redes. No obstante, para poder corregir el parámetro de la

frecuencia, y conseguir un aumento de la probabilidad de medir transitorios en las redes se ha prolongado la toma de datos de las presiones durante un periodo de tiempo de 8 meses, desde el 31 de agosto de 2016 al 28 de abril de 2017, figura 1.

Se han analizado las presiones para el periodo de estudio de forma mensual, semanal y diario observándose 11 fugas registradas como descensos bruscos de presión en periodos de tiempo distintos, esto es debido a la existencia de fugas en las redes o como ocurre en raras ocasiones porque el data logger no posea instalada la preceptiva puesta a tierra.

Del análisis diario se observa que las caídas de presión provocado por las fugas se producen en los periodos de tiempo de mayor demanda. Del análisis semanal se observa que son los jueves y los viernes donde más se repiten las fugas, y en los periodos mensuales, se detecta que todos los meses se repite el mismo patrón semanal.

Figura 1: Correlación Presión (mca) vs. Tiempo periodo mensual, 8 series (intervalos de 60 s)



Una vez realizado el análisis hidráulico se describen a continuación los datos más relevantes. El data logger instalado en la calle 1 detectó 11 fugas durante el periodo de tiempo comprendido entre el 31/8/2016 al 28 /4/2017 y unas presiones máximas, mínimas y medias, cuyos valores vienen dados por la tabla 2.

Tabla 2. Fugas (Ud.), presiones mínima, máxima y media (mca)

Fecha registro	Día	P _{mín} (mca)	Hora	P _{máx} (mca)	Hora	P _{media} (mca)
04/09/2016	Domingo	46.60	11:15:00	49.30	5:00:00	48.02
20/09/2016	Martes	0.00	12:57:00	47.90	1:30:00	34.48
20/10/2016	Jueves	8.30	6:55:00	44.40	0:00:00	37.25
20/11/2016	Domingo	19.10	12:15:00	43.60	0:35:00	35.60
01/12/2016	Jueves	0.10	15:05:00	44.50	15:30:00	42.07
19/01/2017	Jueves	0.90	11:35:00	46.00	3:30:00	44.27
16/02/2017	Jueves	0.00	11:55:00	46.60	3:30:00	44.49
24/02/2017	Viernes	0.70	12:40:00	46.90	16:20:00	41.13
27/02/2017	Lunes	0.10	9:53:00	47.20	0:33:00	43.80
03/03/2017	Viernes	0.50	11:37:00	45.50	1:58:00	42.28
09/03/2017	Jueves	28.20	8:24:00	42.60	1:30:00	40.61
28/04/2017	Viernes	0.70	12:17:00	48.20	2:17:00	44.82

11 FUGAS POR ROTURA

Durante todo el tiempo que estuvo instalado el data logger, no se detectó ninguna sobrepresión que fuese atribuible a transitorios (Allievi, 1914) en las redes de abastecimiento, ni presiones superiores a la tensión mínima requerida (MRS) del material.

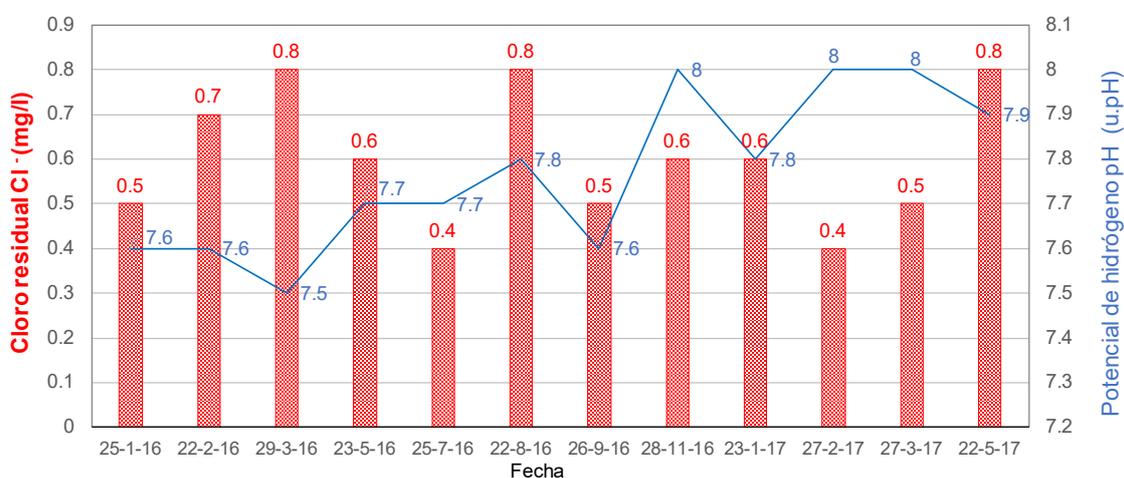
Es aconsejable instalar sistemas de regulación de presión (válvulas reguladoras de presión) con la finalidad de disminuir las presiones actuales en la red de abastecimiento que evitarían fatigas en los materiales, pérdidas elevadas de agua por posibles poros o fugas en las redes y acometidas, y en consecuencia aumentaría el rendimiento en la red hidráulica, la vida útil de los materiales, aumento del ahorro económico, etc. Estos sistemas de regulación deben de ubicarse en emplazamientos adecuados previo análisis por modelación matemática de las redes de abastecimiento mediante software (Rossman, 2000).

4.2 Compatibilidad del agua potable con el material instalado

El polietileno es un material ampliamente utilizado en las redes de abastecimiento de agua potable, no obstante, se debe de comprobar siempre la compatibilidad del material a instalar con la analítica del agua. La empresa gestora de agua potable a través del laboratorio acreditado y homologado ha facilitado las analíticas del agua, de las cuales se han extraído aquellos parámetros necesarios para poder comprobar la compatibilidad.

Los valores promedio de las 12 analíticas son 0.60 mg/l en cloro residual, pH de 7.77 y 1200 μ S/cm de conductividad a 20°C. La dureza total y el índice de estabilidad de Langelier fueron de 58 °HF y 0.74 en el año 2016 y de 47°HF y 0.91 en el 2017. Se observa que los valores son válidos según la legislación vigente, Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios de calidad del agua de consumo humano (Ministerio de la Presidencia, 2003). En la figura 2 se indica el cloro residual (Cl⁻) y el potencial de hidrógeno (pH) del agua en los años 2016 y 2017.

Figura 2. Cloro residual (mg/l) y Potencial de hidrógeno vs. Fecha.



En función de la dureza temporal o carbonatada (TH-DP), el agua es muy dura dado que los valores obtenidos son de 580 y 470 mg/l o p.p.m. de carbonato cálcico (CaCO₃) en los años 2016 y 2017 respectivamente. La tendencia del agua es ser incrustante con formación de depósitos. Los valores medios obtenidos en función del potencial de hidrógeno (pH) son de 7.687 y 7.925 para los años 2016 y 2017 respectivamente, lo que indica que se trata de una disolución alcalina. Con respecto a la conductividad eléctrica los valores medios obtenidos han sido de 1.250 y 1.000 μ S/cm para los años 2016 y 2017 respectivamente, lo que indica que el agua posee una fuerte mineralización con tendencia a ser incrustante.

Los valores obtenidos de las analíticas del potencial de hidrógeno, la conductividad eléctrica, la dureza total y el índice de estabilidad suelen ser muy próximos, en consecuencia, la calidad del agua del acuífero o fuente de suministro se mantiene estable.

Los valores del índice de Langelier de las analíticas completas han sido de 0.74 y 0.91 para los años 2016 y 2017 respectivamente. Estos valores aconsejan no utilizar materiales poliméricos para este tipo de calidad del agua dado que pueden producirse depósitos de CaCO_3 en las tuberías de polietileno.

Las tuberías analizadas no poseen incrustaciones de carbonato cálcico (CaCO_3) del tipo laja o de otro tipo, solamente se ha detectado una pátina micrométrica de CaCO_3 en la superficie interior de la tubería (Romero, Arrué y Cárcel, 2010). Es muy probable que esto sea atribuible a la elevada presión del agua, así como de tiempos mínimos de permanencia del agua en las redes de abastecimiento. El material proyectado no es el más aconsejable por la compatibilidad, no obstante, las patologías detectadas no son atribuibles a la compatibilidad del agua con el material. No es recomendable utilizar materiales poliméricos en las redes de abastecimiento de la localidad debido a los elevados índices de estabilidad de Langelier (Romero y Arrué, 2010).

4.3 Patologías

De las cuatro muestras, este estudio se ha centrado en una muestra nº1, extraída de una fuga, con una grieta de 12 mm en la generatriz superior de la tubería iniciada desde el interior de la tubería PE 100 DN-110, figura 3. La muestra no presentaba deformación plástica en el espesor del material, salvo en el iniciador de la fractura, apareciendo una estricción plástica microscópica en la cara interior de la tubería produciéndose un desplazamiento del iniciador en la dirección de la fuga de agua (eje Y). Se observa que la rotura presentaba una superficie limpia y pulida, típica de las roturas de materiales frágiles (Ferrer, 2006).

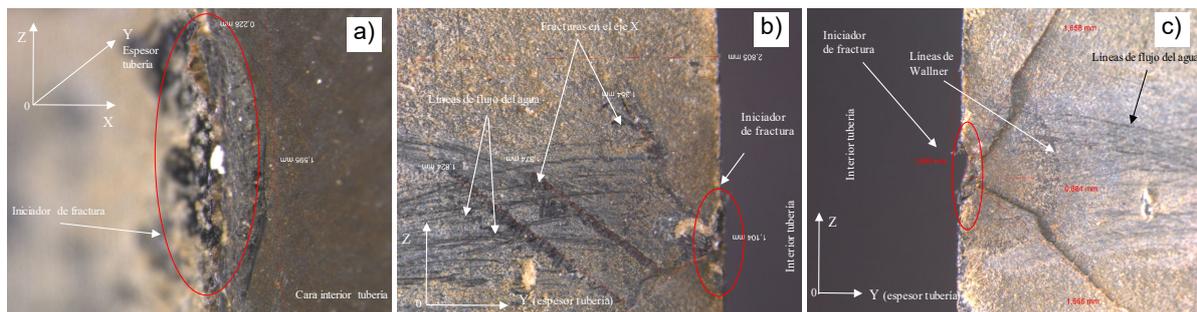
Puede observarse que existía un iniciador de fractura en el interior de la tubería sobre el eje longitudinal con una longitud máxima $2a=1.595$ mm y anchura total de 0.362 mm. Este iniciador presenta una superficie rugosa indicador de que ha existido una deformación plástica microscópica tipo estrías (hackles) en las direcciones de los tres ejes de referencia.

Figura 3.- Muestra nº1. Fuga de agua en calle 2, en la tubería de PE 100, DN-110



En la figura 4, se aprecia que no existe rotura por fractura dúctil por deformación plástica del material en ninguno de los ejes de referencia (X, Y, Z). La tipología de la rotura del material del lado derecho es similar a la del lateral izquierdo con la aparición de las líneas Wallner. En esta muestra también aparecen dos grietas principales con origen en el iniciador de fractura de longitudes de 1.821mm y 2.073mm, con planos oblicuos de -45° y 45° sobre el eje Y, siendo un indicador de fatiga a cortante máximo (Timoshenko y Gere, 1961) y de que la rotura del material se produce porque es frágil y poco resistente a la tracción.

Figura 4.- Muestra n°1. a) Lateral derecho (32 X), b) Lateral izquierdo (20 X). c) Lateral derecho (20x). Fractura frágil MODO I (plano ejes Z, X) con aparición de líneas Wallner



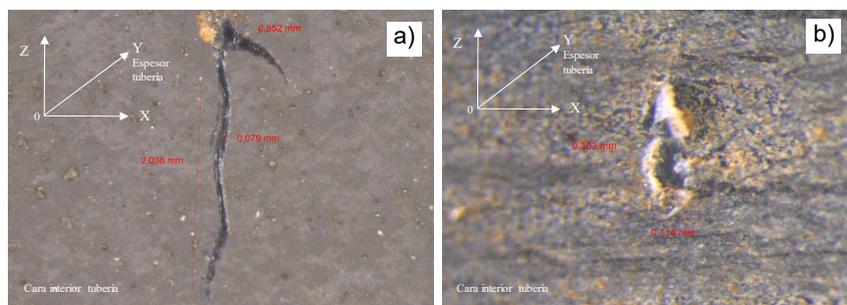
La rotura del material es por fractura frágil MODO I (González, 2004) con una superficie típicamente pulida con la aparición de líneas de Wallner con un radio máximo de 4.735 mm (Engineered materials handbook, 1988), (Hayes et al, 2015), (Marshek, 1975), lo cual es un indicador de que la tubería ha estado sometida a ciclos de fatiga, por variación de la presión del agua con el tiempo en las redes de abastecimiento. Se puede observar que sobre las líneas de Wallner aparecen marcas en el material debido a la erosión del agua indicando la dirección y sentido de las líneas de corriente desde el interior hacia el exterior de la tubería.

En la grieta de la muestra n°1 aparecen coloraciones entre tonos de rojizo y marrón claro debido probablemente a dos causas independientes o de forma conjunta. La primera causa, por el óxido de hierro (Fe_2O_3) procedente de los materiales metálicos por oxidación y/ o cavitación en válvulas (Romero et al., 2012), accesorios etc., instalados en la red de abastecimiento y la segunda causa, por la existencia de sílice (Si) en el agua potable introducido en las tuberías durante la reparación o conexiones de la red (acometidas, etc.). Igualmente existen patinas de carbonato cálcico ($CaCO_3$) lo que indica que la rotura ha estado en funcionamiento durante un tiempo prolongado.

Como dato relevante las líneas de corriente, lo mismo que las líneas Wallner, se interrumpen aproximadamente a una profundidad cuya altura es $h_1 = 4.6$ mm (70%) del espesor de la tubería a contar desde el interior, datos que indican que cuando se ha llegado a esta profundidad de grieta la rotura se produce de forma súbita.

En las inmediaciones de las roturas del material existen iniciadores de fractura, figura 5. En el iniciador de la fractura aparece una estricción plástica microscópica en la cara interior de la tubería, produciéndose un desplazamiento del iniciador de la fractura en dirección del espesor de la tubería (eje Y).

Figura 5.- Muestra n°1. Calle 2.a) Iniciador de fractura A (20 X) dimensiones $2a = 2.036$ mm, ancho 0.079 mm. b) Iniciador de fractura B (63 X) dimensiones $2a = 0.303$ mm, ancho 0.114 mm



No se observa ningún ataque químico sobre los iniciadores de fractura. Este podría haberse producido por una alta concentración del cloro líquido, pero en ningún caso las analíticas del agua superan la concentración máxima de 1 mg/l de cloro residual.

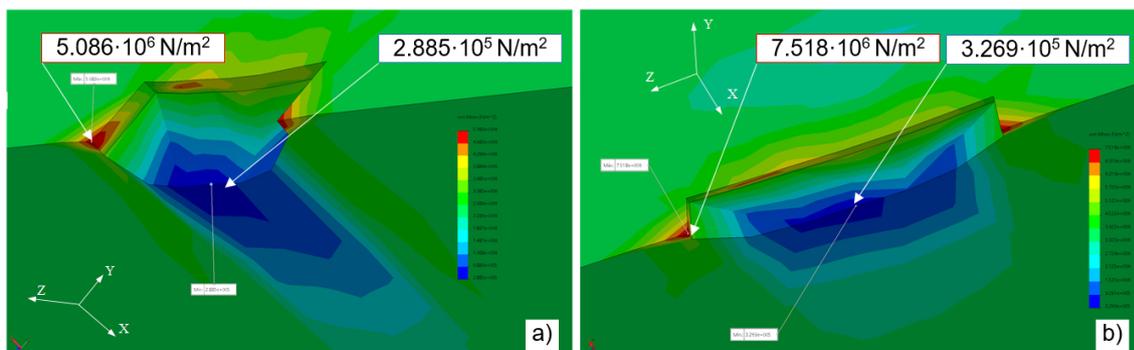
4.4 Modelización mediante cálculo computacional por MEF

El cálculo mecánico computacional del material se realiza de forma estática, ya que se carece las curvas vida SN o de Wöhler, por tanto, se descarta los cálculos por los métodos de Goodman, empleado para materiales frágiles y Soderberg, método más conservador, por no se exigibles por la norma UNE. Para el análisis se realizan tres hipótesis de cálculo. La hipótesis nº1 correspondiente a la tubería con iniciador de fractura y sometida a presión máxima interior y carga externa transmitida por el peso del suelo. La hipótesis nº2 con iniciador de fractura, pero la tubería sometida solamente a presión máxima interior, sin carga del suelo debido a la posibilidad de que existan zonas con una compactación del suelo poco relevante. Y, por último, la hipótesis nº3 con la tubería sin iniciador de fractura y sometida solamente a presión interior.

El método de cálculo está basado en las ecuaciones de la mecánica de sólidos utilizando malla sólida basada en curvatura de combinado, con matriz jacobina de 29 puntos y elementos cuadráticos de alto orden, (Zienkiewicz y Taylor, 2000), (Temam, 1979), y de Euler, considerando el agua como fluido real e incompresible. Un caso particular suponiendo la viscosidad y la conducción de calor nulas se conoce con el nombre de “ecuaciones de Euler”. Los cálculos se han realizado mediante aplicación informática comercial SolidWorks con licencia de la UPV, (Dassault Systems, 2019).

Los resultados obtenidos en la hipótesis nº1, figura 6 a), con una presión interior de 4.93 kp/cm^2 y una carga del suelo de 1.5 kp/cm^2 han sido una tensión máxima por von Mises de $5.086 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, una tensión mínima de $2.885 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, la deformación máxima de 0.106 mm y la deformación unitaria máxima de $3.232 \cdot 10^{-3}$. En la hipótesis nº2, figura 6 b) con una presión interior de 4.93 kp/cm^2 y sin carga del suelo se ha obtenido una tensión máxima por von Mises de $7.518 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, una tensión mínima de $3.269 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, la deformación máxima de 0.155 mm y la deformación unitaria máxima de $4.75 \cdot 10^{-3}$.

Figura 6.- Tensiones por von Mises (N/m²). a) Hipótesis nº1 y b) Hipótesis nº2

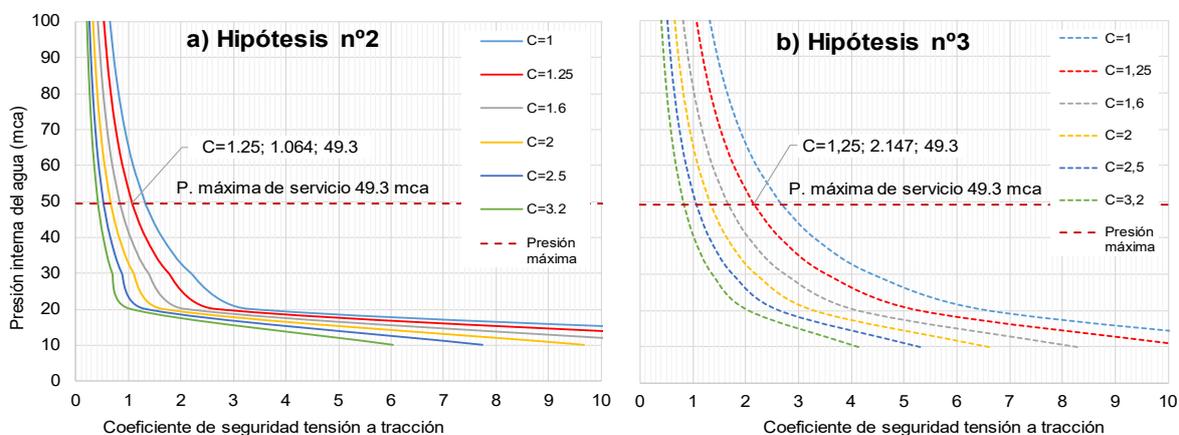


La tensión máxima está localizada en los bordes del iniciador y la tensión mínima en el borde inferior del interior del iniciador. Desde el interior del iniciador de la fractura se proyectan tensiones hacia el interior de la tubería, eje X, de forma lobular. En la hipótesis nº2 las tensiones son mayores que las obtenidas en la hipótesis nº1, debido a que la carga externa (peso del suelo) disminuye la tensión en el material cuando la tubería se encuentra a presión interna. De ello se concluye que la hipótesis nº2 es más desfavorable que la hipótesis nº1 con un incremento de 112.49% en la tensión máxima y 146.23% en el desplazamiento.

Con la finalidad de conocer los valores de los coeficientes de seguridad de la tubería sometida a presión interna, se han realizado cálculos por MEF para presiones interiores desde 10 a 100 mca en intervalos de 10 mca, cuyo resultado de la correlación entre la presión interna con respecto al coeficiente de seguridad de la tensión de tracción se indica

en la figura 7 a) para la hipótesis nº2 con iniciador de fractura y la figura 7 b) para la hipótesis nº3 sin iniciador de fractura, y sin carga del suelo en ambas hipótesis.

Figura 7: Hipótesis nº2 y nº3. Presión interna (mca) vs. Coef. de seguridad tensión a tracción



De los valores obtenidos se deduce que a medida que aumenta la presión interna de la tubería, aumentan las tensiones y deformaciones del iniciador de fractura en el eje OY. Así mismo, a medida que aumenta el coeficiente de diseño C, disminuye el coeficiente de seguridad frente a la tensión por tracción del material.

Para el caso de una presión máxima de la tubería correspondiente a 49.3 mca y un coeficiente de diseño $C=1.25$ recomendado por la norma UNE-EN 13244-2 (junio 2003), (Balairón, 2006) para un periodo de 50 años, el valor del coeficiente de seguridad frente a la tensión por tracción de la tubería es de 1.064 para la hipótesis nº2, y 2.147 para la hipótesis nº3, por tanto, la tubería estudiada por MEF resiste la presión máxima a la que ha estado sometida sin llegar a la rotura, siendo en la hipótesis nº3 un 201.78% mayor que la de la hipótesis nº2. El efecto de no tener iniciador de fractura incrementa de forma notable la seguridad de la tubería.

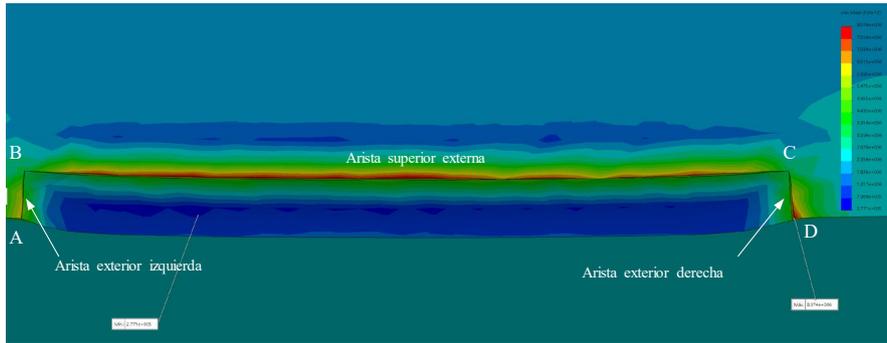
Las tres hipótesis estudiadas mediante análisis estático poseen en común que la tubería calculada por MEF resiste perfectamente la presión máxima de 49.3 mca sin llegar a la rotura. No obstante, la aparición de iniciadores de fractura en el interior de la tubería disminuye considerablemente los valores de los coeficientes de seguridad de tensión a tracción del material.

4.5 Límite de rotura de la muestra nº1 con grieta por MEF

El objetivo del estudio del límite de rotura es determinar el comportamiento de la tubería con la grieta inicial, sometida a presión máxima interior y carga externa transmitida por el peso del suelo hasta su límite de rotura. Las dimensiones iniciales de la grieta son de una anchura de $2a=12$ mm y una profundidad de 0.181 mm, en cambio, se desconoce la altura de la grieta, para ello se plantean simulaciones sucesivas por MEF obteniéndose, por aproximación, la altura a la cual se produce la rotura del material mediante análisis estático siendo de $h_2=0.94$ mm. Para el estado límite el coeficiente de seguridad se ha tomado el valor de 1 y la tensión máxima de $8 \cdot 10^6$ Pa.

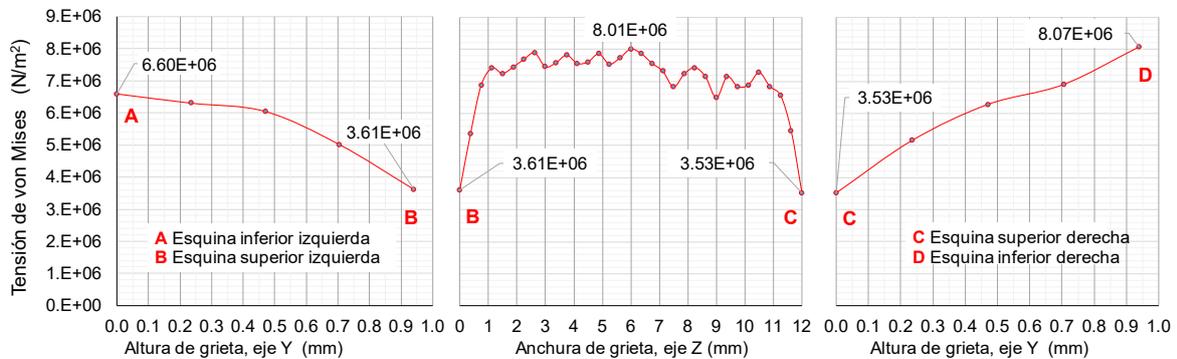
Se ha realizado un estudio más detallado de las tensiones máximas y mínimas a las que está sometida la grieta. Para ello se ha establecido, según se detalla en la figura 8, las denominaciones de arista exterior izquierda, arista superior externa y por último la arista exterior derecha.

Figura 8: Hipótesis nº4. Muestra nº1. Vista frontal de la grieta.



Mediante la figura 9, se representa la correlación de la tensión con la altura de la grieta obtenida por cálculo ($h_2=0.94\text{mm}$).

Figura 9: Hipótesis nº4. Muestra nº1. Tensión Von Mises (N/m^2) vs. Altura de grieta (mm)



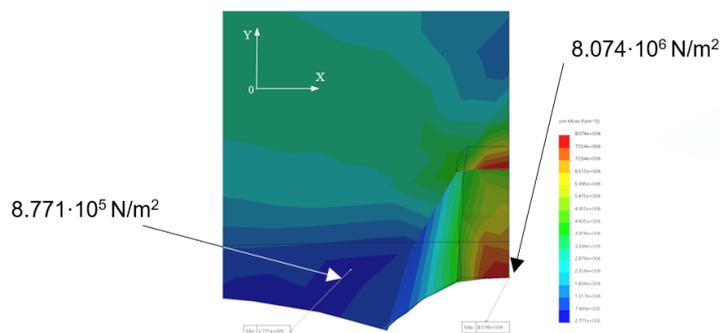
Se observa que la tensión máxima en la arista superior externa se encuentra en el centro de la grieta con un valor de $8.01 \cdot 10^6 \text{ Pa}$.

Las tensiones en la grieta son simétricas, aunque los valores máximos obtenidos en las esquinas A y D no son iguales. En realidad, dado que existe una simetría de cargas y de forma, las tensiones en A y D deberían de haber sido iguales, lo mismo que las tensiones en B y C. Esto no ha sido posible por limitaciones del programa en el mallado, aunque el error cometido ha sido mínimo y por lo tanto aceptable.

En esta hipótesis de cálculo a la tubería se le ha sometido a rotura mediante análisis estático y se ha obtenido mediante iteraciones sucesivas por MEF una altura máxima de grieta de $h_2=0.94 \text{ mm}$, valor inferior al que viene dado por la muestra nº1, figura 6 b), donde la altura donde se produce la rotura es de aproximadamente $h_1=4.6 \text{ mm}$ (489.36% mayor) a contar desde el interior de la tubería. Esta diferencia de alturas viene justificada porque el valor de h_2 se ha obtenido mediante análisis estático a presión máxima, mientras que h_1 se ha producido mediante ciclos de fatiga por variaciones de presión en las redes con el tiempo. Por tanto, las dos alturas de rotura no son comparables, por no serlo los análisis de cálculo, no obstante, proporciona un dato relevante, la altura por rotura por fatiga es mayor y el proceso de rotura más lento, este fenómeno viene justificado por dos razones, por no ser constantes las presiones con el tiempo y porque el material se comporta en parte de forma elasto-plástica.

La tensión a rotura se encuentra localizada en el borde la grieta y la tensión mínima en la cara inferior del interior del iniciador de fractura. Desde el interior de la grieta se proyectan tensiones hacia el interior de la tubería, eje X, de forma lobular, figura 10.

Figura 10: Hipótesis nº4. Muestra nº1. Tensiones por von Mises (N/m²)



Los valores de la tensión máxima y mínima no están en contradicción con las de la figura 9, dado que, la tensión máxima está justamente en el borde la grieta, en el punto de coordenada XYZ igual a 0, y la tensión mínima es un valor promedio de la parte lobular.

4.6 Resultados de los ensayos del laboratorio homologado

En este apartado se describen los resultados de los ensayos propuestos en la tabla 1. Existen 3 ensayos importantes que no cumplen con las especificaciones de la normativa, que corresponden al Alargamiento a la rotura, Tiempo de inducción a la oxidación y la Determinación de negro de carbono.

Con respecto al Alargamiento a la rotura, el resultado proporcionado por el laboratorio es del 290% (+/- 130%) y según la norma ISO 6259-3 debe de ser $\geq 350\%$, ello indica que el material es poco elástico, justificando la aparición de grietas en planos a 45° y -45° sobre el eje Y por fatiga a cortante máximo, con la consiguiente rotura del material por ser frágil y poco resistente a la tracción.

Con respecto al Tiempo de inducción a la oxidación el resultado proporcionado por el laboratorio es de 2.1 minutos (+/- 1.6 minutos) y según la norma UNE EN ISO 11357-6 debe de ser ≥ 20 minutos, ello indica que las moléculas de la resina han sufrido oxidación y por lo tanto un endurecimiento del material cuyo resultado es una mayor facilidad a la fractura. El único ambiente agresivo al que ha podido estar sometido el material es el producido por la existencia de agentes químicos disueltos con el agua, en este caso, cloro que no alcanza la concentración máxima de 1 mg/litro establecido por la legislación. Por tanto, aunque el material haya estado sometido a stress por variación de la presión, la disminución del tiempo de oxidación puede ser atribuible a la falta de eficacia del antioxidante residual del material en su fabricación.

Con respecto a la Determinación de negro carbón, el resultado proporcionado por el laboratorio es del 1.59% (+/- 0.18%) y según la norma UNE 53-375-3 debe estar comprendido entre el 2 y 2.5 %. El uso más común del negro carbón es su utilización como pigmento y como base de refuerzo (en menor proporción). El PE no es un material higroscópico, no obstante, el negro carbón usado como aditivo anti-ultravioleta absorbe la humedad del ambiente. La radiación ultravioleta en combinación con agua u otras condiciones oxidantes del ambiente pueden causar un desvanecimiento del color, picaduras, desmenuzamiento, fisuras en la superficie, agrietamientos y fragilidad. Por lo que, la disminución de negro carbón ha podido provocar y/o contribuir de forma efectiva a un envejecimiento por la intemperie, se desconoce la ubicación (fábrica, almacén, acopio en obra, etc.), así como los tiempos de exposición a los que ha estado sometida la tubería por radiación ultravioleta, dato que se desconoce en el momento de redactar este informe.

Con respecto a la determinación de la resistencia a la presión interna la tubería sometida a una presión de prueba de 15.32 bar no produjo rotura, resultado positivo, pero no concluyente porque el ensayo se realiza a presión estática constante con el tiempo, mientras

que las redes en servicio poseen ciclos de presión con iniciadores de fractura en el material. La justificación de que el material resiste en el ensayo se justifica mediante la hipótesis nº2.

Con respecto a la morfología superficial mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), figura 11, se deduce que la tipología de la grieta es del tipo frágil. En las micrográficas aparecen roturas y dislocaciones en el material provocado por esfuerzos a tracción, no aparecen las líneas Wallner debido al elevado número de aumentos de las imágenes por SEM. Visualmente en las superficies de las grietas no aparecen pigmentaciones, coloraciones, oclusiones etc., que indiquen la existencia de ataque químico en el material. No se observan deposiciones de carbonato cálcico en las muestras, se desconoce si en la preparación de la muestra se han eliminado con el objetivo de tener mayor penetración en el haz de electrones en el microscopio de barrido.

Figura 11: Superficie interior de la grieta (1).

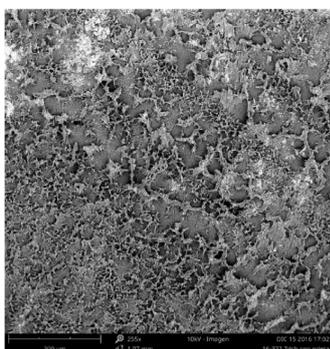


Imagen 2.1. Superficie en el interior de la grieta (1).



Imagen 1.1. Superficie en la dirección de la grieta (1).

5. Conclusiones

Las causas de las roturas de las tuberías de polietileno provocada en la muestra nº1 son atribuibles al material de forma individualizada o en combinación con algunos de los siguientes defectos, pérdida de elasticidad del material (atribuible a la fabricación), falta de eficacia del antioxidante residual del material (atribuible a la fabricación) y envejecimiento por la intemperie, radiación ultravioleta (atribuible a la fabricación y a los tiempos de exposición de radiaciones ultravioleta a los que ha estado sometido el material).

Aunque no se poseen datos, los posibles defectos en la mezcla de los plásticos básicos con plastificantes, cargas, colorantes y otros ingredientes, y defecto en la boquilla y/o en el mandril refrigerado de la máquina de extrusión también contribuyen en la formación de las patologías de las tuberías de polietileno.

Las redes de polietileno instaladas en la UE poseen una longitud de proyecto de 605 m, y las fugas detectadas y reparadas por la empresa gestora, durante el periodo de tiempo desde el año 2015 hasta febrero de 2018 han sido de 98 unidades, de forma proporcional implica 1 fuga cada 6.17 metros de tubería, ello supone que las redes de abastecimiento se encuentran mayoritariamente reparadas, lo que supone un aumento de accesorios instalados. Un aumento de puntos con accesorios incrementa la probabilidad de fugas por poros, nuevas roturas por la existencia de iniciadores de fractura cercanos a la fuga reparada, disminución del rendimiento hidráulico, aumento de costes por nuevas reparaciones, etc., derivando en una mala calidad del servicio de agua potable.

Es muy difícil evaluar el número de iniciadores de fractura que aún poseen las redes de abastecimiento de agua potable, no obstante, un indicador de su existencia es el número de fugas que se puedan generar a partir de la fecha de la última fuga detectada y reparada. La acción correctora que se propone es sustituir toda la red de abastecimiento de agua potable e instalar sistemas de regulación automática en el sector de la UE.

6. Referencias

- Allievi, L. (1914). Teoría del Colpo d'Ariete (Theorie des Wasserstosses). *Schweizerische Bauzeitung*, 63(25), 357. <https://doi.org/10.5169/seals-31481>
- ASM International Handbook Committee. (1988). *Engineered materials handbook. Volume 2, Engineering plastics*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Balairón, L. (2006). *Nuevos criterios para la caracterización de las conducciones a presión*. (C. de E. Hidrográficos, Ed.). Madrid: CEDEX, D.L.
- Ferrer, C. (2006). *Diagnóstico del comportamiento en servicio de materiales*. (U. P. de V. D. de I. M. y de Materiales, Ed.). Valencia: Editorial UPV, D.L.
- González, J. L. (2004). *Mecánica de fractura* (2 ed.). México: Limusa.
- Hayes, M., Edwards, D., & Shah, A. (2015). *Fractography in Failure Analysis of Polymers*. Elsevier Science. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=7dnEAgAAQBAJ>
- Marshek, K. M. (1975). Stress concentration factors: R.E. Peterson: John Wiley & Sons, New York 1974, xiv + 317pp (Book Review). *Mechanism and Machine Theory*. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(75\)90065-8](https://doi.org/10.1016/0094-114X(75)90065-8)
- Ministerio de la Presidencia. (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *Boletín Oficial Del Estado*, 7228–7245. Retrieved from <http://www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf>
- Romero, A. M., & Arrué, P. (2010). *Cálculo de instalaciones hidrosanitarias con software para calculadora gráfica HP y Excel: (adaptado al CTE, exigencias HS-4 y HS-5). Tomo I*. València: Universitat Politècnica de València.
- Romero, A. M., Arrué, P., & Cárcel, A. C. (2010). Elección de los materiales para el transporte de agua potable en base a la calidad del agua y análisis factorial de las variables de diseño en 2⁴. In *XI Congreso Nacional de Materiales*. Zaragoza.
- Romero, A. M., Arrué, P., Cárcel, A. C., & Ferrer, C. (2012). Diagnóstico del fallo por cavitación en válvulas de compuerta en servicio y su correlación con el diseño. In *XII Congreso Nacional de Materiales. XII Congreso Iberoamericano de Materiales* (pp. 105–109). Alicante.
- Rossman, L. (2000). EPANET. Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of Water Distribution Piping Systems. Cincinnati, OH 45268: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- SOLIDWORKS. Dassault Systems. [en línea]. <http://www.solidworks.com/es>.
- Temam, R. (1979). *Navier-Stokes equations: Theory and numerical analysis*. Amsterdam, etc.: North-Holland.
- Timoshenko, S. P & Gere, J.M. (1961). *Theory of elastic stability*. (J. M. Gere, Ed.) (2a. ed.). New York: McGraw-Hill.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method. Volume 2, Solid mechanics* (5th ed.). Oxford [etc.]: Butterworth-Heinemann.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

