

# Cuadernos de I+D+i

24

**Canal**   
**de Isabel II**

Estudio de casuística y modos  
de fallo en tuberías, acometidas  
y conjuntos de medida de la  
Comunidad de Madrid



© Canal de Isabel II 2016

#### **Autores**

*Patricia Gómez Martínez  
Georgina de la Fuente Salomón  
Ángela Martínez Codina*

#### **Dirección del estudio**

*Patricia Gómez Martínez*

#### **Agradecimientos**

Agradecemos la colaboración e implicación de todas las áreas y de las subdirecciones de Conservación de Infraestructuras (Zona Este) y Conservación de Infraestructuras (Zona Oeste), ambas han hecho posible la toma de muestras del presente trabajo, también a Marta Castillo y a Patricia Pérez que participaron en los orígenes de este proyecto, y a Soledad Canal por el esfuerzo en los trabajos de redacción y maquetación; todos ellos personal perteneciente a Canal de Isabel II.

Además, agradecemos la participación y profesionalidad del personal de las empresas colaboradoras: AYESA INGENIERÍA y Grupo WASSER que han trabajado en este proyecto.

ISSN de la edición impresa: 2254-8955  
ISSN de la edición en soporte electrónico: 2340-1818  
Depósito Legal: M-4956-2017

# 24

Estudio de casuística y modos de fallo  
en tuberías, acometidas y conjuntos de medida de la  
Comunidad de Madrid



## Exclusión de Responsabilidad

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.



## Presentación

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo de su Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde la Empresa para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los títulos aparecidos en la colección de Cuadernos de I+D+i son los que figuran en la tabla siguiente.

## TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I

<b>Nº colección</b>	<b>Año</b>	<b>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</b>
1	2007	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	2008	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	2009	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	2008	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	2008	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	2008	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	2008	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	2010	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	2010	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	2010	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	2010	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	2010	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	2011	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	2011	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	2012	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II
16	2012	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria

<b>Nº colección</b>	<b>Año</b>	<b>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</b>
17	2012	Mejora de la capacidad de pronóstico de aportaciones mensuales y estacionales en el ámbito de Canal de Isabel II
18	2013	Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización
19	2013	Un nuevo criterio para el cálculo del caudal de agua residual urbana
20	2014	Gestión de Ideas en Canal de Isabel II Gestión: la experiencia <i>GENYAL</i>
21	2014	Investigación sobre técnicas para la medición de subsidencias relacionadas con la explotación de acuíferos
22	2015	Régimen de precipitaciones en la Cuenca del Lozoya y adyacentes
23	2016	Estudio de observabilidad para la estimación del estado hidráulico de la red sectorizada de abastecimiento

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD	4
PRESENTACIÓN	5
TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I	6
RESUMEN EJECUTIVO	10
FICHA TÉCNICA	11
1. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO	34
2. ANTECEDENTES Y EXPERIENCIAS PREVIAS	36
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	42
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	43
3.2. VARIABLES ANALIZADAS	45
4. HERRAMIENTAS DE TRABAJO	47
4.1. FICHAS DE CAMPO	48
4.1.1. Para tuberías y acometidas	48
4.1.2. Para conjuntos de medida	48
4.2. ENSAYOS	57
4.2.1. Ensayos en laboratorio	57
4.2.2. Ensayos <i>in situ</i>	61
4.3. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS FINAL	61
5. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA ESTUDIADA	63
5.1. TUBERÍAS	67
5.2. ACOMETIDAS	69
5.3. CONJUNTOS DE MEDIDA	70

6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
6.1.	DISTRIBUCIÓN DE LAS ROTURAS EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS	75
6.1.1.	Según la edad	75
6.1.2.	Según el diámetro	78
6.1.3.	Según el material	80
6.2.	DISTRIBUCIÓN DE LAS ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA	84
6.2.1.	Según la edad	84
6.2.2.	Según el diámetro	86
6.2.3.	Según el tipo de instalación y alojamiento	87
6.3.	TIPIFICACIÓN DE LAS ROTURAS	90
6.3.1.	Causas aparentes de fallo	90
6.3.2.	Localización del fallo	111
6.3.3.	Modos de fallo	119
6.4.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	124
6.4.1.	Ensayos en tuberías metálicas	124
6.4.2.	Ensayos en tuberías plásticas	129
6.4.3.	Ensayos en suelos	134
6.5.	ANÁLISIS DETALLADO DE LOS RESULTADOS Y RELACIONES OBSERVADAS	140
6.5.1.	Curvas de fallo: relación edad y material	140
6.5.2.	Relación entre edad y causa de fallo	141
6.5.3.	Relación entre causa y modo de fallo	142
6.5.4.	Relación entre causa y localización del fallo	146
6.5.5.	Análisis por materiales y edad de la causa, localización y modo de fallo	149
7.	CONCLUSIONES	167
7.1.	RELATIVAS A LA IDENTIFICACIÓN DE LA CAUSA DE FALLO	168
7.2.	RELATIVAS A LA CAUSA, LOCALIZACIÓN Y MODO DE FALLO	169
7.3.	RELATIVAS A LOS MATERIALES MÁS FRECUENTES EN LAS ROTURAS	171
7.4.	CAUSAS Y ELEMENTOS MÁS PRESENTES EN EL FALLO DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA	173
	ANEXOS	174
ANEXO 1.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
ANEXO 2.	ÍNDICE DE FIGURAS	180
ANEXO 3.	ÍNDICE DE TABLAS	186



# Resumen Ejecutivo



## Ficha Técnica

<b>Título del proyecto</b>	Determinación de patrones de roturas y fallos estructurales en las redes de distribución, acometidas y conjuntos de medida de Canal de Isabel II.
<b>Línea de investigación</b>	Gestión estratégica de infraestructuras
<b>Unidades de Canal de Isabel II implicadas</b>	Subdirección de I+D+i Subdirección de Conservación de Infraestructuras Zona Este Subdirección de Conservación de Infraestructuras Zona Oeste Subdirección de Servicios Comerciales
<b>Participación externa</b>	Ayesa Ingeniería S.A. y Grupo Wasser S.A.E.
<b>Objeto y justificación del proyecto</b>	Análisis de las roturas producidas en la red de abastecimiento de la Comunidad de Madrid, con el fin de incrementar el conocimiento sobre los distintos tipos de roturas, analizando los procesos, circunstancias y variables que influyen en los fallos estructurales de las tuberías.
<b>Contribución al estado del arte</b>	Descripción detallada, mediante evidencias <i>in situ</i> , de los factores determinantes de las roturas en redes de distribución de agua. Estudio de las relaciones de estas variables con la causa, localización y modo de fallo.
<b>Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes</b>	<p>El estudio realizado incluyó la visita <i>in situ</i> y análisis de la información recopilada de una muestra de 4.991 roturas de tuberías, acometidas y conjuntos de medida con el fin de profundizar en el conocimiento de las principales patologías que afectan a estos elementos y las causas determinantes de su rotura.</p> <p>Las campañas de reconocimiento sobre dicha muestra comprenden la propia obtención de datos en campo, ensayos de resistencia <i>in situ</i> y la toma muestras, tanto de tubos como de terreno, para su análisis posterior en laboratorio mediante una campaña específica de ensayos según el tipo de muestra. Posteriormente, con todos los datos registrados en las visitas y con información complementaria de gabinete obtenida, tanto de los ensayos de laboratorio como de las bases de datos disponibles en la empresa, se ha construido una base de datos de roturas que engloba la muestra completa, y que ha hecho posible el análisis de la variada casuística.</p> <p>El proyecto se ha llevado a cabo en dos fases. En la primera fase de los trabajos se analizaron roturas en tuberías y acometidas, incorporando además el estudio de los conjuntos de medida en la segunda fase.</p>
<b>Resumen de resultados obtenidos</b>	<p><b>Caracterización de las roturas</b> y fallos en tuberías de abastecimiento, acometidas y conjuntos de medida de Canal de Isabel II, e identificación de las principales variables con influencia sobre las roturas.</p> <p><b>Tipificación de las causas</b>, localización y modo de fallo para roturas en tubería general, acometidas y conjuntos de medida.</p> <p><b>Mejora en la valoración del comportamiento</b> de los principales materiales presentes en la red de Canal de Isabel II, identificando las causas aparentes de fallo y su relación con la localización y los modos de fallo para cada uno de ellos.</p> <p><b>Elaboración de una base de datos de roturas</b> apoyada en nuevas variables explicativas con información de detalle, específica y fiable, que permitirá desarrollar nuevos proyectos relacionados con la predicción del fallo y la caracterización de la vida útil de las infraestructuras.</p> <p><b>Establecimiento de criterios preventivos y de buenas prácticas</b> en las fases de proyecto y puesta en obra de tuberías así como de los principios adecuados para la gestión estratégica de las inversiones en ampliación y renovación de tuberías.</p>
<b>Líneas de Investigación abiertas para la continuación de los trabajos</b>	<p>Estudio de las roturas y averías que se producen en los elementos singulares de la red de abastecimiento, como son las válvulas, piezas especiales y juntas; así como el estudio detallado de la casuística de las roturas en tuberías de fundición dúctil y acometidas de polietileno de alta densidad, que cumplen con la normativa vigente en Canal de Isabel II.</p> <p>Desarrollo de vida útil de las infraestructuras de abastecimiento basado en la predicción del fallo, a partir de las variables que pueden condicionar el deterioro de las infraestructuras.</p> <p>Estudio de transitorios hidráulicos en la red de abastecimiento, con el fin de cuantificar su influencia en la ocurrencia de los fallos y en el deterioro de la red.</p>

## Resumen Ejecutivo

### 1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

La red de abastecimiento actual de Canal de Isabel II, es el resultado de un conjunto de políticas de diseño, gestión e inversión en infraestructuras a lo largo del tiempo. Asimismo, la normativa de referencia ha ido evolucionando, instalándose las tuberías de acuerdo con los criterios y requisitos vigentes de cada momento. Todo ello ha generado una red actual que presenta elementos con una gran diversidad en cuanto a edad, diámetro, material, características técnicas del material, según la fecha de fabricación y procedimiento de instalación. Además esta red es consecuencia de las diferentes políticas de operación y mantenimiento que en mayor o menor medida han podido condicionar su deterioro.

Con este proyecto se ha buscado realizar un análisis específico de las roturas que se producen en la red para caracterizar los procesos, circunstancias y principales variables que han podido influir en los fallos estructurales de las tuberías y conjuntos de medida. A pesar de que Canal de Isabel II efectúa el registro y seguimiento de todas las roturas que ocurren en la red de abastecimiento, para este estudio se necesitaba una toma de datos de detalle durante la fase de reparación y la obtención de muestras, tanto de tubería como de terreno, tareas que sólo eran abordables mediante visitas *in situ*.

Por otra parte, a través de la recopilación y filtración de los datos se deseaba construir una base de datos fiable de roturas que permitiera desarrollar futuros proyectos. Este trabajo constituye una primera aproximación a la determinación del grado de deterioro de la red y el desarrollo de un modelo de vida útil de las infraestructuras.

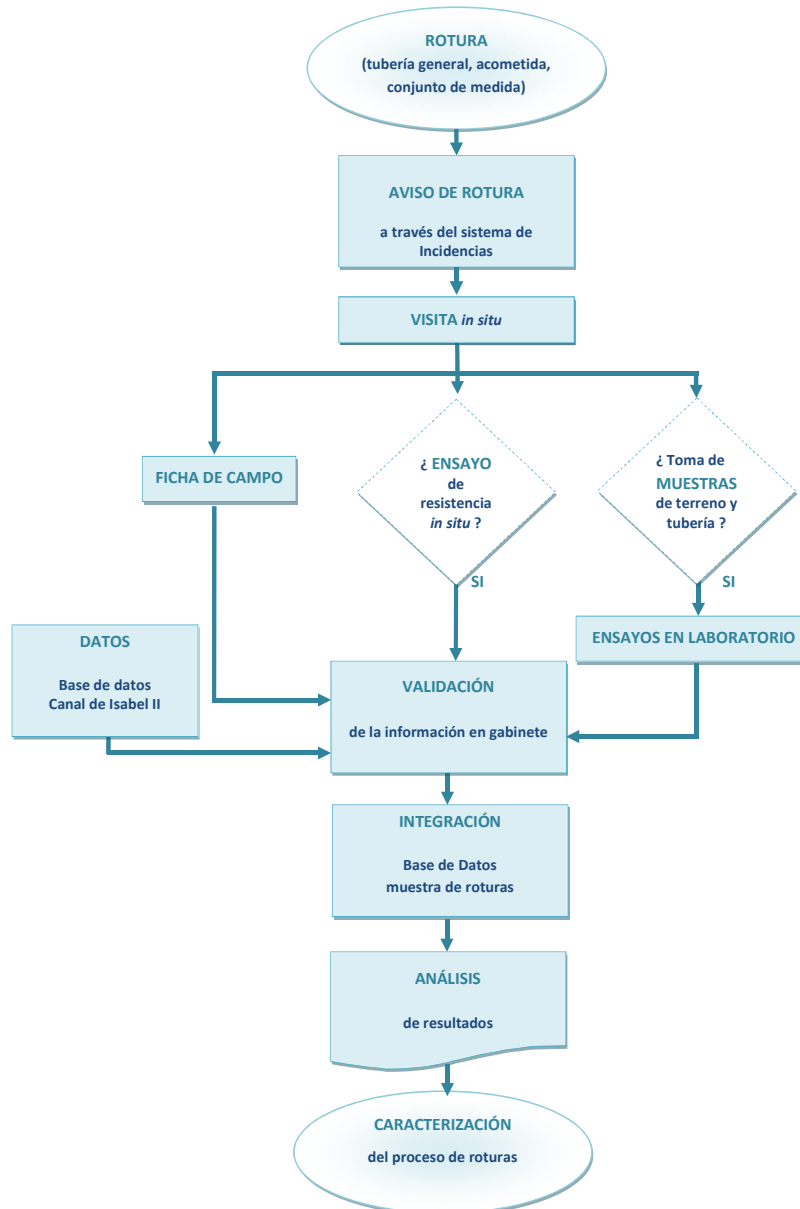
### 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El estudio se ha basado en la toma y análisis de muestras de fallos en la red de abastecimiento. Sólo descubriendo la infraestructura y analizando el detalle de cada rotura se pueden identificar todas las variables que, en mayor o menor medida, pueden haber tenido influencia en el deterioro de la red o explicar los motivos por los que se ha desencadenado el fallo. La metodología de trabajo seguida en el proyecto se apoya en tres tipos de trabajos diferenciados (Figura 1):

- Campaña de visitas *ex profeso* a las roturas y fallos durante todo el proceso de su reparación, que incluían la toma de datos en campo de todas las variables de interés, la toma de muestras de tubería y de terreno cuando se estimaba necesario, y los ensayos *in situ* de resistencia del terreno siempre que se podía acceder a la zanja. Para desarrollar esta fase se ha diseñado una ficha de recogida de datos específica para tubería general y acometida, y otra particularizada para conjuntos de medida.
- Campaña de ensayos en laboratorio sobre muestras de tubería, diferenciando el tipo de ensayo según las características del elemento (tuberías metálicas y plásticas), y sobre muestras de terreno obtenidas del relleno de la zanja.
- Trabajo en gabinete para depuración de toda la información recopilada en las visitas, análisis estadístico de todas las variables identificadas, y estudio de los resultados obtenidos en laboratorio.

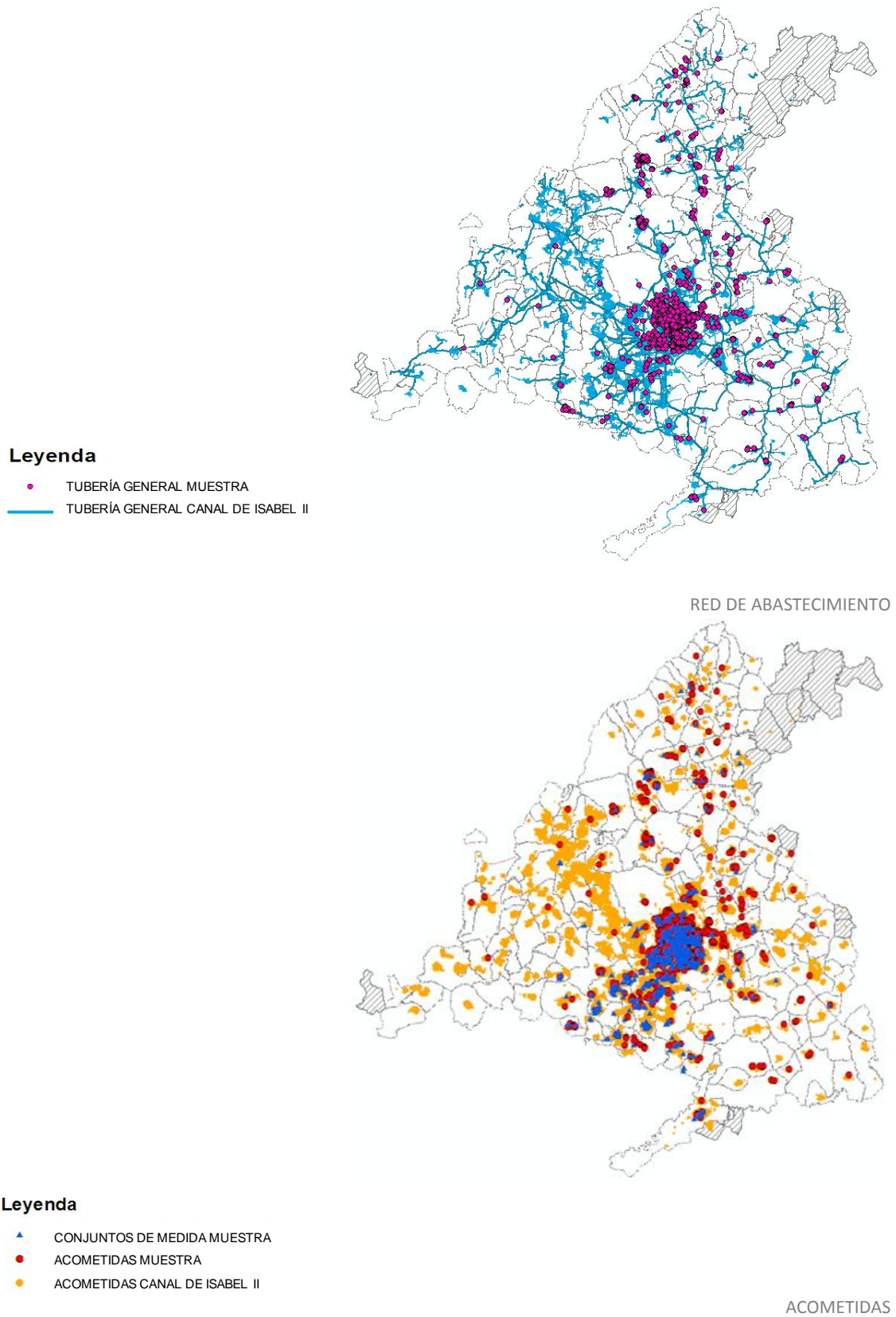
En esta fase se ha elaborado una base de datos de roturas que se ha completado con información disponible en la empresa referente a la operación de la red, características de la misma, historial de averías y valores ambientales propios de cada localización.

FIGURA 1. METODOLOGÍA DE TRABAJO



Los registros del estudio se seleccionaron procurando una distribución homogénea en el ámbito de la Comunidad de Madrid, a lo largo del periodo de abril de 2010 a enero de 2013, que se representa en la Figura 2. No obstante, el trabajo se desarrolló en dos fases que atendieron a criterios diferentes, teniendo peso en la selección de las muestras ciertos aspectos como procurar obtener el número de registros suficientes de cada elemento y material analizado.

**FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS REGISTROS DE LA MUESTRA DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA SOBRE LA RED DE ABASTECIMIENTO Y SOBRE LOS PUNTOS DE ACOMETIDA**





### 3. VARIABLES DE INTERÉS

Para este estudio se identificaron en primer lugar todas las variables que inicialmente se consideraron condicionantes del deterioro de los elementos. Se partió de las variables de interés presentes en la bibliografía de referencia, pero con el desarrollo de los trabajos se fueron incorporando o perfilando nuevos aspectos que se estimaron importantes para la caracterización de los registros muestreados. La información ha sido recopilada a través de visitas en campo a las roturas mediante fichas específicas y se completó a través de otras bases de datos disponibles de la empresa.

Las variables más significativas que se han procurado estudiar de manera generalizada para todos los registros de rotura en tuberías, acometidas y conjuntos de medida se resumen a continuación:

- **Variables relacionadas con la ubicación y las condiciones ambientales, a las que está sometido el elemento:** se incluyen calle, municipio, fecha, hora, coordenadas, temperaturas y precipitación, asociadas a la localización de la rotura, etc.
- **Variables descriptivas del estado de la tubería:** hacen referencia a las principales patologías que se observaron: ovalación, corrosión interna y externa, aplastamiento, incrustaciones, etc.
- **Variables descriptivas del estado y condiciones de la instalación:** se incorporan el tipo de instalación y su estado, uniformidad y tipo de material de relleno y de la cama, altura del recubrimiento, presencia de árboles, presencia de huecos de lavado, existencia de canalizaciones cercanas, presencia de materia orgánica, tipo de tráfico, yesos, escombros, rellenos antrópicos, etc.

En el caso de conjuntos de medida se evaluó la ubicación del mismo (exterior, enterrado en acera, situado en el interior en portal, etc.), así como el montaje (en escuadra, recto o mixto) y alojamiento que lo contenía (armario, arqueta o cuarto de contadores).

- **Variables relacionadas con el mantenimiento y operatividad de la red:** se incluyen los datos relativos a la presión, caudal, y coincidencia con maniobras en los días próximos a la rotura. En este sentido, se ha estimado un ratio relativo al agrupamiento espacial y temporal de la rotura, midiendo el índice de roturas en un radio inferior a 2 km producido en los 20 y 90 días anteriores. Asimismo, para las roturas pertenecientes a un sector, se ha incorporado el índice de roturas del sector en los 20 y 90 días anteriores, y las oscilaciones máximas y medias diarias en los siete y treinta días anteriores, junto con los valores de presión de entrada al sector.
- **Variables relativas al fallo:** causa aparente de fallo, localización del fallo y modo del fallo, para las que se efectuaba una primera estimación en campo que se verificaba posteriormente en gabinete.

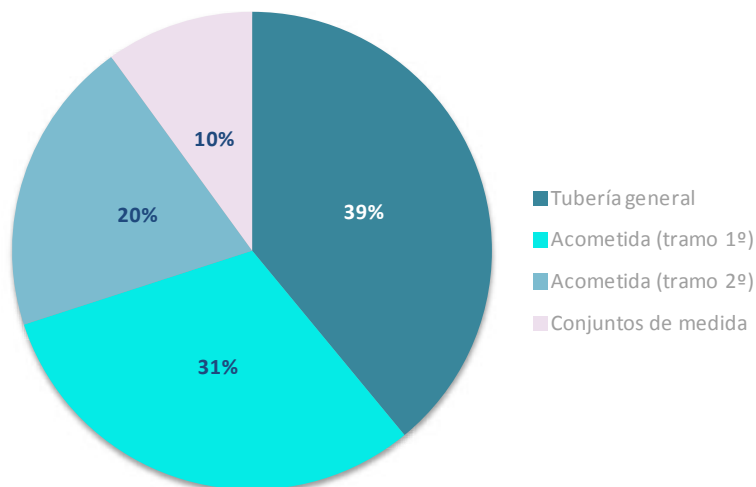
En el caso de roturas en tuberías y acometidas, se han incluido también variables relacionadas con las características propias del elemento entre las que se incluyen el material, diámetro, espesor o presión nominal.

En el caso de los conjuntos de medida, se han estudiado adicionalmente variables específicas relativas a los principales componentes de un conjunto de medida: llave de entrada, contador y llave de salida. En la parte relativa a las llaves se ha distinguido: la tipología (de bola, la más común, o de segmento), el tipo de accionamiento (de volante o de llave), y el material de cada uno de los componentes más significativos de la llave (accionamiento, cuerpo, obturador y eje). Se ha especificado el tipo de contador (mecánico o electrónico), la tipología del medidor (de turbina o volumétrico) y el año de instalación. Se ha considerado si la instalación disponía de elemento antirretorno (ya sea interno, en el propio mecanismo de la llave de salida, o bien como una válvula exenta) y de toma de comprobación. Además, se ha analizado el cumplimiento de los aspectos más significativos de la normativa vigente en los conjuntos de medida visitados según la Especificación Técnica de Acometidas de Agua para consumo Humano (2011) de Canal de Isabel II.

#### 4. TIPIFICACIÓN DE LAS ROTURAS

La muestra recogida está constituida por un total de 4.991 roturas visitadas. De ellas, 1.937 se corresponden con tubería general, 2.545 con acometidas y 509 con conjuntos de medida (Figura 3).

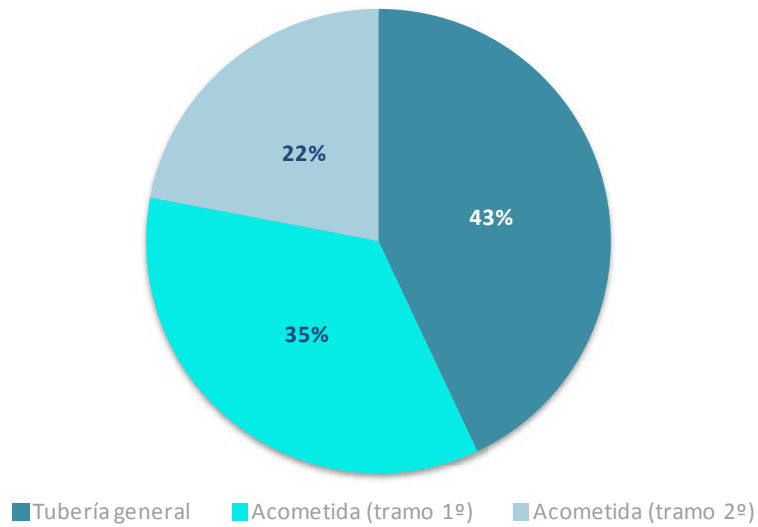
FIGURA 3. COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA



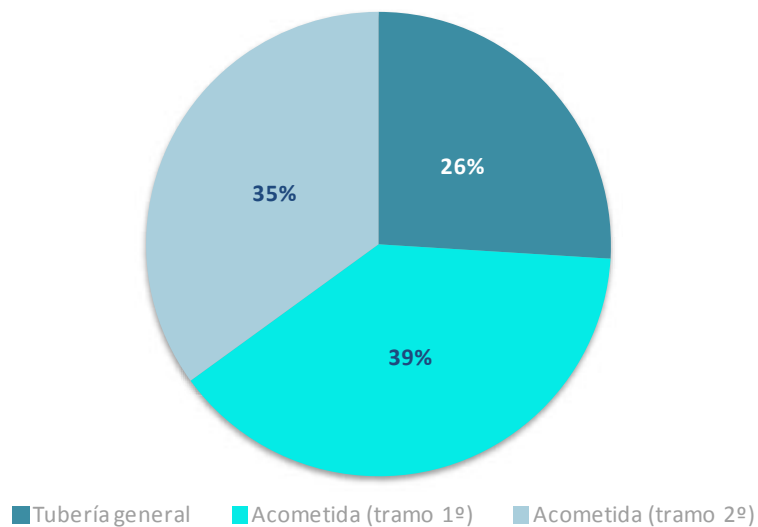
La representatividad de la muestra seleccionada está basada en datos conocidos como: tipo, material, diámetro, distribución geográfica, edad, periodo estacional, emplazamiento y condiciones en que se produjo la rotura.

Del análisis comparativo de la muestra con los datos registrados en las bases de datos de Canal de Isabel II en el mismo espacio temporal del estudio (Figura 4 *a.* y *b.*) se dedujo una ligera desviación en la distribución de roturas entre tubería general y acometidas. No obstante, la muestra se estimó representativa de la red de abastecimiento, ya que esta discrepancia se debe al hecho de que en la definición del estudio se buscaba cubrir un determinado número de roturas de cada tipología y material para su caracterización completa.

**FIGURA 4.** DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN LA MUESTRA Y EN CANAL DE ISABEL II, SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL ELEMENTO



a. Distribución de roturas de la muestra, según la tipología del elemento



b. Distribución de roturas en Canal de Isabel II, según la tipología del elemento

En tubería general, las roturas de edad conocida han presentado un número de roturas mayor a los 50 años de edad, observándose además una leve incidencia hasta edades de 5 años. La edad avanzada destaca como condicionante principal del deterioro en el tiempo, mientras que los fallos a edades tempranas se han asociado principalmente a defectos en la instalación. En el caso de las acometidas no se ha podido realizar este análisis por carecer de información suficiente en cuanto a la edad.

En cuanto a los diámetros, el 80% de las roturas de la muestra de tubería general se han concentrado en diámetros menores de 150 mm; y en acometidas, el 40% se han producido en diámetros de hasta 20 mm. Comparando con la información relativa a la red instalada se corroboran estudios previos que afirman que la probabilidad de ocurrencia de roturas es mayor cuando los diámetros son más reducidos, guardando una cierta relación con el menor espesor de las tuberías.

Con relación al material, las roturas de la muestra de tubería general se han concentrado en materiales que están fuera de la normativa vigente de Canal de Isabel II: un 45% en tuberías de fundición gris y un 31% en fibrocemento. Frente a estos materiales, la fundición dúctil, que está contemplado en la normativa actual, representa un 10% de la muestra a pesar de su mayor presencia en la red (aproximadamente un 70% de la red instalada). Las acometidas han presentado resultados similares, con un mayor porcentaje de roturas en polietileno fuera de norma (56% de la muestra) frente al polietileno de alta densidad (18%) que se contempla en la normativa.

Estos resultados se han contrastado mediante el cálculo de los índices de rotura de los materiales correspondientes a tubería general, analizando la frecuencia de roturas de cada material (no se dispone de información suficiente de la red de acometidas instalada para este cálculo). Así se ha confirmado un mejor comportamiento de la fundición dúctil frente al resto de materiales según se observa en la Tabla 1, con un ratio de roturas descendente. Anualmente se mantiene el número de roturas, aumentando la longitud de red de fundición dúctil instalada.

**TABLA 1. ÍNDICES DE ROTURA POR KILÓMETRO INSTALADO, SEGÚN MATERIAL**

MATERIAL	Ratio Roturas/km instalado			
	2010	2011	2012	2013
Fibrocemento	0,82	0,80	0,71	0,72
Fundición dúctil	0,04	0,03	0,03	0,02
Fundición gris	0,69	0,55	0,55	0,52

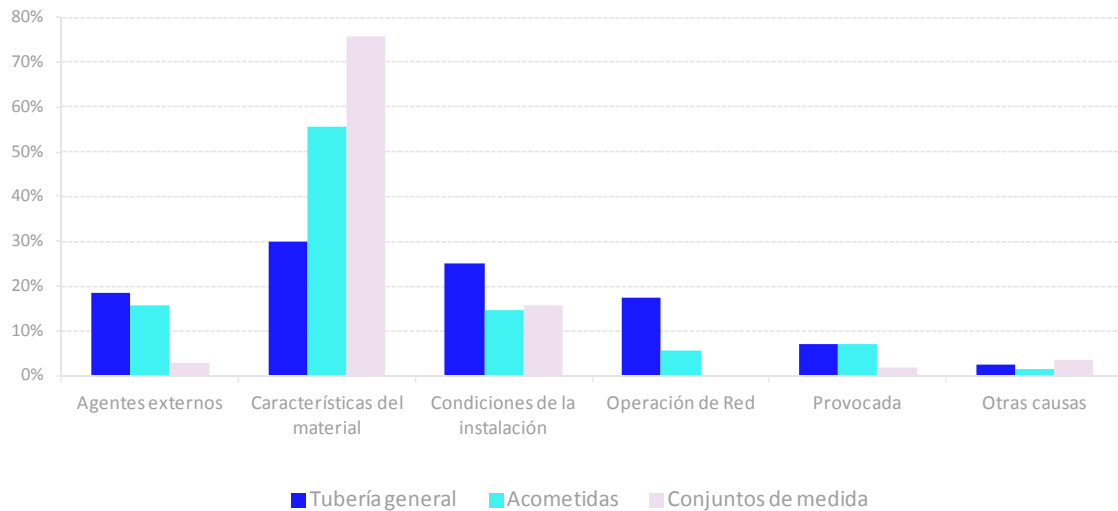
La revisión de los resultados obtenidos durante la inspección y toma de datos en campo ha permitido la caracterización de las causas, la localización y el modo de fallo, en función de las cuales se estudian las relaciones y se extraen las conclusiones finales sobre el comportamiento de cada uno de los elementos del presente estudio. A continuación se muestra esta tipificación de las roturas así como su valoración para los registros de la muestra. Se ha realizado una clasificación común para tubería general y acometida, requiriendo categorías independientes para los conjuntos de medida por sus características particulares de localización e instalación.

#### 4.1. Causa de fallo

Las causas de fallo se han agrupado como: agentes externos a la tubería (raíces, heladas y sobrecargas externas), características intrínsecas del material (corrosión y defectos de material), condiciones de instalación (asentamientos del terreno y defectos de instalación), operación de la red (variaciones de presión/maniobras y fatiga), provocadas (incluye robo de componentes, que es específica para conjuntos de medida) y otras causas.

En la muestra registrada (Figura 5), las roturas en tubería general se produjeron principalmente por las características intrínsecas del material (30%) y las condiciones de instalación (25%). En el caso de las acometidas y los conjuntos de medida, se mantuvo la causa relativa a las características del material siendo determinante para el 56% de las acometidas muestreadas y para el 76% de los fallos en conjuntos de medida, en los que el 73% de las roturas se asociaron al deterioro por corrosión.

**FIGURA 5. CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN TUBERÍAS, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA**



#### 4.2. Localización del fallo

La localización del fallo en tubería y acometida se ha clasificado como: en pared de tubo o en junta, pieza especial o accesorio; considerando además la tipología de la instalación: enterrada en zanja, en arqueta, aérea, en galería visitable y otros.

En el caso de la muestra, se observó que el mayor número de fallos se concentró en pared de tubo para tubería general, con un 78% de incidencia del total de tubería general; mientras que el fallo en acometidas se concentró en las uniones, con un 54% del total de las roturas de acometidas de la muestra. En la Figura 6 se presenta la localización del fallo sobre el total de la muestra de roturas.

En el caso de los conjuntos de medida, que se encuentran constituidos por varios componentes distintos, la localización del fallo y el modo de fallo se han estudiado de forma conjunta en función del elemento de rotura de cada registro y la tipología de los mismos: válvula antirretorno, contador, llaves y otros. El desglose pormenorizado de los diferentes modos de fallo para cada uno de los elementos se estimó fuera del alcance del presente trabajo.

Los fallos en la muestra de conjuntos de medida (Figura 7) se concentraron en las llaves (71%) y en la categoría otros (18%) que hace referencia a fallos que se produjeron en diversos elementos tales como la "T" de comprobación, codos, uniones de tubos que no sean de la unión con las llaves o contador, etc.



FIGURA 6. LOCALIZACIÓN DEL FALLO EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS

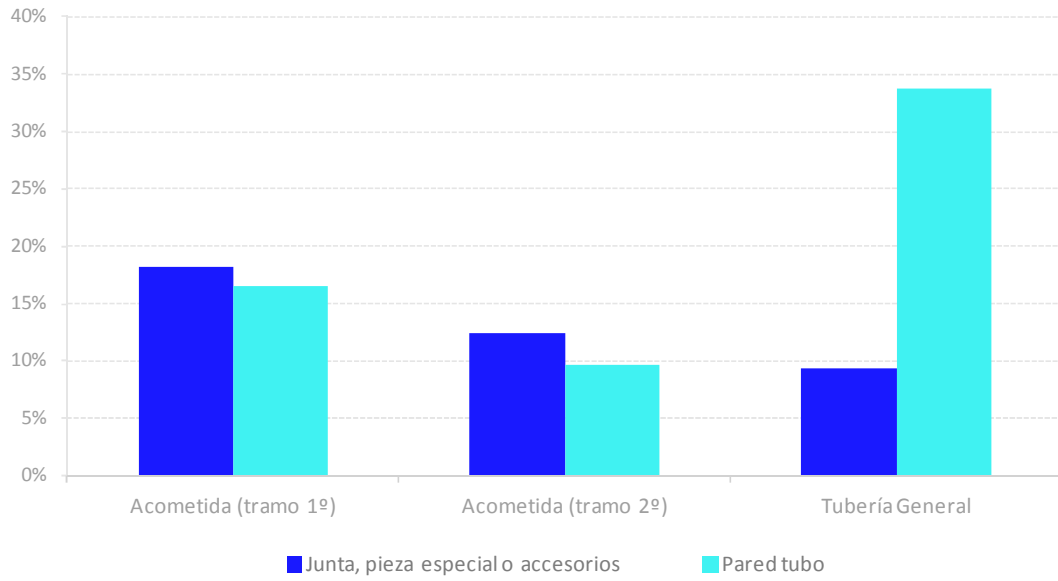
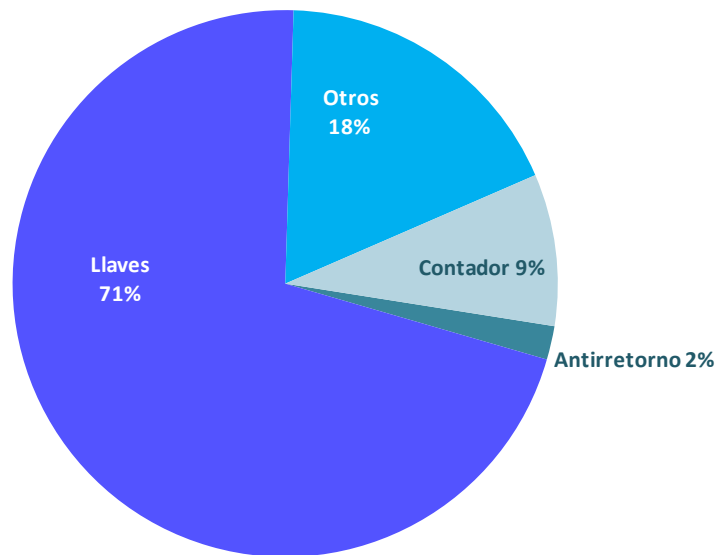


FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DEL FALLO EN CONJUNTOS DE MEDIDA

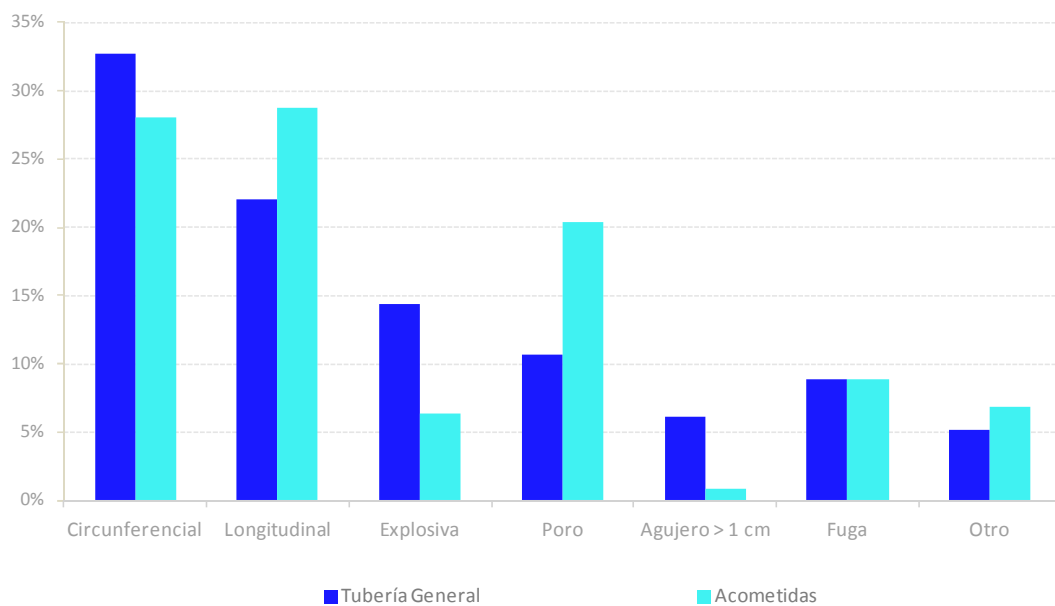


### 4.3. Modo de fallo

En cuanto al modo de fallo para tubería general y acometidas, en las visitas se han identificado las roturas de tipo: circunferencial, longitudinal, explosiva, poro, agujero, fuga y otros.

El modo de fallo predominante en la muestra de tubería general es el circunferencial (33%), seguido por las roturas de tipo longitudinal (22%) y la rotura explosiva (14%). Sin embargo, en las acometidas, prevalecen ligeramente las roturas longitudinales (29%) junto a las circunferenciales (28%) sobre el resto de tipos. La distribución de la muestra se puede observar en la Figura 8.

**FIGURA 8. CLASIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO PARA TUBERÍA Y ACOMETIDA**



## 5. ENSAYOS

Se realizaron en total 843 ensayos en tuberías sobre muestras de tuberías metálicas y plásticas, así como 1.174 ensayos de terreno de acuerdo con la tipología recogida en la Tabla 2.

Dado que el trabajo se desarrolló en dos fases, no todas las muestras fueron sometidas al mismo número de ensayos; los resultados de la primera fase orientaron la línea de ensayos de la segunda fase y, en algunos casos, se hizo coincidir ensayos en tuberías metálicas con análisis en el material de relleno. A continuación se presentan las conclusiones obtenidas.

**TABLA 2. TIPOLOGÍA DE LOS ENSAYOS REALIZADOS**

<b>ENSAYOS EN TUBERÍAS METÁLICAS</b>	Ensayo de dureza Brinell
	Ensayo de resistencia a la tracción
	Determinación metalográfica de la microestructura
	Análisis químico de los productos de la corrosión
	Composición química de perfiles metálicos
<b>ENSAYOS EN TUBERÍAS PLÁSTICAS</b>	Determinación de las propiedades de tracción
	Determinación de la densidad de plásticos
	Determinación de las propiedades de flexión de plásticos
	Determinación de la rigidez anular
	Determinación del tiempo de inducción a la oxidación (TIO)
<b>ENSAYOS EN SUELOS</b>	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
	Límites de Atterberg
	Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo
	Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe
	Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa
	Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo
	Determinación del contenido en sales solubles
	Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico
	Determinación de pH
	Determinación de la resistividad de suelos
	Determinación de la densidad de un suelo
	Determinación del peso específico de las partículas
	Resistencia <i>in situ</i> mediante penetrómetro de dial

### 5.1. Ensayos sobre tubería por material

De los ensayos sobre tuberías de **fundición gris** se ha deducido una cierta correlación entre el contenido en fósforo, la presencia de esteadita y la fragilidad de las tuberías. De esta forma, se han observado mayores porcentajes de rotura para las causas de fallo **sobrecargas externas** y **variaciones de presión o maniobras** cuando el contenido en fósforo era superior al 0,3%. Además, se observó debilitamiento de la estructura asociada a la presencia de distintas tipologías de grafito que disminuyen su resistencia, y se vio que en todas las muestras con fallos de tipo explosivo, el contenido de azufre era elevado.

Por otra parte, se confirmó un proceso interno de oxidación en casi todas las muestras ensayadas, siendo en algunas de ellas muy importante, con reducción del espesor en las zonas afectadas. Se ha estimado que a pesar de que el desencadenante de la rotura haya podido ser otro, y por tanto la causa de fallo no sea corrosión, este aspecto puede haber tenido gran influencia en la mayor parte de roturas.

De tuberías de **fundición dúctil** ha sido más complicado obtener muestras para ensayar en laboratorio, ya que cuando el modo de fallo era de tipo **poro** o **circunferencial** habitualmente la reparación se realizaba mediante manguito o abrazadera en la zona afectada, sin proceder a la sustitución del tubo afectado. El número de muestras ensayadas no se estima suficiente para extraer resultados, aunque se ha observado que tres de las cuatro muestras de fundición dúctil, cuya causa de fallo fue **corrosión**, presentaron valores de silicio por encima del límite establecido, coincidiendo con el modo de **fallo longitudinal**. Este hecho coincide con la bibliografía que relaciona un mayor contenido en silicio de las películas de óxido formadas sobre los metales con un mayor número de grietas. Además, dos de ellas también tenían valores de fósforo superiores aunque no presentaron esteadita en su estructura.

En cuanto al **polietileno fuera de norma**<sup>1</sup> las muestras ensayadas no cumplían los mínimos establecidos para **alargamiento a tracción** y el 27% presentaron densidad por debajo del límite considerado como aceptable en el proyecto de 0,930 g/cm<sup>3</sup>, obteniéndose un amplio rango en los valores que se relacionan con los diferentes tipos de plásticos que engloba el polietileno fuera de norma.

Del estudio de la degradación de los tubos de polietileno (Figura 9) se ha confirmado el peor comportamiento generalizado para los materiales fuera de la normativa actual, que además coincide que son los más antiguos. Los **tubos negros** de materiales catalogados como PE32 y PE50B han presentado degradación severa tanto en la superficie interior como en la zona intermedia, con un mejor comportamiento en la superficie exterior los de PE50B. En el caso de los tubos de PE80, a pesar de que se han detectado ciertas muestras en las que la degradación oxidativa era inapreciable, por lo general se ha observado una pérdida significativa de antioxidantes en la superficie interior respecto de los valores de TIO<sup>2</sup> hallados en la zona intermedia o en la superficie exterior.

Analizando los resultados obtenidos del ensayo de degradación con el modo de fallo, y eliminando del análisis las roturas provocadas y aquellas donde el fallo no se localizó en pared de tubo, se ha deducido que las muestras con un bajo TIO presentaron fallo tipo poro, y fue especialmente significativo en tubos clasificados como PE32 y PE50B.

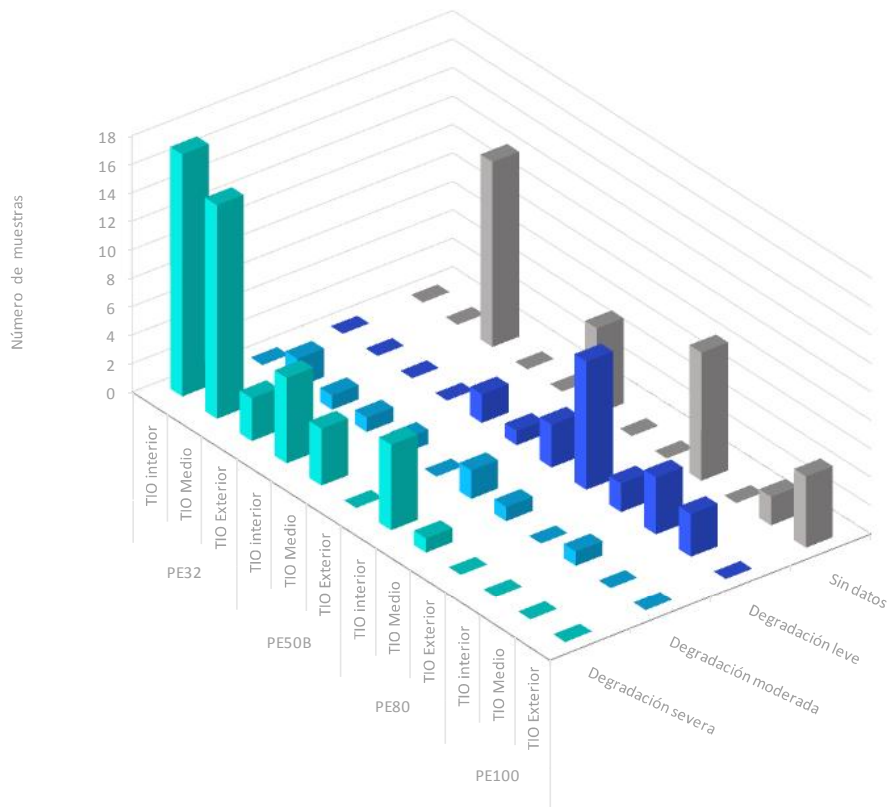
El **polietileno dentro de norma** cumplió con los valores de densidad mayor de 0,930 g/cm<sup>3</sup>, a pesar de que no cumplían los mínimos exigidos en el ensayo a tracción. Además, para el PE100 se observó un bajo grado de degradación. Es el material que mejores prestaciones tiene frente a la oxidación, pero además coincide que ha estado menos tiempo expuesto a los agentes desinfectantes presentes en el agua por su reciente instalación, a partir del año 2009.

---

<sup>1</sup> Se consideró **tubo de polietileno fuera de norma** todo aquel que no cumplía con las especificaciones marcadas en las Normas para Redes de Abastecimiento de Canal Gestión (Versión 2012).

<sup>2</sup> TIO: Tiempo de inducción a la oxidación.

**FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA DE POLIETILENO, SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL**



## 5.2. Ensayos de terreno

A través de los ensayos de terreno se pretendía clasificar el relleno de la zanja de acuerdo con la normativa de Canal de Isabel II (2012), que es acorde con lo establecido en el artículo 330 del PG 3, donde se definen las condiciones a cumplir para cada categoría de suelo.

Los resultados de la primera fase fueron diversos, y no se extrajeron resultados concluyentes. Sin embargo, de las 56 muestras de segunda fase, que fueron todas sometidas a los ensayos de contenido en materia orgánica, granulometría, límite líquido y límite plástico y contenido en sulfatos, y del estudio de los resultados en relación con las causas de fallo, se ha obtenido que: 3 muestras han sido clasificadas como suelo seleccionado y 8 como suelo adecuado, de las cuales sólo en 3 la causa de fallo está relacionada con defectos de instalación, mientras que de las 32 muestras con suelo tolerable, un 50% fallaron por asentamientos del terreno; por último, el 54 % de las muestras que se correspondían con suelos marginales e inadecuados por su alto contenido en materia orgánica han presentado corrosión como causa de fallo principal.

De los ensayos de resistencia *in situ* y su relación con las causas y la localización del fallo, se ha constatado que, tal y como figuraba en la bibliografía de referencia las roturas localizadas en junta, pieza especial o accesorio con causa de fallo **por características del material** y por **asentamientos del terreno** presentan valores medios de resistencia un 8% inferiores a los medios, que podrían estar relacionados con una menor compactación del relleno y de la cama, favoreciendo así desplazamientos diferenciales en las tuberías. Del estudio de la resistencia a la penetración del suelo y el modo de fallo parece que los suelos con menor resistencia presentan roturas en modo poro. No se deducen resultados concluyentes en relación con el material de la tubería.

## 6. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CADA MATERIAL PARA TUBERÍAS Y ACOMETIDAS

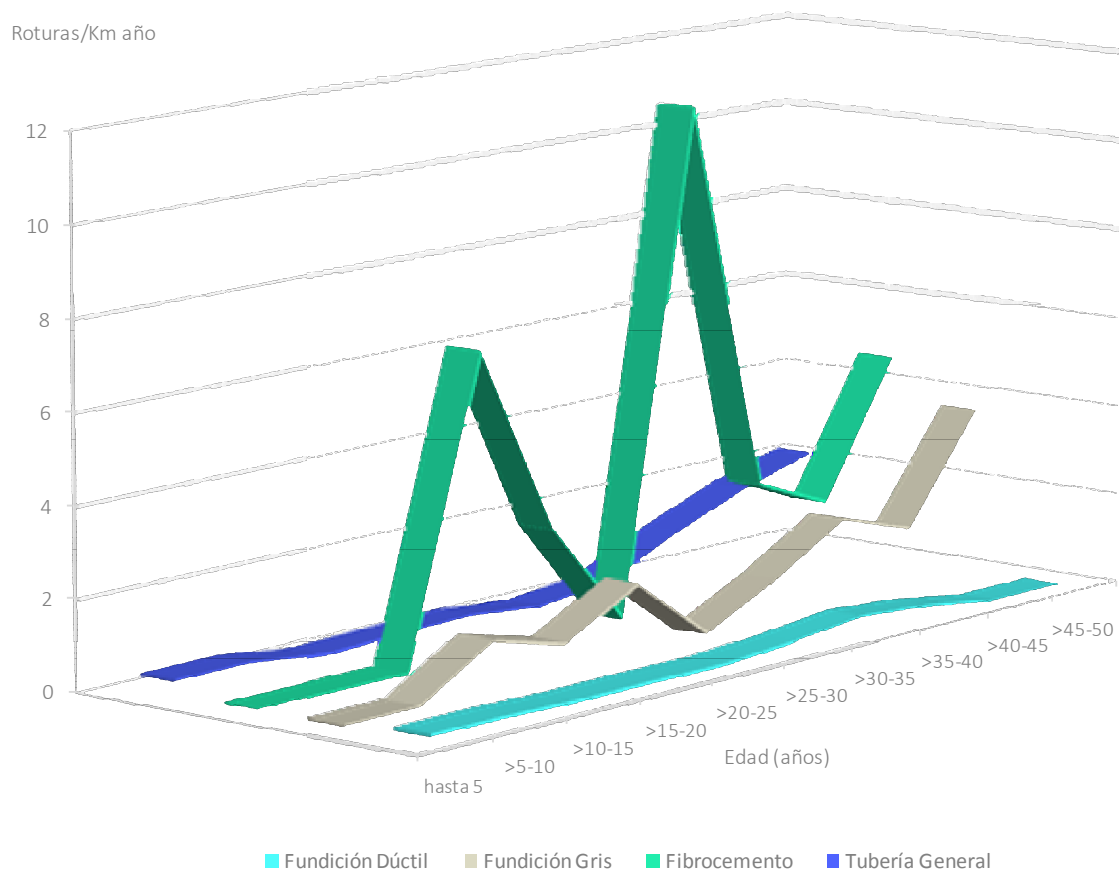
Se ha efectuado un análisis completo de los materiales predominantes en la muestra: fundición gris, fibrocemento y fundición dúctil para tubería general y polietileno fuera y dentro de norma, y plomo para acometidas, que además coinciden con los materiales más presentes en la red actual de Canal de Isabel II.

En primer lugar, se han representado las curvas de fallo-edad de los materiales de tubería general y se han comparado a su vez con la curva que resulta de representar todas las roturas para la red de tubería general instalada (Figura 10). Estas curvas de fallo-edad se han ajustado a la realidad a través de un factor corrector que considera el número de roturas totales en el periodo que comprende la muestra frente al número de roturas visitadas.

Del gráfico se deduce la menor tasa de roturas de la fundición dúctil frente al resto y la mayor similitud entre el comportamiento de la red instalada y este material en los últimos 35 años, pues es el material de más reciente instalación (en la actualidad, más de un 70% de la red está constituida por fundición dúctil).

Posteriormente se ha procedido al estudio individualizado de cada material. Las conclusiones se detallan seguidamente.

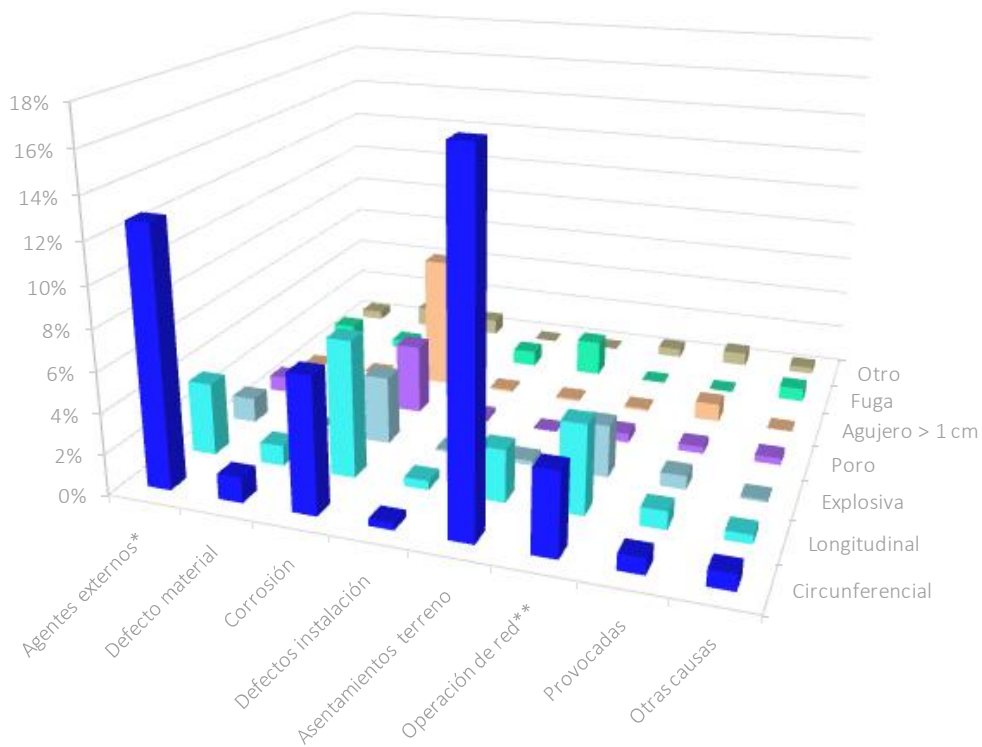
**FIGURA 10. CURVAS COMPARATIVAS DE FALLO-EDAD (ROTURAS/KM)**



### Fundición gris

Las roturas en fundición gris han representado el 45% de la muestra de tubería general. Las causas de fallo predominantes han sido las características del material por corrosión y defecto de material, que suman un 37%. Se ha observado relación entre la corrosión y los modos de fallo de tipo circunferencial, longitudinal y agujero. Además se ha detectado el predominio de los fallos de tipo circunferencial en las causas de agentes externos y asentamientos del terreno (Figura 11). Los fallos se localizaron principalmente en pared de tubería (83%), y como se ha indicado en los ensayos de laboratorio, una gran mayoría de las roturas de este material presentaron óxidos negros en su interior, dando indicios del aumento de la fragilidad del material ante sobrecargas y variaciones de presión.

**FIGURA 11. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN GRIS**



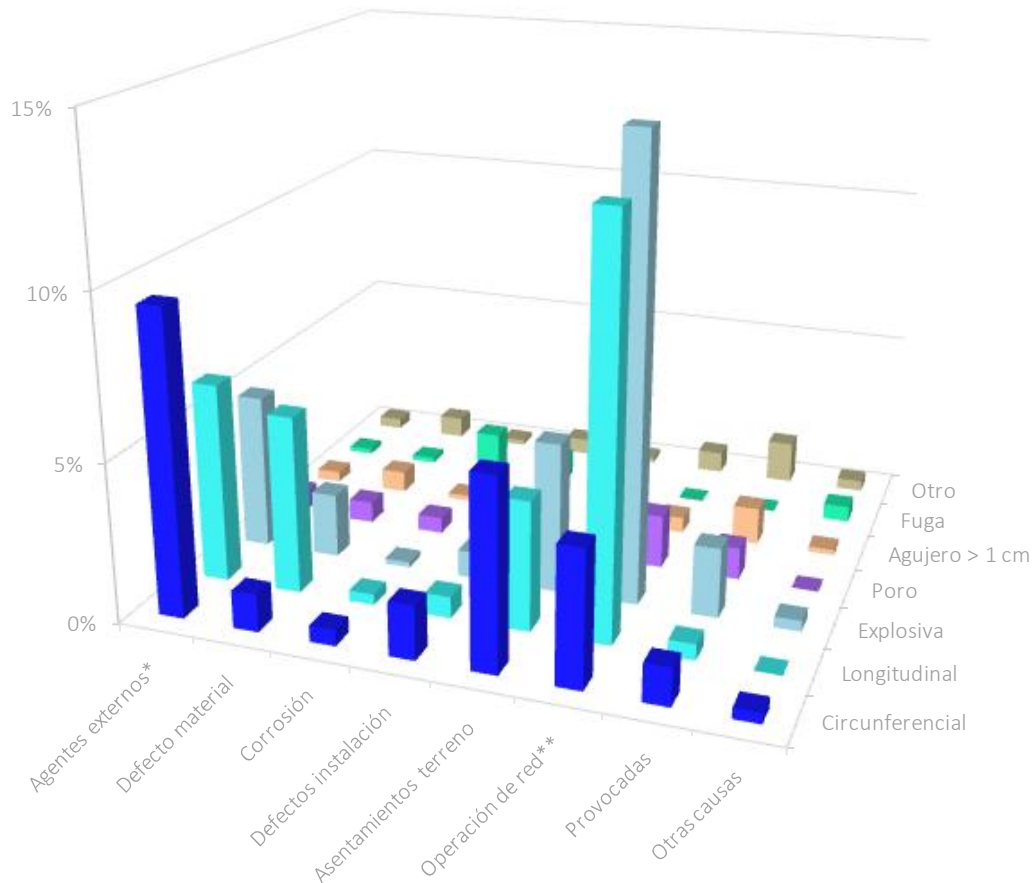
\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\*Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

### Fibrocimiento

El 31% del total de roturas en tubería general de la muestra han correspondido a tubos de fibrocemento. La causa más frecuente de fallo son las variaciones de presión o maniobras y fatiga (34%), con roturas en pared de tubo de tipo explosivo principalmente, y en menor medida longitudinal (Figura 12). Además, se ha observado un 13% de roturas en uniones y juntas, con fallo por defecto de instalación (23%), variaciones de presión (21%) y corrosión (21%). Se deduce que este material presenta mayor vulnerabilidad que el resto a presiones estáticas más altas y son más frecuentes las roturas en cadena.

**FIGURA 12. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FIBROCEMENTO**



\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

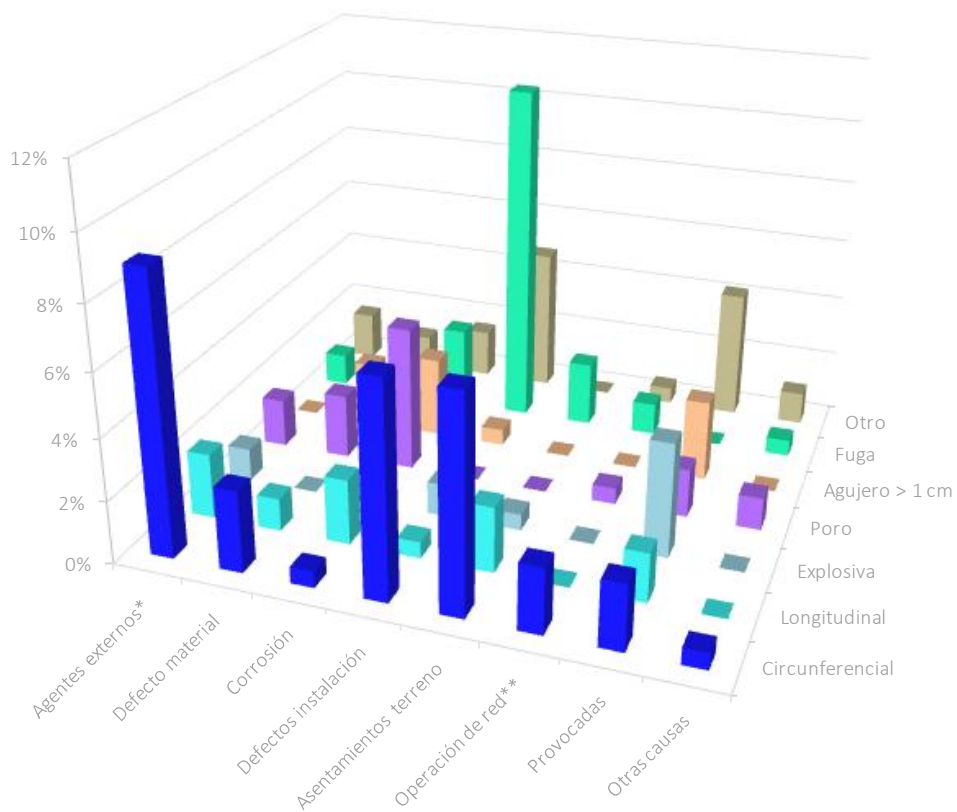
\*\* Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga



### Fundición dúctil

El 10% de las roturas de tubería general de la muestra se han producido en este material. Es el más presente en la red instalada y el de menor edad. La causa mayoritaria de fallo identificada ha sido por las condiciones de instalación, que incluye asentamientos del terreno y defectos de instalación, y suma un 36%, con modo de **fallo circunferencial** y de **tipo fuga** (Figura 13). Este material presenta un buen comportamiento en general, pero parece mostrar un punto débil en las juntas representando la mitad de sus roturas.

**FIGURA 13. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN DÚCTIL**



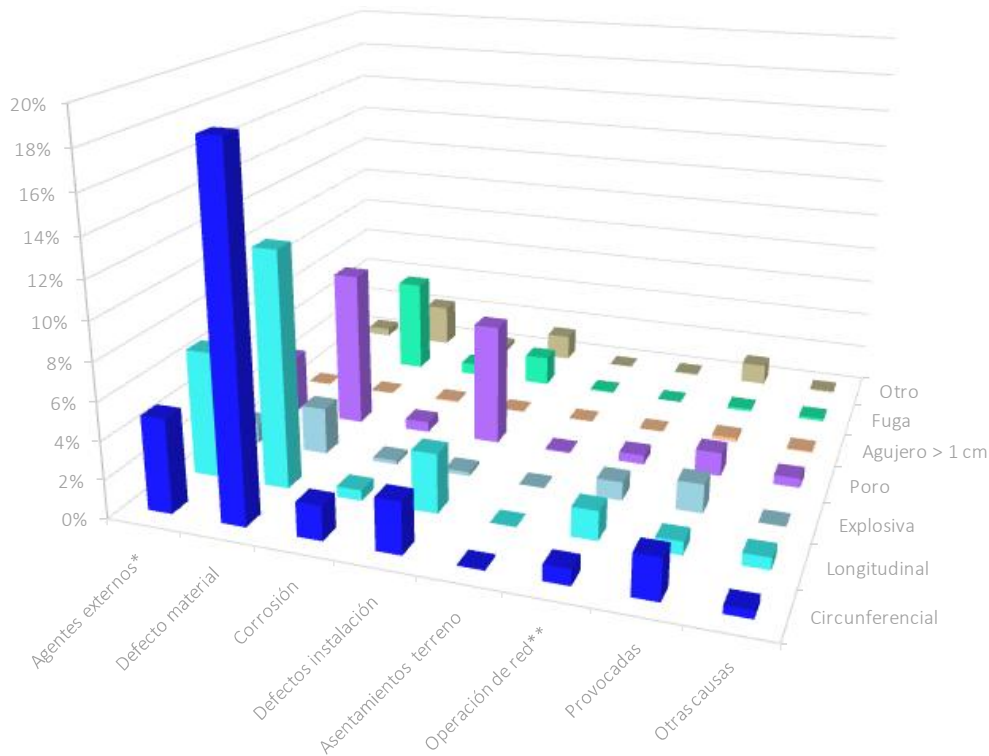
\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\*Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

### Polietileno Fuera de Norma

El polietileno fuera de norma representa el 56% del total de las roturas en acometidas de la muestra y su fallo está principalmente relacionado con las características de material, incluyendo las causas de corrosión, defecto y deterioro del mismo (Figura 14). Los ensayos de laboratorio sobre los tubos de este material, en concreto el ensayo de inducción a la oxidación, han confirmado estos datos resultando el polietileno negro como el más vulnerable a la degradación oxidativa. Los agentes externos (18%) y las condiciones de la instalación (16%), que incluye asentamientos del terreno y defectos de instalación, son las siguientes causas de fallo que provocan fracturas por la concentración de tensiones en un punto (presencia de clastos, escombros...). Se observó que una gran parte de las roturas se producen por defectos en las uniones, relacionadas éstas con defectos de instalación y de los manguitos mecánicos.

**FIGURA 14. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA**



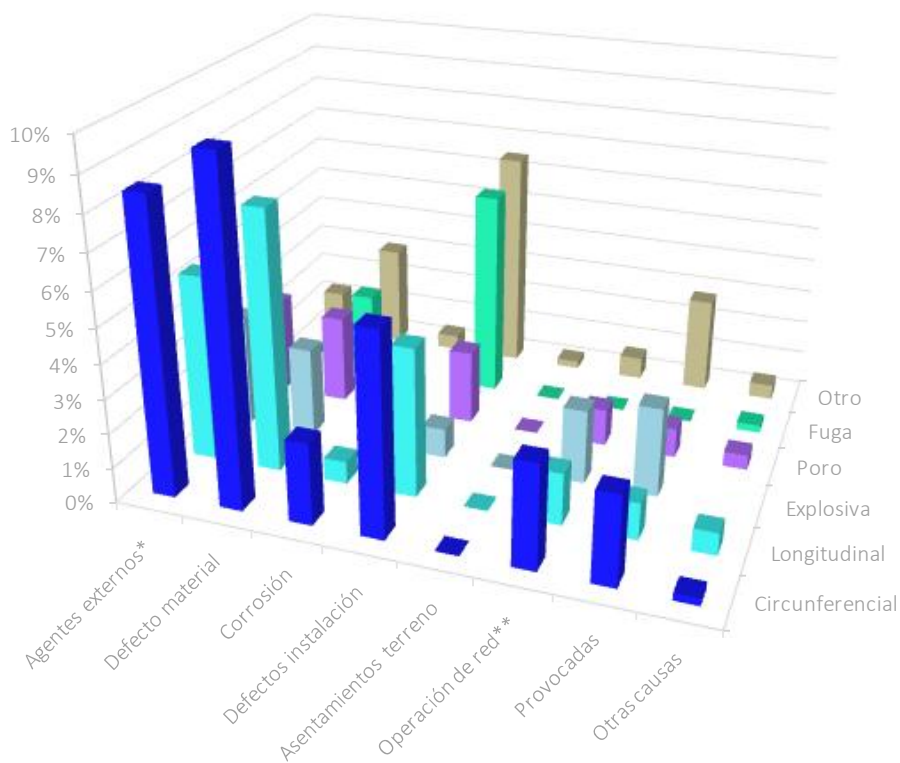
\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\* Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

### Polietileno Dentro de Norma

De la muestra de acometidas, el 18% de las roturas se han concentrado en este material. La causa mayoritaria de fallo es el defecto de material (32%) con predominio de los modos de fallo **circunferencial** y **longitudinal**, seguida muy de cerca por las **condiciones de la instalación** (26%), que incluye asentamientos del terreno y defecto de instalación, con modo de fallo tipo fuga y **circunferencial** (Figura 15). Además se ha observado un porcentaje alto de roturas en uniones por defectos de instalación.

**FIGURA 15. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA**



\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

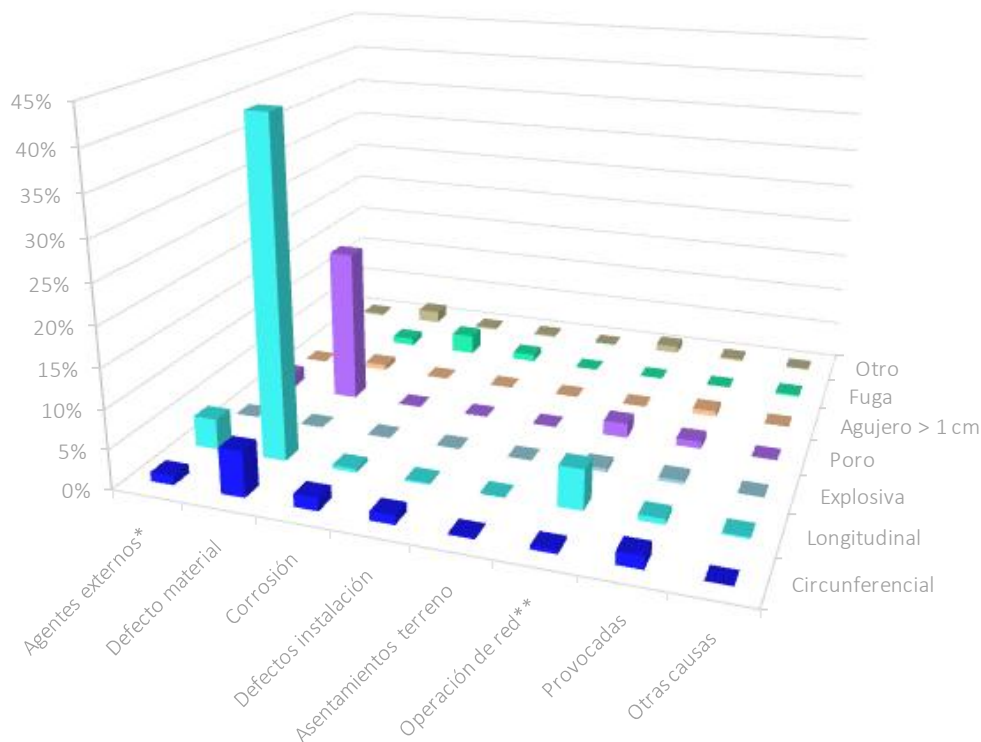
\*\*Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

No se apreció ninguna rotura con Modo de Fallo = agujero > 1 cm en el material Polietileno Dentro de Norma

## Plomo

El plomo ha representado un 17% del total de roturas en acometidas de la muestra, y la causa de fallo más destacada se relaciona con las características del material (76%), que incluye corrosión y defecto de material, fundamentalmente por la propia edad de las tuberías con **rotura longitudinal** y con **rotura tipo poro** (Figura 16). Además, se ha observado un elevado número de roturas cercanas en los días previos al fallo que da indicios de su vulnerabilidad.

**FIGURA 16. RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE PLOMO**



\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\* Operación de red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

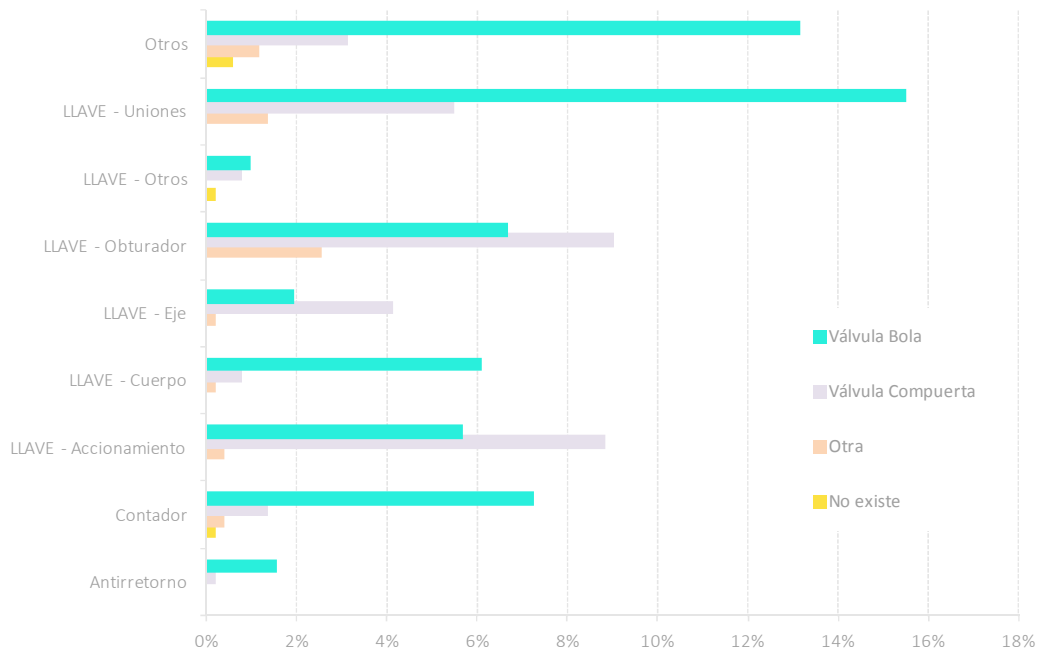
## 7. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA

La casuística de fallo de los conjuntos de medida visitados se relaciona principalmente con los fenómenos de corrosión y desgaste (73%), con rotura de las llaves en un 90% de los casos. Estas roturas se han debido principalmente a fallos en el accionamiento, el obturador y el eje de las llaves. También se han detectado en menor medida defectos de instalación (16%), de los cuales un 40% se han producido en las uniones de las llaves, con predominio de fallos por ajuste inadecuado de las partes roscadas. Además se ha observado mayor frecuencia de fallo en las válvulas de bola que en las de compuerta, a pesar de ser éstas las más antiguas (Figura 17 a y b).

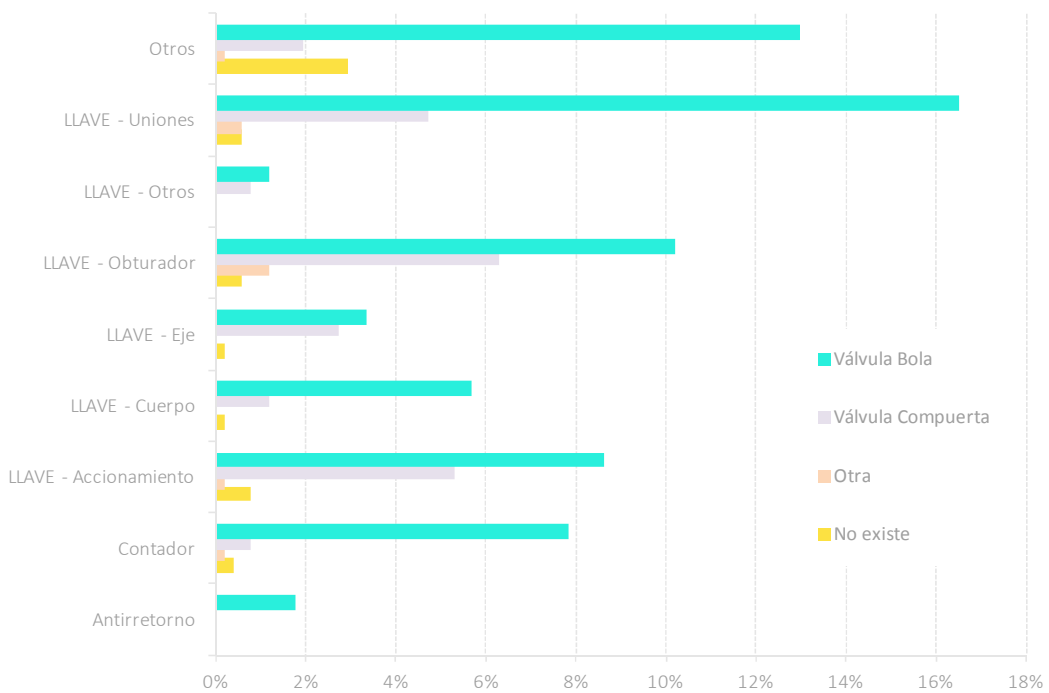
Estudiando la tipología de la instalación, el elemento que ha presentado mayores porcentajes de roturas en los armarios han sido las uniones de las llaves, en las arquetas predominan los fallos por el accionamiento de las llaves y en el cuarto de contadores, por los obturadores de las llaves.

De la inspección visual, se ha estimado que el 74% de los conjuntos de medida no cumplían la Especificación Técnica de Acometidas de Agua para Consumo Humano (2011) y el estado de conservación, que podía verse influido por criterios subjetivos, se ha considerado defectuoso en el 50% de los casos debido a la corrosión, suciedad, ausencia de elementos, etc.

**FIGURA 17. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA, SEGÚN ELEMENTO DE FALLO**



*a. Elemento de fallo a la entrada*



*b. Elemento de fallo a la salida*

## 8. CONCLUSIONES

El estudio ha proporcionado una caracterización de las roturas que se están produciendo en la red de abastecimiento a través de la tipificación de las causas, la localización y el modo de fallo. Además, se confirma la incidencia de ciertas variables explicativas del fallo, como la edad y el diámetro, y se demuestra el razonablemente buen comportamiento de los materiales contemplados en la normativa actual.

Del estudio individualizado de cada material de tubería general y acometida se identifican las principales causas de fallo para cada uno de ellos y su relación con la localización y los modos de fallo. De esta forma, se ha podido afirmar que los patrones observados en la muestra coinciden con los fundamentados en la literatura, siendo útiles para orientar la campaña de mantenimiento y renovación de cada material así como para estudios posteriores que traten de analizar el fenómeno de las roturas o para el desarrollo de modelo de vida útil fiable.

De acuerdo con los resultados presentados se da por concluido el estudio de los conjuntos de medida así como de aquellos materiales de las tuberías que estando presentes en la red actual de Canal de Isabel II se encuentran fuera de la normativa vigente de la empresa.

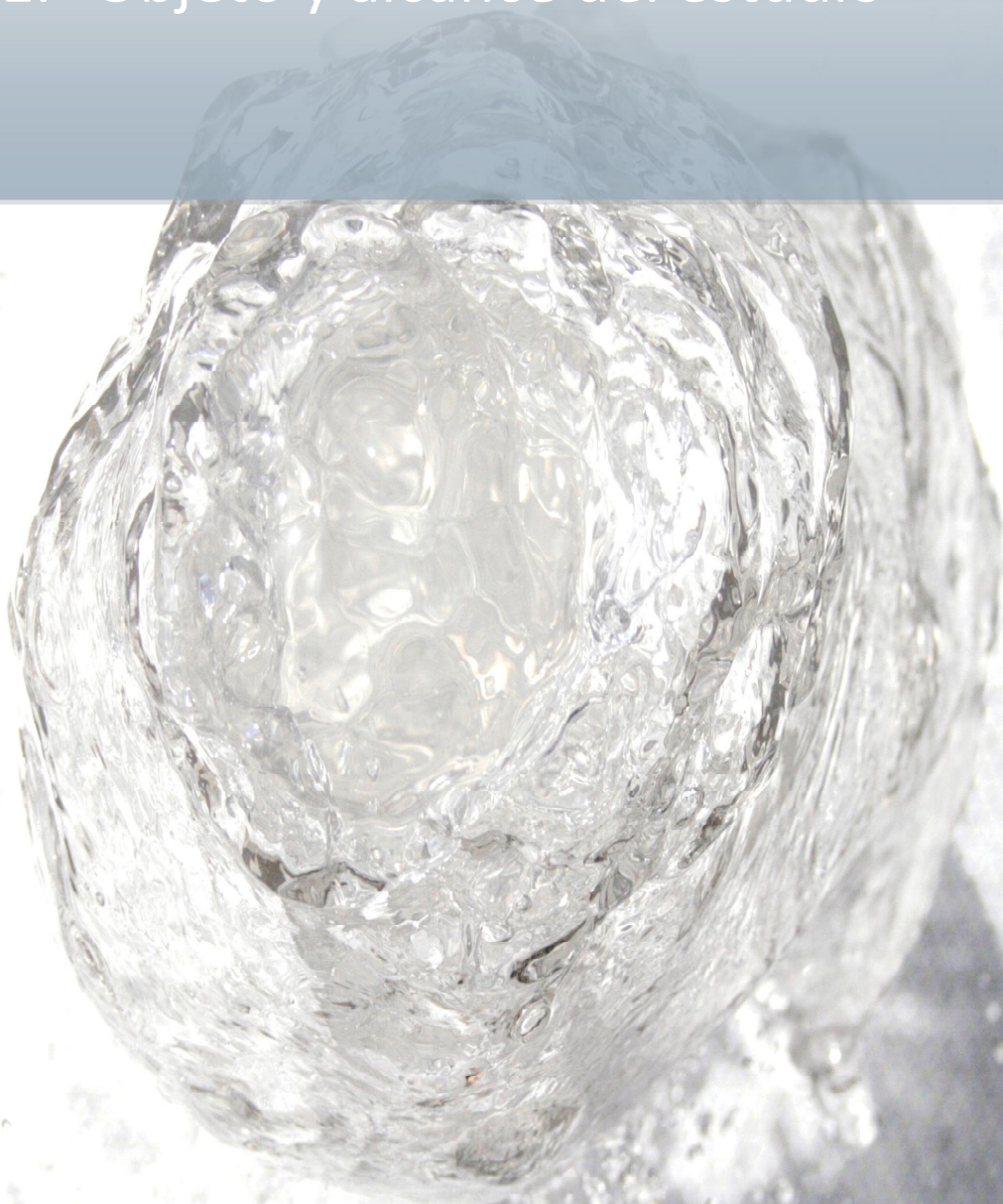
No obstante, en la misma línea de investigación de este trabajo, se estima necesario continuar avanzando en el conocimiento sobre roturas en infraestructuras de abastecimiento de agua potable.

De hecho, se ha orientado el siguiente trabajo al análisis de la relación fallo-edad de los materiales contemplados en la normativa actual de Canal de Isabel II para confirmar su mayor durabilidad, y al estudio en profundidad de la casuística y los patrones de fallo de las juntas, piezas especiales y accesorios que por su amplia diversidad, y complejidad, quedaron fuera del presente proyecto.

Además, la recopilación y análisis de los datos obtenidos ha servido de base para otros proyectos de I+D+i encaminados a predecir el fallo de las tuberías. Actualmente están en fase de desarrollo dos proyectos, uno de ellos centrado en un modelo de vida útil de las infraestructuras de abastecimiento, que se desarrolla a partir de variables que pueden condicionar su deterioro; y otro, basado en el estudio de transitorios hidráulicos en la red de agua para consumo humano, que analiza su relación con la frecuencia de fallos y busca cuantificar la influencia de estos fenómenos en el deterioro del sistema.



# 1. Objeto y alcance del estudio



En el año 2010 Canal de Isabel II comenzó una nueva vía de estudio cuya finalidad era mejorar la valoración del estado de conservación y envejecimiento de los elementos que integran una red de distribución, y dotar a la empresa de herramientas útiles para el establecimiento de políticas de renovación y ampliación de redes que mejoren la gestión estratégica de sus infraestructuras.

El objeto de este proyecto fue mejorar el conocimiento de la red de distribución de agua urbana de la Comunidad de Madrid y la caracterización de la casuística y modos de fallo mediante el análisis detallado de las roturas que se producen en la misma, estudiando los procesos, circunstancias y variables que influyen en los fallos estructurales de las tuberías. Con ello se perseguía, tanto obtener una base de datos fiable que permitiese desarrollar un modelo predictivo del deterioro de las tuberías de la red de abastecimiento, como que señalase criterios preventivos y de buenas prácticas durante las fases de proyecto y puesta en obra de las tuberías, ya fueran reparaciones, renovaciones o nuevas instalaciones; con todo ello se podría contribuir a reducir el número de roturas, permitiendo alargar la vida útil de las infraestructuras y, por tanto, mejorar el servicio prestado.

En el alcance de este estudio se englobaron las propias tuberías de la red, las acometidas y los conjuntos de medida. La red estudiada se compone actualmente de más de 17.000 kilómetros de tuberías de diferentes diámetros y materiales; con un número superior a 600.000 acometidas, cuya función era y es conducir el agua de manera independiente a cada edificio o vivienda para su consumo.

En total se analizaron 4.991 episodios de fallo en dos etapas, durante el período comprendido entre abril de 2010 y enero de 2013.



## 2. Antecedentes y experiencias previas



El deterioro de un sistema de abastecimiento de agua tiene como síntomas la aparición de roturas frecuentes (Pelletier et. al, 2003). Son muchos los estudios que tratan de determinar las causas de las roturas de los distintos elementos que constituyen el sistema, así como sus modos de fallo. Se cuenta principalmente con las siguientes vías para evaluar la condición en la que se encuentran los elementos del sistema:

1. la toma de muestras y su posterior análisis,
2. la monitorización de diferentes variables (en tuberías), y
3. la predicción basada en el histórico de fallos (Wengström, 1993).

Johnston (2012) incluye las inspecciones visuales y los métodos no destructivos y explica que la evaluación de la condición es el proceso o conjunto de procesos que dan lugar a un registro de estados de los aspectos críticos de un objeto en un tiempo en concreto. Específicamente, Liu & Kleiner (2013) dividen los métodos de evaluación de la condición de un elemento en métodos directos e indirectos y dentro de los métodos directos, además de contarse con las inspecciones visuales y los métodos no destructivos, se incorporan las técnicas de muestreo.

Wengström (1993) indica que es conveniente que un análisis de fiabilidad de tuberías cuente con registros de roturas, muestras de tubería y modelos hidráulicos. Para completar una evaluación preliminar de un problema estructural, se requiere una investigación detallada que incluye la toma y el análisis de muestras (Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003). En todo caso, la técnica de toma de muestras y su análisis posterior se justifica para confirmar los resultados obtenidos en otro tipo de análisis y, también, se debe incluir en una etapa inicial de un proceso que pretende establecer relaciones entre diferentes variables y las roturas o determinar los modos de fallo de las tuberías (Johnston, 2012).

El método de toma y análisis de muestras, por lo general, constituye un método costoso pero bastante preciso (Wengström, 1993). La principal diferencia con el estudio del histórico de roturas es que se pueden registrar muchas más variables, tantas como las que a partir de una muestra se pueden determinar. En Rajani & Kleiner (2001) se reconoce la necesidad de recurrir a los métodos de muestreo para conseguir la gran cantidad de datos que se necesitan en algunos modelos físicamente basados en el deterioro estructural de tuberías. Hay que prestar atención al número de componentes que constituyen la muestra con el fin de que el análisis sea estadísticamente significativo. Dado el elevado coste que supone la toma de muestras, en caso de que no se pudieran analizar todas las roturas durante un periodo de tiempo determinado, es necesario estudiar detenidamente la localización y el instante en que se van a llevar a cabo (Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003). Además, del estudio de la agrupación temporal y espacial de roturas en redes de distribución de agua, Goulter y Kanzemi (1988) afirmaron que alrededor del 60% de las mismas se habían producido en un intervalo temporal inferior a tres meses, a partir de una rotura anterior. Esto podría explicarse por el hecho de que las tuberías que se encuentran en la misma localización geográfica, a menudo comparten edad y material, y el procedimiento de instalación y unión se suele realizar de la misma forma.

Por lo general, la corrosión no se suele registrar en las bases de datos. Se pueden encontrar varios estudios de toma de muestras relacionados con la corrosión y sus causas de fallo. Por ejemplo, en O'Day (1989) se explica que se llevaron a cabo una serie de análisis en las muestras de tuberías rotas de las ciudades de Boston y Philadelphia para conocer las causas de la corrosión externa que ocasionaron el deterioro de las tuberías. Lackington & Large (1980) investigaron muestras de roturas por corrosión y descubrieron que las roturas por corrosión interna eran más frecuentes (en dos terceras partes) que las debidas a la corrosión externa.

Otros autores también presentaron los resultados de análisis realizados en muestras de tuberías de redes de distribución de agua con el fin de conocer las causas específicas de roturas y los modos de fallo. Según Seica et al. (2002), en la ciudad de Toronto, entre los años 1998 y 2000, se tomaron 111 muestras de tubería, de las que 73 se correspondían con roturas de tubería. La mayoría de ellas eran de fundición gris, aunque también se podían encontrar de fundición dúctil y acero, y el propósito del estudio era entender el fenómeno de las roturas de tubería e identificar el mecanismo de fallo más probable. Se registraron datos para evaluar la geometría de las tuberías (defectos de material por fabricación, espesor, diámetro, cantidad de material perdido por corrosión y tamaño y distribución de marcas por corrosión) y se realizaron ensayos (ensayo de tracción, ensayo para estudiar las cargas externas y ensayos en el suelo circundante, como los destinados a identificar el tipo de suelo, su resistividad, su pH y el contenido en sulfuro). Los resultados mostraron que la corrosión y los defectos de fabricación podían influir en la resistencia de las tuberías y que los modos de fallo eran principalmente circunferenciales, longitudinales o agujeros. Seica & Packer (2004) analizaron un conjunto de muestras de tubería y de suelos en la ciudad de Toronto para conocer las propiedades mecánicas de los materiales y, para ello, realizaron los ensayos de tracción, compresión, ensayos de carga y de flexión. Los resultados contribuyeron a conocer el proceso de fallo de las tuberías. En Díaz-Parralejo et al. (2009) se analizaron muestras de roturas de tuberías de PVC para determinar sus causas de fallo. Los análisis que se llevaron a cabo consistieron en la determinación de los diámetros y espesores de los tubos, en la inspección visual y la micrográfica de los tubos siniestrados, en el estudio del comportamiento mecánico y resistente de los materiales, a través de ensayos de tracción, compresión y de dureza con microdurómetro, en pruebas de presión interna en todos los tubos y en el análisis del comportamiento frente al fuego con mechero Bunsen y frente a diferentes disolventes orgánicos. Además, realizaron análisis de absorbancia con espectrofotómetro UV-Visible y de permitividad dieléctrica con un equipo de espectroscopía de impedancia. Las causas más probables de fallo estaban interrelacionadas con los procesos de conformación y con la presencia de poros en las paredes de los tubos. Los modos de fallo que se encontraron fueron perforaciones y fisuras longitudinales.

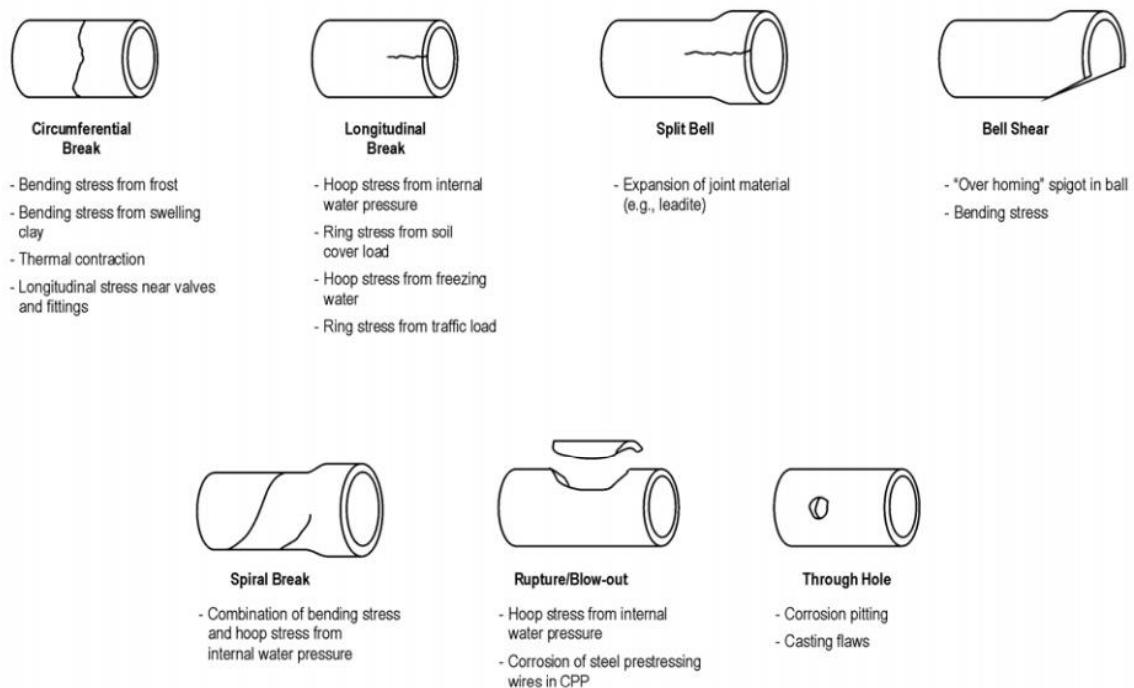
Hay que tener en cuenta que existen diferentes clasificaciones de las causas de roturas, entre las que se pueden considerar:

- los agentes externos, como pueden ser el clima extremo, la presencia de raíces, las sobrecargas externas o las roturas provocadas;
- las características intrínsecas de la tubería, como la edad, el material, los procesos de corrosión y los defectos del material;
- las operaciones de la red, como las variaciones de presión y los esfuerzos continuados; y por último,
- los factores de instalación que consideran las condiciones propias de la instalación (Davies et al., 2001).

Un análisis exhaustivo de las causas de roturas lleva a la recopilación de una larga serie de variables. A través de la toma y análisis de muestras se trata de relacionar las roturas con las diferentes causas.

Además, la toma de muestras ayuda a la identificación de los modos de fallo. Estudios anteriores han explicado que existe una relación entre las causas de las roturas y los modos de fallo (Rajani & Kleiner, 2001; Yamijala, 2007; Makar et al., 2000; Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003). Entre los modos de fallo, se pueden distinguir: roturas circunferenciales, roturas longitudinales, roturas en campana, agujeros, roturas en espiral, explosiva y campana cortada (Figura 18).

**FIGURA 18. MODOS DE FALLO EN TUBERÍAS (FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2003)**

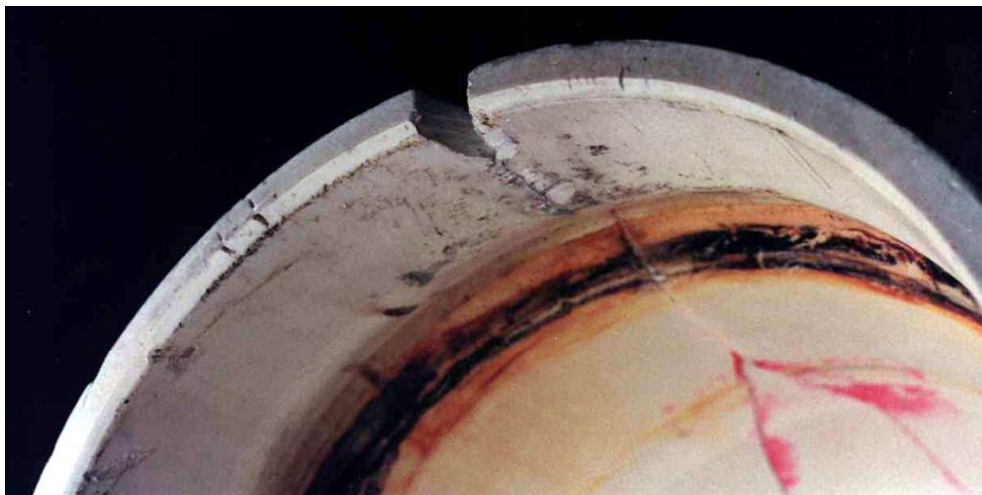


Las roturas circunferenciales son debidas a tensiones longitudinales, como las producidas por contracciones térmicas (bajas temperaturas), por movimientos diferenciales del suelo, por instalaciones defectuosas (zanja y cama de apoyo) y por otras interferencias (roturas accidentales). La presión interna del agua, junto con este tipo de tensiones, puede incrementar el riesgo de rotura de tipo circunferencial. Las roturas longitudinales están provocadas por tensiones transversales, las cuales pueden ser debidas a la presión en el interior de la tubería, a cargas del terreno, a sobrecargas externas, como el tráfico, y a las heladas. Finalmente, las roturas de campana se deben a tensiones transversales en las juntas y en los agujeros y a la corrosión (Rajani & Kleiner, 2001). Otros autores añaden las roturas en espiral, debidas a la combinación de esfuerzos, como la presión del agua, las roturas explosivas, debidas a la presión interna y a la corrosión, y roturas en campana cortada (*bell shear*), debido a los esfuerzos en la cama de apoyo (Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003).

Se pueden encontrar varios estudios que tratan de relacionar las causas y los modos de fallo con el material. La fundición dúctil y el PVC son materiales cada vez más presentes en la renovación de redes de distribución como sustitutos de las conducciones de fundición gris y fibrocemento (Cromwell et al., 2007). El mecanismo que desemboca en el fallo de la conducción es distinto según el tipo de material de la tubería. Aunque algunos materiales, como la fundición gris y el fibrocemento, se encuentran ya en desuso, su estudio se justifica dado que representan una parte importante de las tuberías instaladas en la actualidad.

El deterioro de las tuberías plásticas se puede generar por biodegradación (aunque generalmente, de forma lenta) (Parra, J.C.; 2013). El tipo de rotura cambia de dúctil a frágil por efecto de las bajas temperaturas (Pardo, 2010). En el fallo frágil (*brittle failure*) (Figura 19), el material se endurece por procesos mecánicos y químicos, generando un área donde sus propiedades mecánicas se ven mermadas hasta que la tubería falla súbitamente. En el fallo dúctil (*ductile failure*) o plástico, se genera una superficie de fallo tridimensional, debida al estiramiento plástico que sufre la conducción, en una acción prolongada, hasta generar la fisura (Parra, J.C., 2013).

**FIGURA 19. FALLO FRÁGIL EN UNA TUBERÍA PLÁSTICA**



[http://www.bushman.cc/photos/Plastic\\_Water\\_Pipe\\_Brittle\\_Fracture.jpg](http://www.bushman.cc/photos/Plastic_Water_Pipe_Brittle_Fracture.jpg)

Las roturas ocasionadas en tuberías de PVC suelen tener forma de fisura o raja longitudinal y aparecen, por lo general, en tuberías de mayor edad. Rajani (2009) estudió la evolución de roturas con la edad en tuberías de PVC (50-500 mm de diámetro). Este material es sensible a la exposición de productos químicos, a las juntas de plástico-metal y a los elevados coeficientes de expansión térmica, pero su principal problema es el conocimiento incompleto del mecanismo de degradación y de su comportamiento a largo plazo (Pardo, 2010).

El análisis estadístico de los tubos de PVC y polietileno es el centro de trabajos recientes, véanse por ejemplo los estudios realizados por Rozental (2009) y Jana Laboratories (2012).



Las tuberías de fibrocemento tienen mala resistencia a los ataques químicos en entornos con pH ácidos, que contengan sulfatos (en concentración superior al 0,3%) o que tengan una alta alcalinidad. Sus principales problemas de deterioro se dan con aguas blandas (dureza inferior a tres grados hidrométricos franceses). La degradación química generada se manifiesta por un ablandamiento de la superficie de la tubería (Pardo, 2010) y una reducción de la tensión resistente del material. Las causas fundamentales de roturas estudiadas en este material (Hu & Hubble, 2007) fueron el clima y el tipo de suelo. La causa principal de roturas circunferenciales fue el movimiento del suelo adyacente. Otros factores que influyeron en la tasa de fallos, aunque en menor medida, fueron la edad, el diámetro y los métodos de reparación.

Las tuberías de hormigón reforzado se ven afectadas por valores bajos del pH del suelo, que disminuyen el pH del mortero de cemento, deteriorándolo, generando corrosión y rotura en los anillos de refuerzo metálicos. El deterioro de la tubería comienza con grietas puntuales que favorecen la propagación del proceso de laminación del mortero, generando exposición del refuerzo metálico y su posterior fallo. A mayor edad, más anillos metálicos rompen, hasta llegar al colapso de la estructura (Parra, J.C.; 2013). Su principal problema es que su fallo es repentino. Por otra parte, este material es el que mejor se comporta frente a rotura, si bien su punto débil son las juntas (Pardo, 2010).

Las tuberías metálicas, como la fundición gris, el acero o la fundición dúctil, se ven principalmente afectadas por la corrosión debida a condiciones agresivas del suelo (contenido en humedad, contenido biológico, etc.). Los tipos más habituales de rotura en la fundición gris son la rotura circunferencial, en campana (ocasionadas por dilataciones térmicas diferentes en tubería y junta), y longitudinales (Construction Innovation, 1999). Sus sistemas de protección son básicamente un recubrimiento exterior. Un recubrimiento de la tubería deficiente aumenta la propensión al fallo, ejemplos de fallos atribuibles al galvanizado en fundición gris se han descrito en otros trabajos como Almandoz (2002). Rajani y Kleiner (2002) estudiaron los tipos de revestimientos orgánicos e inorgánicos para tuberías de fundición dúctil. Tullis et al. (2006) asociaron el diámetro actual en tuberías de fundición gris y el diámetro en el momento de la instalación con la rugosidad hidráulica estableciendo una tendencia hacia el aumento de la misma con la reducción progresiva del diámetro en el tiempo. Defectos de fabricación afectan también a la tasa de fallos pues favorecen la formación de zonas débiles en la tubería.

Aunque no es posible generalizar un patrón de roturas para cada tipo de tubería, sí se puede particularizar un patrón de roturas, por material, para cada red específica (Pardo, 2010). Hirner (1997) mostró el orden de magnitud de roturas por kilómetro y año en varias redes de distribución alemanas. MacKellar y Pearson (2003) estudiaron el ratio de roturas (roturas/100 millas/año) de distintos materiales, en 17 abastecimientos en el Reino Unido. NRC (1993) determinó los ratios de roturas medios, según material instalado a partir de los datos de fallo, durante 1992 y 1993, de varias ciudades canadienses, aunque este último estudio no consideró otros factores de influencia. Otros estudios, en cambio, agrupan los ratios de roturas según el diámetro de la tubería, como el de Luong y Fujiwara (2002).

De esta forma, a través de la toma de muestras se pueden identificar una larga serie de variables descriptivas de la condición de los elementos de los sistemas de distribución, para posteriormente, determinar las causas y los modos de fallo de dichos elementos.

### 3. Planteamiento metodológico



### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología del estudio realizado se basa en el análisis de una muestra de roturas, desde el conocimiento adquirido durante todo el proceso de su reparación, con la consiguiente evidencia directa de las condiciones de la instalación y con información detallada sobre cuánto pueden potencialmente afectar a la rotura.

Las visitas realizadas a las roturas han permitido obtener una muestra extensa con registros de suficiente fiabilidad, puesto que cada elemento fue descrito y recogido *in situ* y *ex profeso*. Las particularidades físicas entre las tuberías que conforman la red de distribución y las acometidas que unen la red de distribución con el usuario final, en cuanto a materiales, diámetros y número de conexiones por longitud de tubo, así como las diferencias en lo relativo a las condiciones de instalación y de operación, hacen necesario estudiar las roturas de cada conjunto (red de distribución y acometidas) por separado. El estudio desarrollado se llevó a cabo en dos fases, comprendidas ambas entre abril de 2010 y enero de 2013, sobre una muestra total de 4.991 roturas visitadas. De ellas, 1.937 se correspondieron con tubería general, 2.545 con acometidas y 509 con conjuntos de medida (Figura 20).

La metodología seguida en ambas fases ha sido similar. Tras la notificación de cada rotura, la brigada se personaba en el lugar procediendo a la recopilación de datos relativos al estado del material y las condiciones del terreno. Junto con la toma de datos se realizaba un reportaje fotográfico y, siempre que se estimaba necesario, se tomaron muestras de suelo y de tubería para su posterior análisis en laboratorio. El estudio abarcó aspectos como la caracterización del elemento de rotura, el análisis del terreno natural, las características del estado de la tubería o el tipo de material, entre otros.

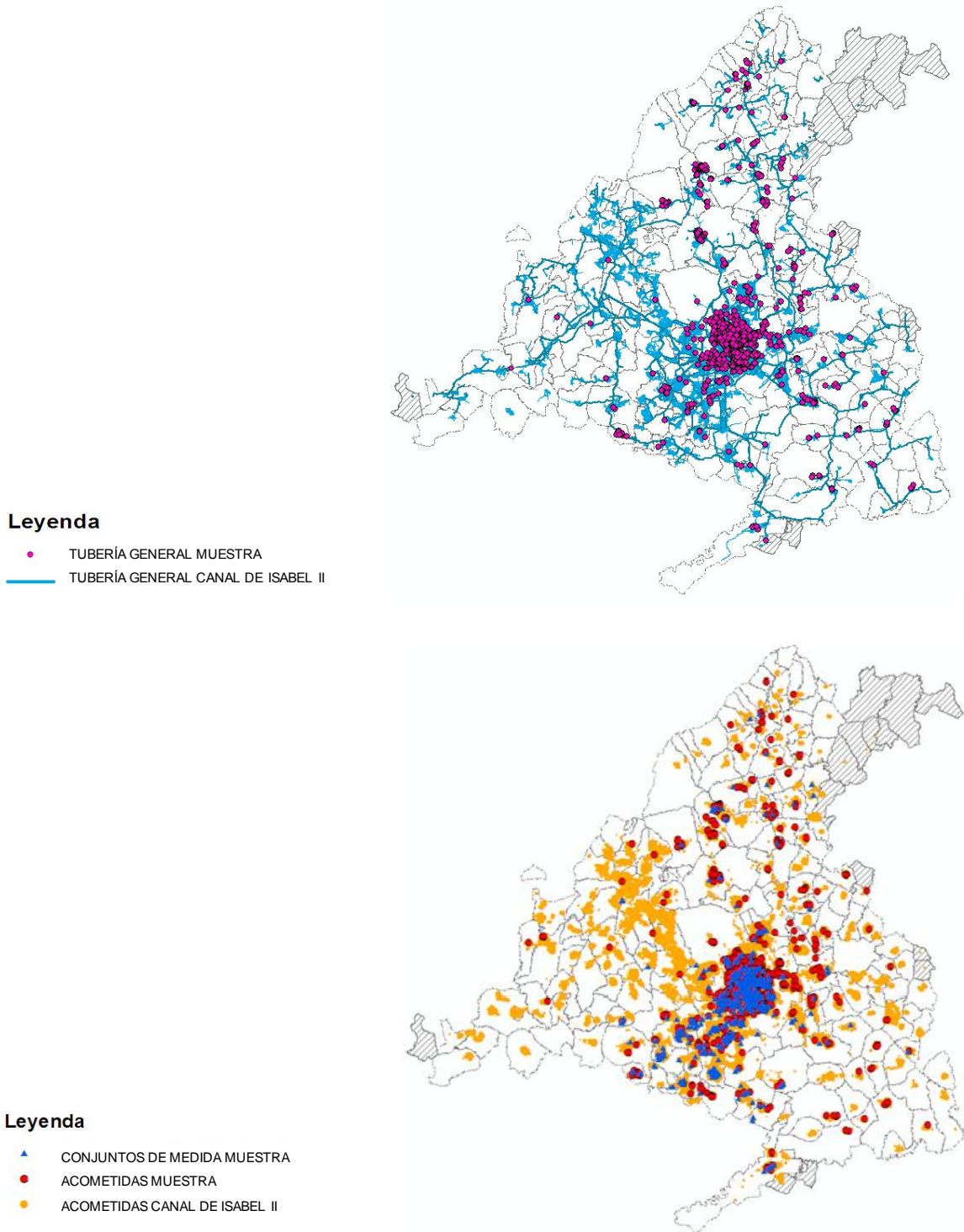
Sin embargo, la campaña de ensayos efectuada ha variado entre ambas etapas. Durante la segunda fase del estudio se revisaron los ensayos efectuados en la primera etapa en función de los resultados obtenidos, por lo que no todas las muestras fueron sometidas al mismo número y tipo de ensayos. El reconocimiento del material de relleno en segunda fase implicó, además, la toma de valores de resistencia *in situ* para caracterizar en mayor profundidad las condiciones de la instalación. Los ensayos realizados se describen en el epígrafe 4.2. Ensayos.

La información recogida en campo de cada una de las roturas de la muestra se ha recopilado en una base de datos incluyendo nuevas variables referentes a la operación de la red, historial de averías u obtención de valores ambientales propios de cada localización. Los resultados de los ensayos para caracterizar los materiales de relleno y de las tuberías también han sido integrados en esta base de datos.

Por último, tras la recopilación de toda la información se ha realizado un análisis estadístico de todas las variables estudiadas, determinando su influencia sobre la frecuencia de las roturas, y sus relaciones con las causas, localización y modos de fallo.



**FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN DE LOS REGISTROS DE LA MUESTRA DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA**



*Distribución de los registros de la muestra de roturas en tubería general, acometidas y conjuntos de medida. Sobre la red de **abastecimiento** (imagen superior), y sobre los **puntos de acometida** (imagen inferior).*

### 3.2. VARIABLES ANALIZADAS

En la etapa inicial del proyecto se llegaron a identificar, en función de las referencias bibliográficas consultadas, más de cuarenta variables de posible interés que fueron incorporadas al estudio, distinguiéndose las de mayor relevancia en el análisis muestral posterior.

Parte de la información de las variables se obtuvo mediante observación directa en campo mientras que otra fue cumplimentada *a posteriori* en gabinete, tras el análisis de toda la información recogida y a partir de las bases de datos disponibles de la empresa. Han sido de especial utilidad la información de todos los datos de la red en el SIG (Sistema de Información Geográfico) o el registro de roturas comprendidas entre el 1 de enero de 2003 y el 18 de abril de 2011.

Se resumen a continuación las variables que se han procurado estudiar de manera generalizada para todos los registros de rotura en tubería, acometida y conjunto de medida. Se incluyen todas aquellas que se han considerado capaces de influenciar el deterioro de los elementos afectando de uno u otro modo a la normal operatividad de las redes de distribución de agua para consumo humano.

💧 **VARIABLES RELACIONADAS CON LA UBICACIÓN Y LAS CONDICIONES AMBIENTALES, A LAS QUE ESTÁ SOMETIDO EL ELEMENTO:** calle, municipio, fecha, hora, coordenadas, temperaturas y precipitación asociadas a la localización de la rotura, etc.

💧 **VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL ESTADO DE LA TUBERÍA:** Son variables relacionadas con el estado de la tubería y/o conjunto de medida, que no deben confundirse con la causa de fallo, sino que son muestra de las principales patologías que se observaron en las roturas visitadas, como pueden ser: ovalación, corrosión interna y externa, aplastamiento, incrustaciones, etc.

💧 **VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL ESTADO Y CONDICIONES DE LA INSTALACIÓN:** En su mayor parte, las tuberías se instalan en zanja y corresponden por tanto al grueso de la muestra. Por este motivo las variables descriptivas consideradas en relación a la instalación fueron: tipo de instalación y su estado, uniformidad y tipo de material de relleno y de la cama, altura del recubrimiento, presencia de árboles, presencia de huecos de lavado, existencia de canalizaciones cercanas, presencia de materia orgánica, tipo de tráfico, yesos, escombros, rellenos antrópicos, etc.

En el caso de conjuntos de medida se evaluó la ubicación del mismo (exterior, enterrado en acera, situado en el interior en portal, etc.) así como el montaje (en escuadra, recto o mixto) y alojamiento que lo contenía (armario, arqueta o cuarto de contadores).

💧 **VARIABLES RELACIONADAS CON EL MANTENIMIENTO Y OPERATIVIDAD DE LA RED:** Estas variables recogen datos relativos a la presión, caudal, y coincidencia con maniobras en los días próximos a la rotura. En este sentido, se ha estimado un ratio relativo al agrupamiento espacial y temporal de la rotura, midiendo el índice de roturas en un radio inferior a 2 km producido en los 20 y 90 días anteriores. Asimismo, para las roturas pertenecientes a un sector, se ha incorporado el índice de roturas del sector en los 20 y 90 días anteriores, y las oscilaciones máximas y medias diarias en los siete y treinta días anteriores, junto con los valores de presión de entrada al sector.

💧 **VARIABLES RELATIVAS AL FALLO:** Para estas variables se hizo una primera estimación en campo, pero en general se han desarrollado en gabinete una vez estudiada toda la información necesaria para su verificación. Las variables relativas al fallo fueron: causa aparente de fallo, localización del fallo y modo del fallo.

En el caso de roturas en tuberías y acometidas, se han incluido variables relacionadas con las características propias del elemento, entre las que se incluyen el material, diámetro, espesor o presión nominal.

En el caso de los conjuntos de medida, se estudiaron variables específicas relativas a los principales componentes de un conjunto de medida: llave de entrada, contador y llave de salida.

En la parte relativa a las llaves se distinguió: la tipología (de bola, la más común, o de segmento), el tipo de accionamiento (de volante o de llave), y el material de cada uno de los componentes más significativos de la llave (accionamiento, cuerpo, obturador y eje).

Se especificó el tipo de contador (mecánico o electrónico), la tipología del medidor (de turbina o volumétrico) y el año de instalación. Además, se consideró si la instalación disponía de elemento antirretorno (ya sea interno en el propio mecanismo de la llave de salida, o bien como una válvula exenta) y de toma de comprobación.

En último lugar, se analizó el cumplimiento de la normativa vigente en los conjuntos de medida en los que se registraron roturas, según la Especificación Técnica de Acometidas de Agua para consumo Humano (versión 2011) de Canal de Isabel II, aunque el análisis realizado en este aspecto no se puede considerar de carácter estricto, pues solamente se centró sobre los principales aspectos de la norma.

## 4. Herramientas de trabajo



## 4.1. FICHAS DE CAMPO

Para las visitas realizadas sobre la muestra se diseñaron fichas específicas que se ajustasen a las características propias de cada una de las instalaciones. Por ello, se diferenció en el diseño de las fichas entre el conocimiento transmitido por el personal especializado y las distintas fuentes bibliográficas consultadas, en particular, la Norma para Redes de Abastecimiento (versión 2012) de Canal de Isabel II Gestión, así como la Especificación Técnica de Acometidas de Agua para Consumo Humano (versión 2011), la cual recoge las especificaciones actuales de alojamientos y conjuntos de medida.

Las fichas se rellenaron en campo, y posteriormente fueron completadas en gabinete, pues registran información adicional a los datos tomados en campo. En cada **Ficha de Campo** se estableció una primera causa aparente de fallo, a la que se achacó la rotura, que por ser este parámetro función del observador, se validó posteriormente en gabinete.

En los apartados siguientes se resumen los campos recogidos, en función del tipo de rotura visitada.

### 4.1.1. Para tuberías y acometidas

La información recogida en el modelo de **Ficha de Campo** de tuberías y acometidas se resume a continuación, aunque el grado de detalle se presenta, a modo ilustrativo, en las Figuras 21 a 28, donde se muestra a modo de ejemplo la **Ficha de Campo** de una rotura de tubería general.

- Localización geográfica y temporal de la rotura
- Características y parámetros identificativos de la tubería general o acometida
- Condiciones ambientales
- Estado de la tubería
- Mantenimiento y operatividad de la red
- Tipología y descripción del fallo
- Características de la zanja

Junto con las **Fichas de Campo** se realizaron reportajes fotográficos, croquis de la rotura y de las características de la zanja.

### 4.1.2. Para conjuntos de medida

Por la particularidad de las instalaciones de los conjuntos de medida se consideró necesario para la visita de sus roturas diseñar una **Ficha de Campo** específica que recogiese información relativa a:

- Características y elementos del conjunto de medida
- Condiciones ambientales
- Parámetros identificativos del conjunto de medida
- Mantenimiento y estado de conservación del mismo
- Tipología y descripción del fallo




FIGURA 21. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 1 DE 8)

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y TEMPORAL	
Código rotura (sin año){*}: 283619	
Estado: Terminada	
Tipo: General	
Año: 2010	
Fecha y hora de rotura: 14/12/2010 - 18:10:00	
Modo aviso: Gayta	
Fecha aviso a Wasser: 15/12/2010	
Fecha y hora aviso confirmado por brigada: 15/12/2010 - 10:00:00	
Persona Wasser visita: [REDACTED]	
Fecha y hora llegada rotura: 15/12/2010 - 11:10:00	
Gestión: Moratalaz	
Empresa reparación: Ciopsa	
Fecha prevista terminación reparación: 15/12/2010	
Código actuación reparación: N/D	
Temperaturas y precipitaciones	
Temperatura actual: 5	Temperatura máxima día rotura: 17
Temperatura mínima día rotura: 0	Temperatura media anual: 14,5
Variación media de temperatura: 12,2	Precipitación media anual: De 400 a 500
Gradiente térmico: 17	
Clima día rotura: Heladas	
Coordenada X: 453938,30	Coordenada Y: 4468445,60
Municipio: Rivas-Vaciamadrid	Código Municipio: 1230
Dirección (calle, nº): C./Ricardo Zamora, s/n	
DATOS DEL TUBO in situ	
Material de la tubería en campo: FD	
Diametro nominal tubería en campo (mm): 500	
Diametro interior tubería horizontal (mm): 500	
Diametro interior tubería vertical (mm): 500	
Diametro exterior tubería (mm): 535	
Espesor tubería (mm): 17,50	
Porcentaje de deformación $[(\varnothing_h - \varnothing_v) / \varnothing_v]$ : N/D	
Diametro efectivo con existencia incrustaciones (mm): 500	
Valoración de la rugosidad: Pulido	
Tipo de juntas: Enchufadas	
Longitud del tubo (m): 7	
Observaciones:	
Dato de presión: No	
Presión (m.c.a.): N/D	
Punto de toma de presión: N/D	
Personal que toma presión: N/D	
Fecha y hora toma presión: N/D	
Observaciones presión: Agua cortada, se abastece por otro lado sin puntos posibles de toma de presión	

FIGURA 22. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 2 DE 8)


Foto toma de datos presión:



14

**TIPO DE ROTURA**

**CROQUIS DE LA ROTURA**



Ubicación: Enterrada  
 Localización rotura: Sin pavimentar  
 Zona circundante: Urbanizada  
 Pendiente calle: Baja

Tráfico sobre la rotura: Nulo  
 Intensidad tráfico: Nula  
 Obras en la zona: No  
 Árboles <10m: Sí  
 Edificios <10m: No  
 Observaciones:

		Distancia X (m)	Distancia Y (m)
Distancias:	Acera <10m	1	4
	Edificación <10m	N/P	N/P
	Árbol <10m	5	2
	Válvula <10m	N/P	N/P
	Ventosa/Desag/Otro <10m	N/P	
	Junta	2,5	
	Acometida <10m	N/P	
	Reparación anterior cercana <30m	N/P	
	Otros <2m	N/P	N/P

Punto de agua fugada:

En la pared del tubo	Sí
En pared de accesorios, pieza especial o pto de continuidad hidráulica	No

FIGURA 23. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 3 DE 8)

Tipo de rotura: <b>Fisura</b>	
Fisura: <b>Longitudinal</b> Fisura en todo el tubo: <b>No</b> Existencia de fisuras adicionales: <b>No</b> Forma (no explosiva): <input checked="" type="checkbox"/> <b>Clargada</b> Largo (mm): <b>1000</b> Ancho medio (mm): <b>7</b>	
Provocada:           Obra: <b>No</b> Otras: <b>No</b>	
Explicación sobre la forma de la rotura:	<b>Fisura de 1 m de largo en forma de arco</b>
Método de reparación:	<b>Sustitución</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA ZANJA</b>	
CROQUIS	
Profundidad (m):	<b>3,10</b>
Recubrimiento:	Material: <b>Otro</b> Espesor (m): <b>0</b>
Material de la zanja:	Material: <b>Fino</b> Espesor (m): <b>3,10</b>
Cama:	Material: <b>N/D</b> Espesor (m): <b>N/D</b>
Características del terreno de la zona aledaña:	<b>Limo, Yeso</b>
Rango resistividad:	<b>50-10.000 ohm x metro</b>
Campos eléctricos:	<b>45-135 mV/m</b>
Rango campo eléctrico:	<b>Fortísimos</b>
	Distancia Y (m)           Distancia Z (m)
Distancia de la rotura a otros servicios <2m:	<input type="checkbox"/> Cantarillado: <b>N/P</b> <b>N/P</b>
	Telefonía: <b>N/P</b> <b>N/P</b>
	Gas: <b>N/P</b> <b>N/P</b>
	Electricidad: <b>N/P</b> <b>N/P</b>
	Otros: <b>N/P</b> <b>N/P</b>
Cuerpos extraños:	Rocas: <b>No</b>
	Raíces: <b>No</b>
	Farolas: <b>No</b>
	Otros: <b>N/D</b>
Corrientes de agua:	<b>No</b>
Terreno lavado:	<b>No</b>
Socavones:	<b>No</b>
Tomada muestra tubo:	<b>Sí</b>
Tomada muestra terreno:	<b>Sí</b>
Ensayos muestra tubo:	<b>Sí</b>
Ensayos muestra terreno:	<b>Sí</b>
Observaciones:	
<b>CAUSAS DE LA ROTURA</b>	
Primera opinión sobre la causa:	<b>Defecto material, Relleno agresivo químico</b>



FIGURA 24. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 4 DE 8)

Explicación:	Tubería 500 FD rajada. Terren <input type="checkbox"/> con yes <input type="checkbox"/> . Se coge muestra posiblemente material de agresión del terreno. Se observan reducciones del material en la superficie del tubo. Filtros de alta plasticidad (yes <input type="checkbox"/> ) muy agresivos, con alta expansividad.	
Causa final de la rotura (a rellenar en oficina):	Corrosión	
<b>ENSAYOS DE LABORATORIO</b>		
Tomada muestra inalterada:	Si	Valores Comentario
		Humedad en %: 0 N/D
		<u>Granulometría:</u>
		PH: N/D N/D
		Materia Orgánica %: N/D N/D
		Sales solubles %: N/D N/D
		Agresividad del agua: N/D N/D
		Resistividad: 20,00 Ohm*m. (ver informe). Trazas de arcilla poco resistivas, muy corrosivas.
		% pasa 63 mm: 100 N/D
		% pasa 20 mm: 100,00 N/D
		% pasa 5 mm: 99,7 N/D
		% pasa 2 mm: 98,70 N/D
		% pasa 0,4 mm: 91,3 N/D
		% pasa 0,08 mm: 88,6 N/D
		<u>Distribución granulometría:</u>
		Arenas finas + Finos: 98,70
		Arena-grava: 1,30
		Gruesas: 0,00
		<u>Límites de Atterberg:</u>
		Plasticidad: Plástico
		LL: 99,50 N/D
		LP: 66,00 N/D
		IP: 33,50 N/D
		Equivalente de arena: N/D N/D
		Expansividad de Lambe: Muy crítica N/D
		Humedad inicial en %: 5,9 N/D
		Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> ): 1,475 N/D
		Índice de hinchamiento: 0,3 N/D
		(Mpa):
		Cambio potencial de 7,5 volumen: N/D
		<u>Compresión simple:</u>
		Tensión en kg/cm <sup>2</sup> : N/D N/D
		Deformación en %: N/D N/D
		Sulfatos cuantitativos en 77750 mg/kg: N/D
Ensayo in-situ resistencia terreno de apoyo cubo cón:	No	Valores Comentario
		<u>Proctor:</u>
		Humedad óptima en %: N/D N/D
		Densidad máxima en g/cm <sup>3</sup> : N/D N/D
		<u>CBR:</u>
		CBR 95%: N/D N/D
		CBR 97%: N/D N/D
		Índice CBR 100%: N/D N/D
		Hinchamiento CBR en %: N/D N/D
Análisis de composición química tubería:		Valores Comentario
		Ensayo macrografía: N/D N/D
		Ensayo micrografía: N/D N/D
		Existencia de grafito: N/D
		Ensayo corrosión: Si
		Los productos de corrosión coinciden en su mayoría con óxido de hierro, distintas sales y en general algo de azufre y puntual cloruros.
		<u>Composición química acero:</u>

FIGURA 25. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 5 DE 8)

	C (% peso):	3,55	N/D
	P (% peso):	0,060	N/D
	Existencia de esteadita:	Normal	
	Mn (% peso):	0,39	N/D
	Si (% peso):	2,83	N/D
	S (% peso):	0,009	N/D
Ensayo resistencia mecánica material tub:	<b>Si</b>		
	Tuberías fundición - Dureza Brinell:	209	N/D
	Tuberías plásticas - Rigidez anular (kN/m2):	N/D	N/D
	<u>Tracción fundición:</u>		
	Diámetro (mm):	N/D	N/D
	Seccion (mm2):	N/D	N/D
	Carga de rotura (kN):	N/D	N/D
	Carga L.Elástico (0,2%) (Kn):	N/D	N/D
	Tensión de rotura (Mpa):	N/D	N/D
	Tensión L.Elástico (0,2%) (Mpa):	N/D	N/D
	Alargamiento %:	N/D	N/D
	Zona de rotura:	N/D	N/D
	<u>Plásticos:</u>		
	Esfuerzo punto de fluencia (N/mm2):	N/D	N/D
	Alargamiento en rotura (%):	N/D	N/D
	Tiempo de inducción oxidación (min):	N/D	N/D
	Valor densidad media (g/cm3):	N/D	N/D
	Esfuerzo de flexión en fecha convencional (1,5.e) N/mm2:	N/D	N/D
	Esfuerzo máximo de flexión N/mm2:	N/D	N/D
<b>DATOS DE RED DEL GIS CYII</b>			
	Sector:	Rivas_Norte	Código: BC2_1230_1
	Tipo de tubería:	Aducción	
	ObjectID:	399635	
	Número tubo:	2268251	
	Material:	FD	
	Diametrono:	500	
	Instalador:	Desconocido	
	Coherencia GIS-CAMPO:	Si	
	Timbraje tubería (Atm):	N/D	
	Fecha instalación:	01/01/1982	
	Longitud tramo tubería (m):	213,79	
	Diametros tuberías zonas aledañas (mm):	150/300	
	Presiones:	Presión estática (m.c.a.): N/D	Presión máxima de entrada a sector en las 24h anteriores a la hora de rotura (m.c.a.): N/D
		Oscilación absoluta de presión entrada al sector en 30 días:	Oscilación media diaria de presión entrada al sector en 30

FIGURA 26. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 6 DE 8)





		días:	
		N/D	N/D
Caudal (m3/h):		0,0364	
Número de roturas previas en tubería afectada:		N/D	
Número de roturas previas en el sector:		N/D	
		20 días	90 días
Roturas por sector:	Acometida (primer tramo):	1	6
	Acometida (segundo tramo):	2	8
	General:	2	4
Roturas por 2 Km:	Acometida (primer tramo):	1	5
	Acometida (segundo tramo):	2	8
	General:	2	3
Operación de cierre de válvulas:		No	
Operaciones de red:		No	
Renovaciones:		No	
Reguladoras internas al sector:		No	
Entradas múltiples a sector:		No	
Observaciones:			
<b>DATOS GAYTA</b>			
Diámetro interior:		500	
Material:		FD	
Coherencia Gayta - Campo:		s; j	
<b>FOTOS</b>			
			
1		10	
			
11		12	

FIGURA 27. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 7 DE 8)

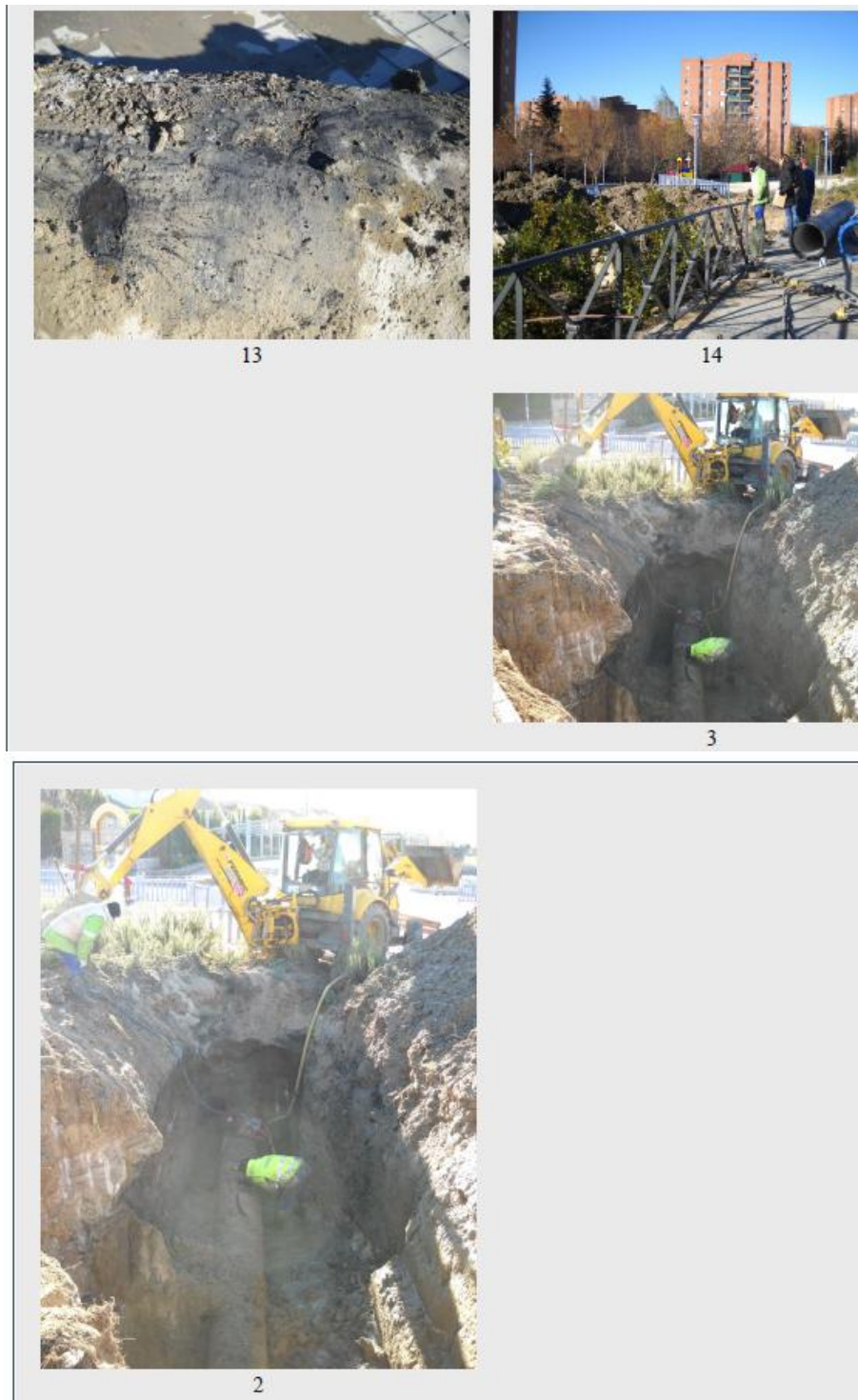
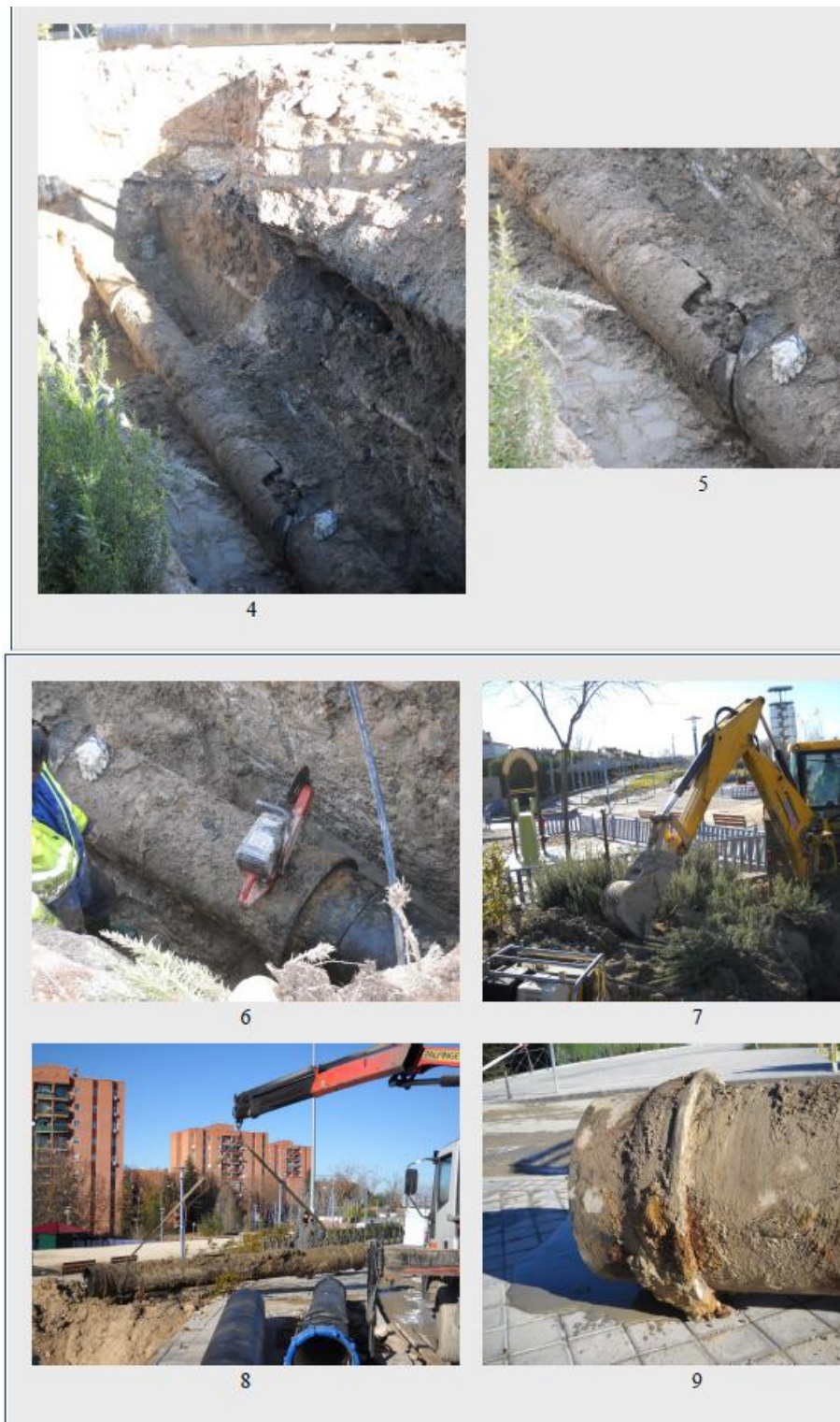




FIGURA 28. FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 8 DE 8)



## 4.2. ENSAYOS

A la par que se realizaron los trabajos de campo, se tomaron muestras de terreno y de tubería sobre un número escogido de roturas. A partir de las muestras obtenidas se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de ampliar la información recopilada en campo y ayudar a caracterizar en mayor profundidad aspectos relacionados con el fallo del elemento, tales como las condiciones de instalación, las propiedades del relleno del suelo, y las características y estado de la tubería. Además, en la segunda fase de los trabajos, se realizaron ensayos *in situ* del terreno para poder determinar la resistencia de los suelos mediante penetrómetro de dial.

### 4.2.1. Ensayos en laboratorio

El objetivo de estos ensayos era confirmar las relaciones observadas entre los datos de campo y las causas aparentes de fallo. Con el avance del proyecto, y en función de los resultados que se iban obteniendo, se valoró la posibilidad de realizar ensayos distintos a los inicialmente establecidos para profundizar y ampliar las líneas de conocimiento. La relación de ensayos llevados a cabo en suelos, tuberías metálicas y plásticas se recoge en la Tabla 3.

**TABLA 3. TIPOLOGÍA DE LOS ENSAYOS EN LABORATORIO**

<b>ENSAYOS EN TUBERÍAS METÁLICAS</b>	Ensayo de dureza Brinell
	Ensayo de resistencia a la tracción
	Determinación metalográfica de la microestructura
	Análisis químico de los productos de la corrosión
	Composición química de perfiles metálicos
<b>ENSAYOS EN TUBERÍAS PLÁSTICAS</b>	Determinación de las propiedades de tracción
	Determinación de la densidad de plásticos
	Determinación de las propiedades de flexión de plásticos
	Determinación de la rigidez anular
	Determinación del tiempo de inducción a la oxidación (TIO)
<b>ENSAYOS EN SUELOS</b>	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
	Límites de Atterberg
	Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo
	Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe
	Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa
	Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo
	Determinación del contenido en sales solubles
	Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del Permanganato potásico
	Determinación de pH
	Determinación de la resistividad de suelos
	Determinación de la densidad de un suelo
Determinación del peso específico de las partículas	

#### a. Ensayos en tuberías metálicas

Con el estudio de la composición química y de las propiedades mecánicas del material que conforman la tubería, se pretendía conocer el comportamiento de la misma hasta el momento en que se produjo el fallo, pues este tipo de ensayos reflejan la respuesta del material ante la agresividad del medio y ante los esfuerzos y cargas externas a los que se ve sometido mientras se encuentra en servicio.

La elección de las muestras para análisis en laboratorio atendió a criterios objetivos, seleccionando aquellas donde se habían observado fenómenos de corrosión importantes y/o degradación o estado del material inadecuado, tomando la muestra sobre pared de tubo.

Las tuberías de plomo, cobre y de fibrocemento<sup>3</sup>, que se encuentran fuera de la actual normativa de Canal de Isabel II, no se han sometido a ensayos de resistencia, puesto que la mayoría de ellas han superado su periodo de vida útil y los resultados obtenidos son difícilmente extrapolables a otros tubos por no tener conocimiento sobre sus condiciones de fabricación e instalación.

Los parámetros de interés en el estudio de las tuberías metálicas fueron:

- El estudio de la microestructura y la composición química del material: La composición química, influye directamente en las propiedades mecánicas del material, y junto con la velocidad de enfriamiento son los dos factores que determinan principalmente la estructura final de una fundición al solidificar. La micrografía permite estudiar las características microestructurales constitutivas del metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas del mismo, y así advertir las posibles alteraciones que haya podido sufrir, como ocurre con el caso de la grafitización. Las discontinuidades que pudieran aparecer en la matriz de las fundiciones disminuyen sus propiedades mecánicas. La mayoría de las fundiciones contienen fósforo, pero si el contenido de éste es elevado, se puede producir esteadita. Aunque es uno de los contribuyentes normales de las fundiciones, dadas sus propiedades físicas, debe controlarse.
- El estudio de los productos de corrosión: Los procesos de corrosión u oxidación interna que sufren las tuberías, altera las propiedades mecánicas del material, disminuyendo su capacidad resistente. El análisis de los productos de corrosión formados sobre la pared del material puede desvelar el mecanismo de transformación de los compuestos que constituyen la aleación, e incluso ofrecer una valoración sobre el posible efecto protector que puedan tener en la tubería. González Fernández (1984) relacionó el contenido en silicio de las películas de óxido formadas sobre los metales con el número de grietas formadas. Una vez se empieza a producir la corrosión, los componentes metálicos continúan oxidándose e hidratándose, formando productos expansivos que provocan tensiones y originan microfisuras en la pared que pueden suponer la causa de fallo frágil de la estructura o la formación, con el tiempo, de macropicaduras.
- Las propiedades mecánicas del material: El estudio de la dureza Brinell, la resistencia a la tracción y el alargamiento en rotura permite valorar las características mecánicas actuales de los materiales que conforman las tuberías con las establecidas en la normativa vigente.

---

<sup>3</sup> RD 396/2006 Real Decreto 396/2006 de Disposiciones mínimas de SyS para trabajos con riesgo de exposición al amianto.

## b. Ensayos en tuberías plásticas

Los ensayos sobre materiales plásticos se centraron en establecer relaciones entre las causas y modos de fallo observados, el grado de degradación de las acometidas y las fuentes de suministro o agentes desinfectantes (ETAP, Cloradoras y Depósitos) utilizados en la red de distribución de la Comunidad de Madrid.

Los parámetros de interés en el estudio de las tuberías plásticas fueron:

- El estudio de la densidad del plástico: Las propiedades mecánicas de las tuberías plásticas se ven influenciadas debido a la densidad del polietileno, que permite diferenciar entre las distintas clases del mismo, éste puede ser de baja, media o alta densidad, dependiendo de la estructura interna que integre el material. La densidad del tubo influye en lo referente al comportamiento del tubo, en lo que respecta a la rigidez, la flexibilidad y la resistencia mecánica, ante las diferentes sollicitaciones, a las que estará sometido el mismo.
- El estudio de las propiedades mecánicas de las tuberías plásticas: Estos ensayos están encaminados a modelizar el comportamiento que tiene el material plástico ante cargas y esfuerzos externos.
- El estudio del tiempo de inducción a la oxidación permite evaluar la estabilidad de un material de base polimérica frente a la oxidación a lo largo de su vida útil. Durante su envejecimiento este parámetro irá disminuyendo a medida que se agota el antioxidante presente en la tubería.

## c. Ensayos en suelos

La realización de ensayos sobre muestras de suelo se justificaba dada la influencia del terreno circundante en el comportamiento mecánico de las tuberías. *A priori*, cabe esperar que el estado de los rellenos influya sobre el comportamiento mecánico de la tubería y sobre la degradación de algunos materiales, como los procesos de corrosión de materiales metálicos. Por ello, se estudió el uso del suelo y el terreno adyacente con el fin de prever medidas adecuadas en el caso de terrenos agresivos y cargas externas.

Las muestras de suelo se tomaron en localizaciones cercanas a dónde se produjo el fallo, procurando mantener la representatividad del material en cantidad suficiente como para realizar los ensayos y minimizando su alteración por el fenómeno de la rotura.

Los parámetros de interés en el estudio del suelo han sido:

- **La granulometría del terreno:** Su estudio, junto al de determinación de los límites de Atterberg, permite conocer con cierta exactitud y mucha rapidez el tipo de suelo de que se trata, caracterizando así el terreno y prediciendo los esfuerzos que puede, o no, soportar.
- **El contenido de humedad:** La humedad actúa como un electrolito en la corrosión electroquímica de las tuberías que contienen hierro. Este parámetro también es de interés por la generación de movimientos diferenciales en el terreno bajo presencia o ausencia de contenido en agua, aplicando cargas perjudiciales para la estabilidad del tubo en muchos casos. Ayuda a definir el grado de saturación de un suelo.



- 💧 **La compactación y capacidad para contraerse o expandirse un suelo:** En el estudio se tiene en cuenta la capacidad del relleno de la zanja y de los sedimentos de alrededor a la compactación. Una alta capacidad para expandirse y contraerse incrementa los ratios de fallo debido al estrés impartido por el suelo durante los ciclos de contracción/compresión.
- 💧 **La resistividad del suelo:** La resistividad de un terreno depende de su estructura, granulometría, composición del terreno, saturación, salinidad, porosidad, permeabilidad, temperatura, del contenido de humedad y de iones, etc. En la bibliografía se cita que la velocidad de corrosión está ligada a la resistividad del terreno, de forma que puntos del terreno con valores bajos de resistividad pueden aumentar los ratios de corrosión.
- 💧 **pH:** El valor del pH incide sobre las tuberías que se encuentran en contacto directo con el suelo, ya tengan base de cemento o sean metálicas. Los tubos de cemento sufren el efecto de los componentes químicos del suelo, que pueden reaccionar penetrando en los poros, expandiendo el material y erosionando o disgregando los compuestos de la tubería.

Valores bajos de pH ( $\text{pH} < 4$ ) se asocian generalmente con corrosión en tuberías de materiales metálicos y deterioro en tuberías de cemento.

Por otra parte, suelos alcalinos ( $\text{pH} > 8$ ) pueden también provocar corrosión en tuberías metálicas así como en la armadura del hormigón.

- 💧 **El contenido en materia orgánica:** La materia orgánica presente en el suelo tiende a oxidarse y desaparecer provocando huecos y pérdida de volumen, comprometiendo la estabilidad del terreno.
- 💧 **El contenido en sulfatos y sales solubles:** El contenido en sulfatos se estudia para comprobar la agresividad del suelo y su posible relación con la corrosión. Los sulfatos reaccionan con materiales cementicios formando yeso y etringita<sup>4</sup>, ocasionando la erosión, disgregación y destrucción de los morteros y hormigones a través de sus poros por donde penetran. El ataque por sulfatos ocurre sólo cuando las sales de éstos se encuentran en solución. Además, la presencia de sales solubles puede comprometer la estabilidad del terreno produciendo cambios volumétricos en el mismo. La Comunidad Autónoma de Madrid cuenta con zonas con yesos que en determinadas condiciones de humedad pueden provocar suelos con cierto nivel de agresividad.

Junto a los parámetros mencionados, se estudiaron distintos aspectos para completar la caracterización de los suelos como la densidad, la relación entre la humedad/porosidad y la humedad/límite líquido de un suelo.

---

<sup>4</sup> Etringita: Sulfoaluminato de calcio hidratado que se forma durante las primeras etapas de hidratación del cemento Portland.

#### 4.2.2. Ensayos *in situ*

El ensayo desarrollado *in situ* mediante penetrómetro de dial se realizó para obtener valores estimativos de la resistencia del terreno, facilitando así la caracterización del grado de compactación de la cama y del relleno presentes en la zanja. Se procuró siempre buscar la zona menos afectada por las condiciones de la rotura. Estos valores sirven para tener un orden de referencia del estado del relleno, que depende del grado de compactación y del tipo de material empleado.

#### 4.3. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS FINAL

Con toda la información recopilada a través de las fichas de campo y los ensayos de laboratorio se ha desarrollado una base de datos, integrando todos los campos obtenidos en cada uno de los registros de la muestra en ambas fases de trabajo, desde el descubrimiento del fallo hasta la reparación. Las visitas realizadas han permitido obtener información fiable y contrastada de datos específicos que habitualmente no son recopilados por las compañías de agua, permitiendo analizar de forma precisa las causas de fallo de los elementos. Se ha elaborado una base de datos apoyada en nuevas variables explicativas de los fallos de la red que representa un gran avance en la provisión de datos robustos, ayuda a la evaluación de la condición de estado, mejora el conocimiento existente sobre las causas de rotura en redes de abastecimiento de agua urbana y sirve de apoyo a futuros análisis. Las variables registradas en dicha base de datos se clasificaron en siete categorías recogidas en la Tabla 4.

**TABLA 4. VARIABLES REGISTRADAS EN LA BASE DE DATOS DE LA MUESTRA DE ROTURAS**

CATEGORÍAS	VARIABLES
Características propias de la tubería o conjunto de medida	Tipo de tubería, material, diámetro, espesor, presión nominal, tipo de llave, etc.
Relacionadas con las condiciones ambientales	Temperatura el día de la rotura, temperaturas medias, máximas, mínimas, precipitación, características del terreno adyacente, agresividad, etc.
Descriptivas de la instalación	Tipo de instalación, tipo de material de relleno y de la cama, altura de recubrimiento, presencia de materia orgánica, yesos, escombros, rellenos antrópicos, etc.
Relacionadas con el mantenimiento y operatividad de la red	Datos relativos a la presión, al caudal, a la existencia de maniobras e, incluso, a las tasas de roturas previas.
Descriptivas del estado de la tubería	Ovalación, corrosión, aplastamiento, incrustaciones, etc.
Tipología y descripción del fallo	Modo del fallo, localización del fallo y causa de fallo.
Identificativas	Calle, municipio, fecha, hora, coordenadas X e Y, etc.

Esta herramienta constituye una valiosa fuente de información que implica aspectos técnicos relacionados con la colección, procesado, validación y almacenamiento de los datos. La recopilación de los mismos se llevó a cabo por personal cualificado capaz de reconocer los diferentes mecanismos de rotura, pero en múltiples ocasiones fueron varios los elementos que provocaron el fallo de la instalación al mismo tiempo, por lo que, además de los datos considerados en las fichas de campo y los relativos a ensayos de laboratorio, se incluyeron otros nuevos. Por ejemplo, se estableció un campo que recogía la determinación de la causa de fallo más probable, con el fin de mantener un criterio unificado, y otro que consideraba el modo de fallo en gabinete incluyendo la opción de fuga no descrita en el modo de fallo en campo. Con ello, se pretendió ilustrar con mayor claridad ciertos aspectos de la realidad, como por ejemplo, aquellas roturas producidas en las juntas, accesorios o piezas especiales.

La recopilación y análisis de los datos obtenidos favorece la comprensión del fenómeno de la rotura y establece las bases para el desarrollo de futuros proyectos de I+D+i basados en modelos de deterioro estructural y encaminados a predecir el fallo de las tuberías.

## 5. Caracterización de la muestra estudiada



La muestra objeto de interés está comprendida por un total de 4.991 roturas de tubería general, acometidas y conjuntos de medida. Estas roturas han sido visitadas y analizadas en el mismo momento en que se descubrieron y se repararon a lo largo del periodo desde abril de 2010 hasta enero de 2013. La composición de la muestra estudiada comprende un 39% (1.937 roturas) de tubería general, un 51% (2.545 roturas) de acometidas y un 10% (509 roturas) de conjuntos de medida (Figura 29). El primer tramo de la acometida (31%) está comprendido entre la tubería general y la llave de corte de acera; el segundo tramo (20%), entre la llave de corte de acera y el armario o fachada de las viviendas (Figura 30).

FIGURA 29. COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA

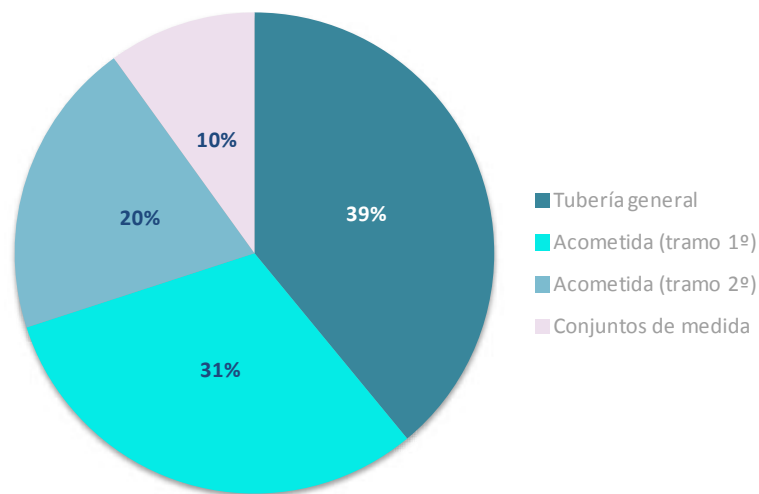
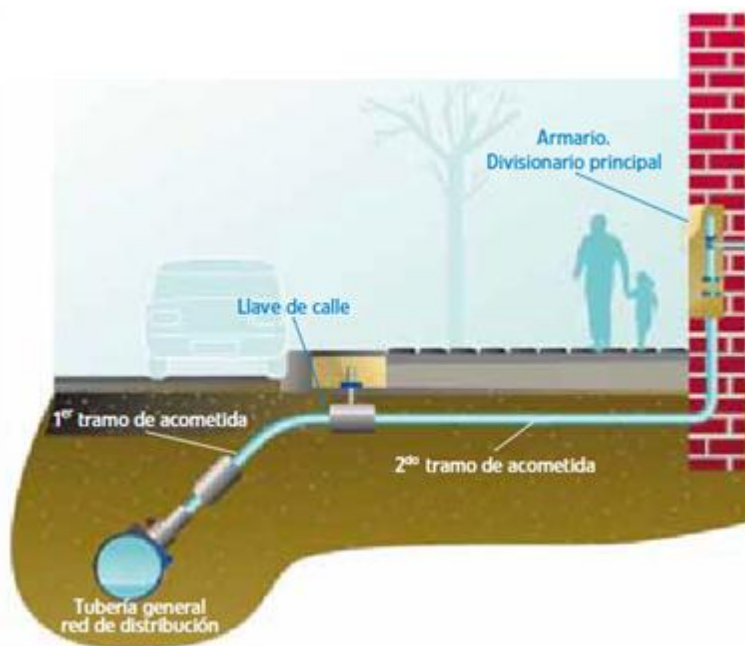


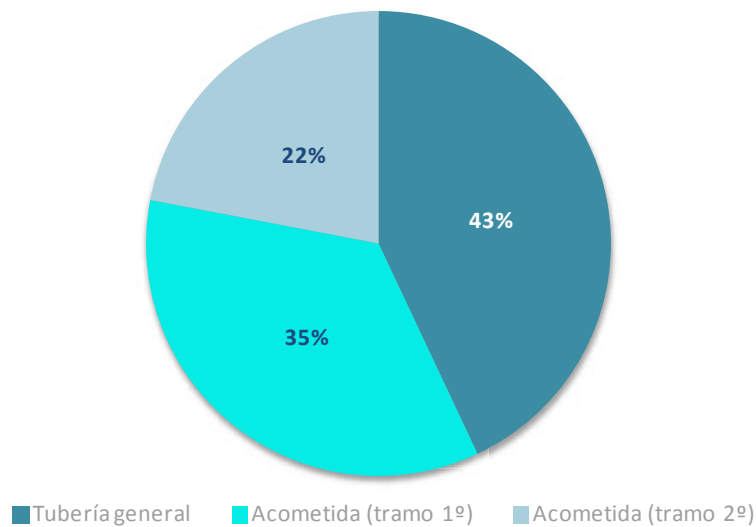
FIGURA 30. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA



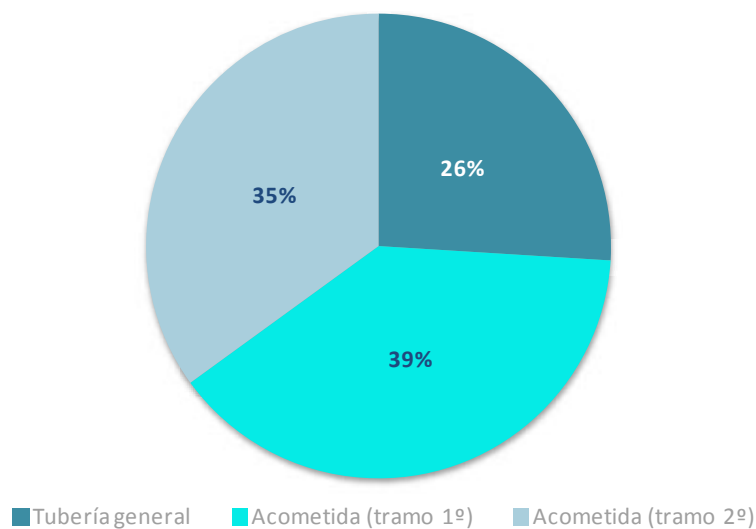
La representatividad de la muestra seleccionada está basada en datos conocidos como: tipo, material, diámetro, distribución geográfica, edad, periodo estacional, emplazamiento y condiciones en que se produjo la rotura.

Analizando los datos registrados de tubería y acometida en el mismo espacio temporal en el que se realizaron los trabajos de campo (Figuras 31 y 32), puede verse que la mayor parte de las incidencias de la red de Canal de Isabel II se produjeron en acometidas (74%). La proporción de roturas en tubería general y acometidas de la muestra difiere ligeramente con respecto a la frecuencia de fallos en la red de Canal de Isabel II; no obstante, la muestra se consideró representativa ya que esta discrepancia se debe al hecho de que en la definición del estudio se perseguía cubrir un número determinado de roturas de cada tipología y material para poder caracterizarlos (Tabla 5).

**FIGURA 31. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS VISITADAS, SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL ELEMENTO**



**FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CANAL DE ISABEL II, SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL ELEMENTO**



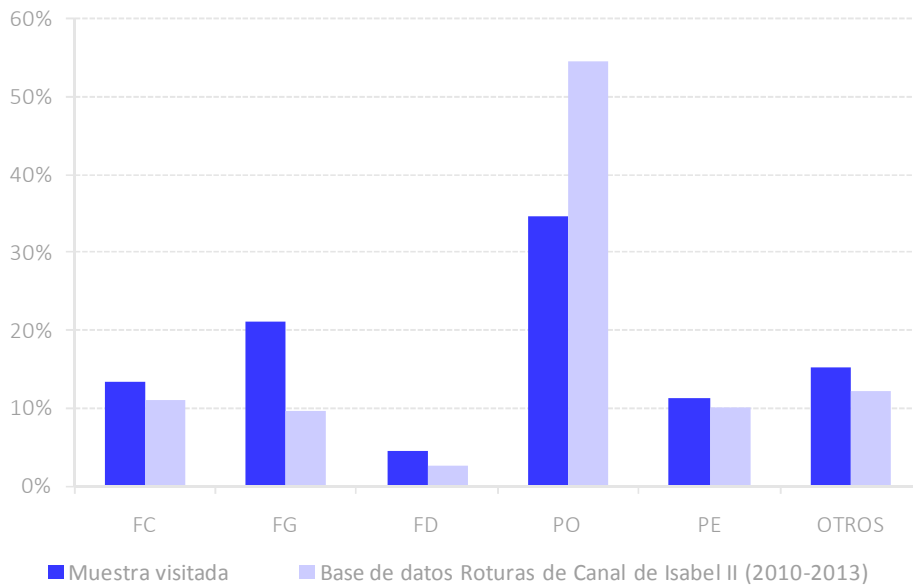


A modo ilustrativo, en la Figura 33 se muestra gráficamente una comparativa entre el conjunto de roturas estudiado y las roturas registradas en las bases de datos, atendiendo al tipo de material.

**TABLA 5. ROTURAS DE ACOMETIDAS Y TUBERÍAS VISITADAS SEGÚN MATERIAL**

<i>Código</i>	<i>Material</i>	<i>Roturas tubería general</i>	<i>Roturas acometidas (tramo 1º)</i>	<i>Roturas acometidas (tramo 2º)</i>
FG	Fundición gris	881	38	23
FC	Fibro cemento	591	4	6
FD	Fundición dúctil	190	4	1
PO	Polietileno de normativas anteriores a la vigente	122	888	546
PV	PVC de normativas anteriores a la vigente	47	3	2
PE	Polietileno de normativa vigente	41	262	200
CA	Caña	32	60	69
AH	Acero helicosoldado	13	0	0
PL	Plomo	5	292	138
ND	No definido	5	5	0
AC	Acero	4	0	1
PN	PVC de normativa vigente	2	0	0
HC	Hormigón armado con camisa de chapa	2	0	0
FV	Fibra vidrio	1	0	0
HT	Hormigón pretensado con camisa de chapa	1	0	0
CU	Cobre	0	1	2
HA	Hormigón armado	-	-	-
RP	Rehabilitado polietileno	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>1.937</b>	<b>1.557</b>	<b>988</b>

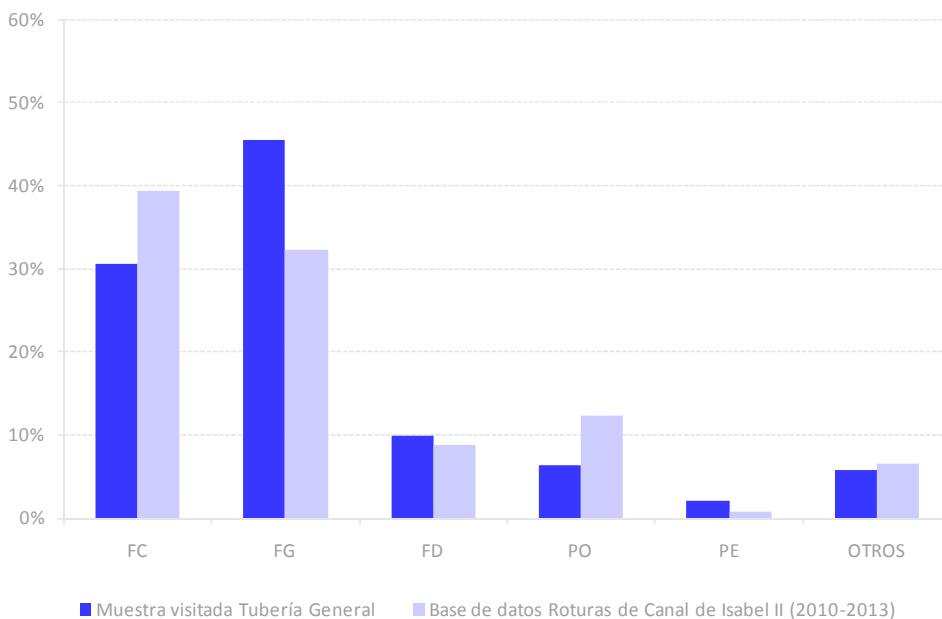
**FIGURA 33. PORCENTAJES DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL Y ACOMETIDAS SEGÚN MATERIAL**



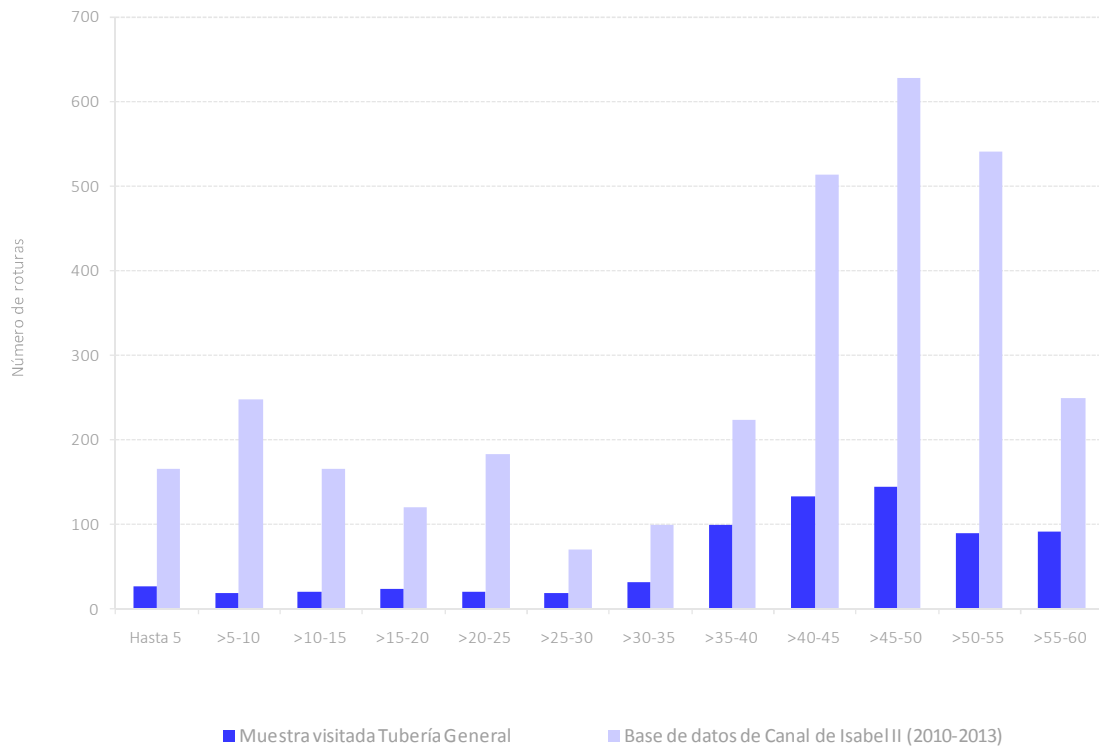
### 5.1. TUBERÍAS

El análisis estadístico de la muestra relativa a tubería general comprende un total de 1.937 elementos. Se puede observar en las figuras 34 y 35 una comparativa de las roturas visitadas, frente a los registros de las bases de datos, en el mismo espacio temporal, en función del material y la edad de tubería general. En la Tabla 6 se muestra la desviación (%) de la distribución por edades de la muestra de tubería general recogida frente al registro total de roturas. Además, cabe mencionar que solo se conoce la edad en el 37% de las muestras tomadas de roturas de tubería general, ya que las tuberías entre los años 1900 y 1950 se han estimado de edad desconocida.

**FIGURA 34. PORCENTAJES DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, SEGÚN MATERIAL**



**FIGURA 35. ROTURAS DE EDAD CONOCIDA-REPARTO POR EDADES (AÑOS)**



**TABLA 6. DESVIACIÓN OBSERVADA ENTRE LAS ROTURAS MUESTREADAS Y LA BASE DE DATOS DE ROTURAS DE CANAL DE ISABEL II**

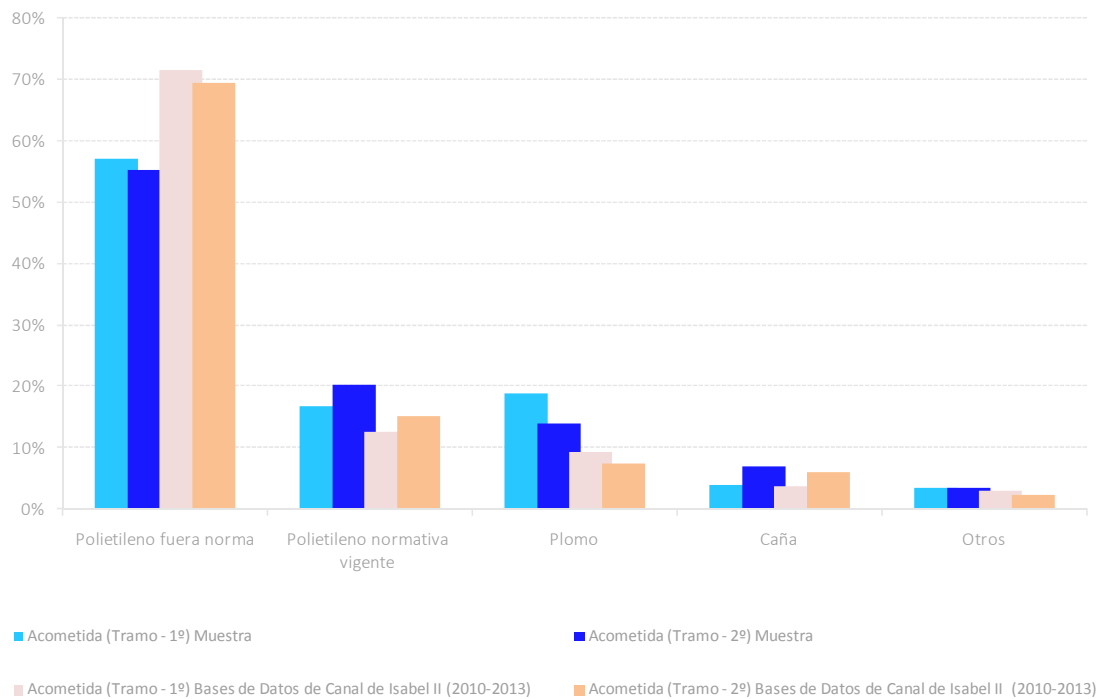
<i>Edad (años)</i>	<i>Distribución de la muestra visitada, respecto del total de roturas registradas</i>
Hasta 5	0,1%
> 5-10	1,3%
>10-15	0,4%
>15-20	0,3%
>20-25	0,6%
>25-30	0,6%
>30-35	1,2%
>35-40	4,7%
>40-45	4,0%
>45-50	3,6%
>50-55	0,6%
>55-60	3,8%
Desconocido	16,6%

## 5.2. ACOMETIDAS

La muestra comprende un total de 2.545 acometidas de las cuales 1.557 se corresponden con acometidas de primer tramo y 988 con acometidas de segundo tramo.

Al igual que en el punto anterior, se valora la representatividad de esta parte de la muestra comparando las roturas visitadas en acometida, frente a las registradas en las bases de datos, en el mismo espacio temporal. Dicha comparativa se ilustra en la Figura 36 en función del material de la acometida. El volumen de información relativa a la edad de las acometidas no se ha estimado suficiente para comparar resultados en este estudio.

FIGURA 36. MATERIAL DE ROTURAS VISITADAS EN ACOMETIDAS

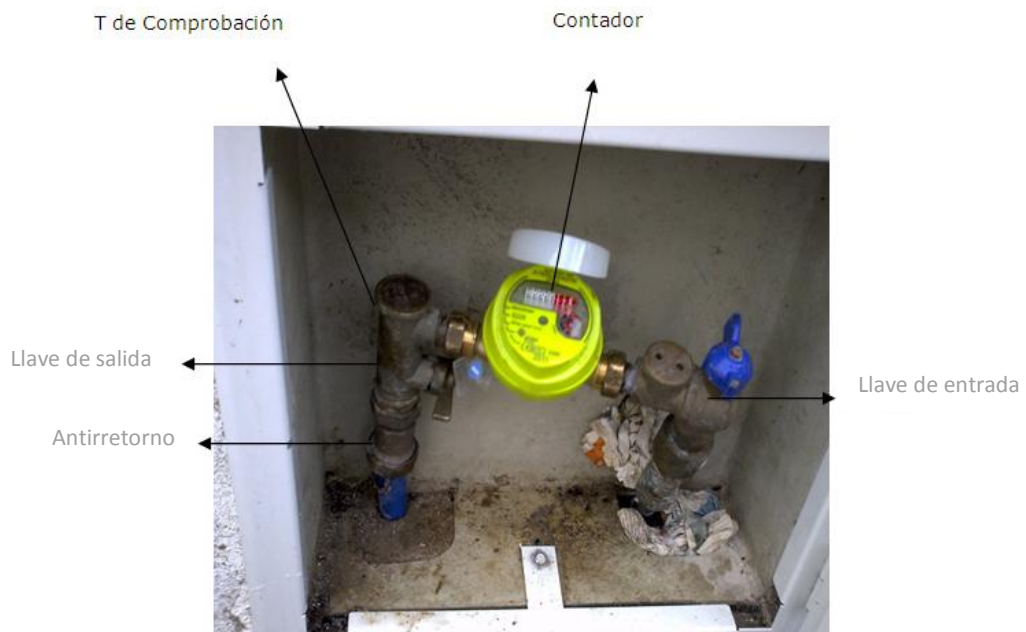


La distinción entre los dos tramos en acometidas viene justificada por las características de la instalación, especialmente en relación a la diferencia en las cargas de tráfico a las que podría verse sometido cada tramo. No obstante, las roturas en ambos tramos comparten numerosas variables explicativas (año de instalación, diámetro, tipo de terreno, uso del suelo, etc.) y se ha observado una distribución homogénea de los fallos entre el primer y el segundo tramo (Figura 36), por lo que en el análisis posteriores se ha valorado la agrupación de ambas categorías, considerando de forma conjunta el fallo en acometida.

### 5.3. CONJUNTOS DE MEDIDA

Análogamente a la investigación hecha en tuberías y acometidas, se han estudiado los conjuntos de medida. La muestra comprende 509 roturas en las que se han analizado los diferentes componentes del conjunto de medida (llave de entrada, contador, llave de salida, presencia de elemento antirretorno y de "T" de comprobación, etc.), y las características del alojamiento que lo contiene.

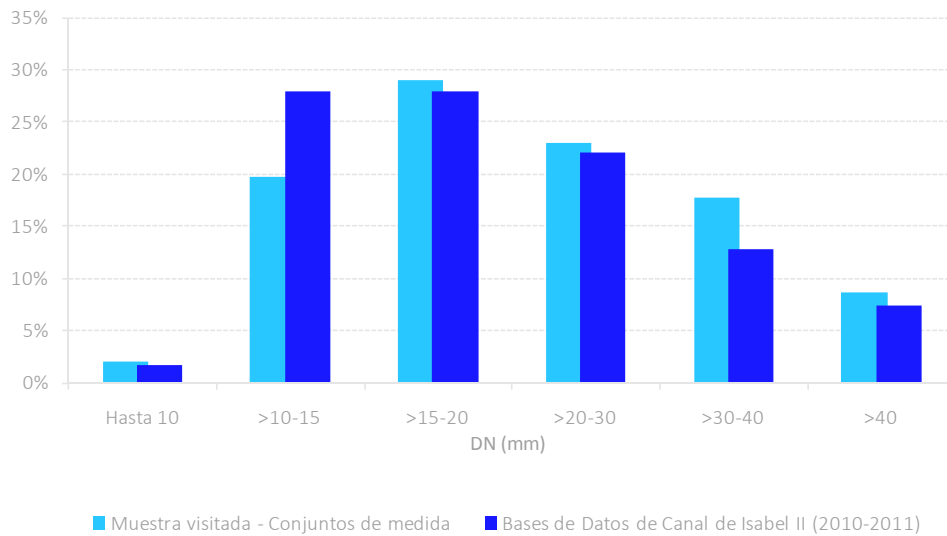
**FIGURA 37. CONJUNTO EN ESCUADRA CON LOS COMPONENTES PRINCIPALES**



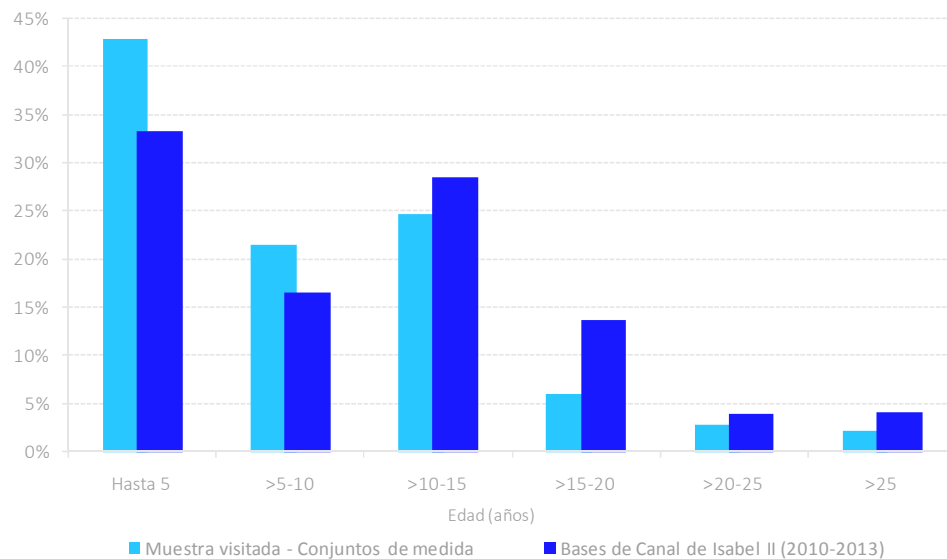
Dadas las múltiples formas de fallo, según el componente del conjunto de medida, y basándose en las diferentes razones para la sustitución de los mismos, sólo se dispone de información fiable de la edad y el diámetro nominal del contador para caracterizar la muestra. No obstante, el detalle del análisis de la muestra se realiza en el apartado 6.2. Distribución de las roturas en conjuntos de medida según los registros visitados.

En las figuras 38 y 39 se valora la representatividad de la muestra, respecto al diámetro nominal, y la edad de los contadores de los conjuntos, comparando las roturas visitadas frente a la información disponible que ha sido registrada en las bases de datos en 2010 y 2011, coincidiendo con el inicio de los trabajos.

**FIGURA 38. DIÁMETRO NOMINAL DE LOS CONTADORES DE LA MUESTRA Y DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS DE CANAL DE ISABEL II**



**FIGURA 39. EDAD DE LOS CONTADORES DE LA MUESTRA Y DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS DE CANAL DE ISABEL II**



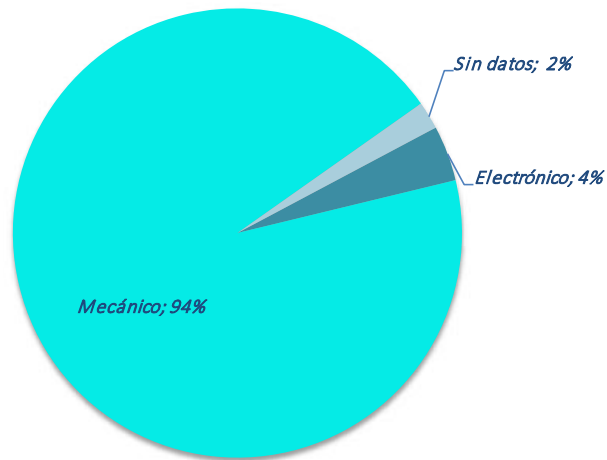
Se incorporan a continuación algunos datos complementarios en cuanto al contador, tipología del medidor y de las llaves, y otras variables para conocer las características de la muestra de conjuntos de medida visitada, que se pueden observar en la Figura 40, y se resumen de la siguiente forma:

- El 94% presentaban contador de tipo mecánico, con medidor de turbina o de hélice en el 87% de los casos.
- Disponían de toma de comprobación el 70% de las muestras; y de elemento antirretorno el 52% de ellas.
- En cuanto a la tipología de las llaves, predominaba la válvula de bola, tanto en la llave de entrada (59%), como en la llave de salida (68%).

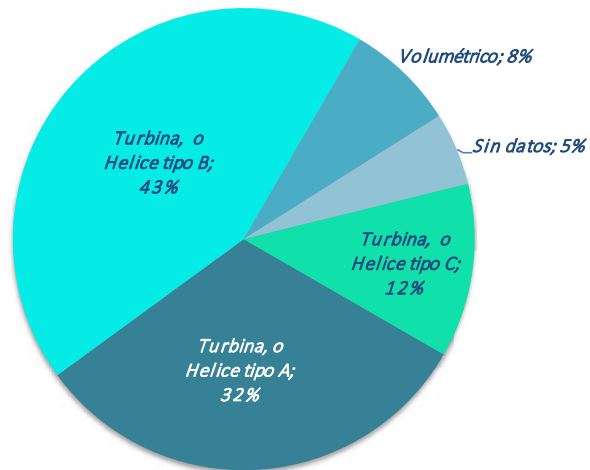


FIGURA 40. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA DEL CONJUNTO DE MEDIDA. A)

**Contador**



**Tipología del medidor**



**Toma de comprobación**

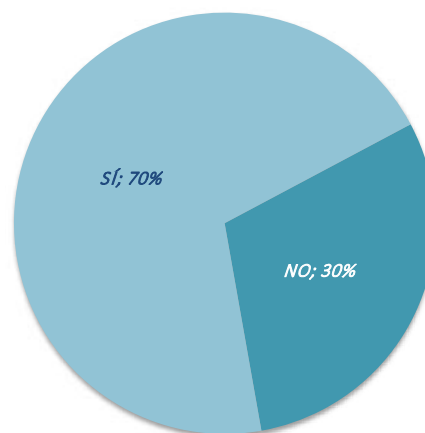
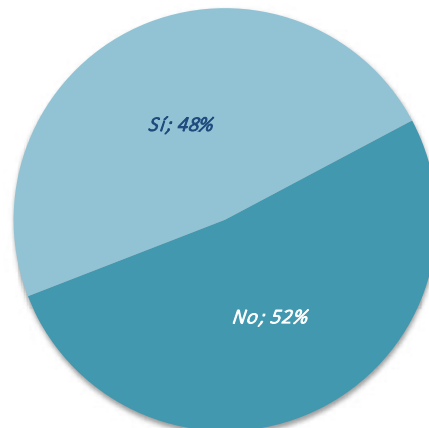
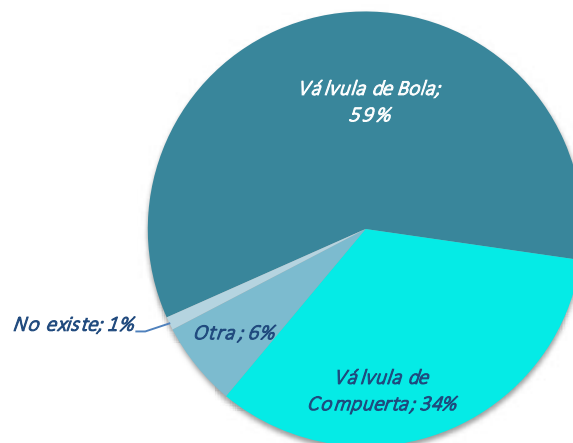


FIGURA 40. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA DEL CONJUNTO DE MEDIDA. B)

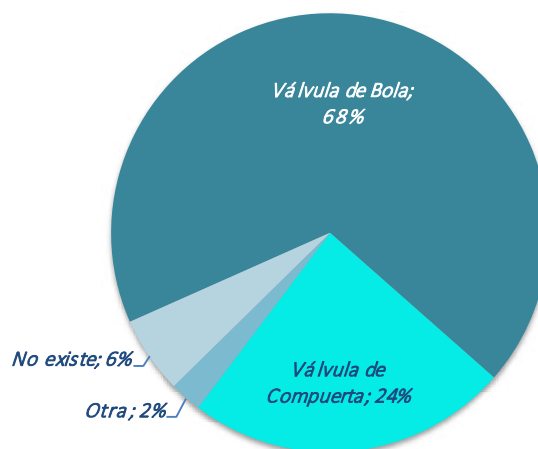
*Elemento antirretorno*



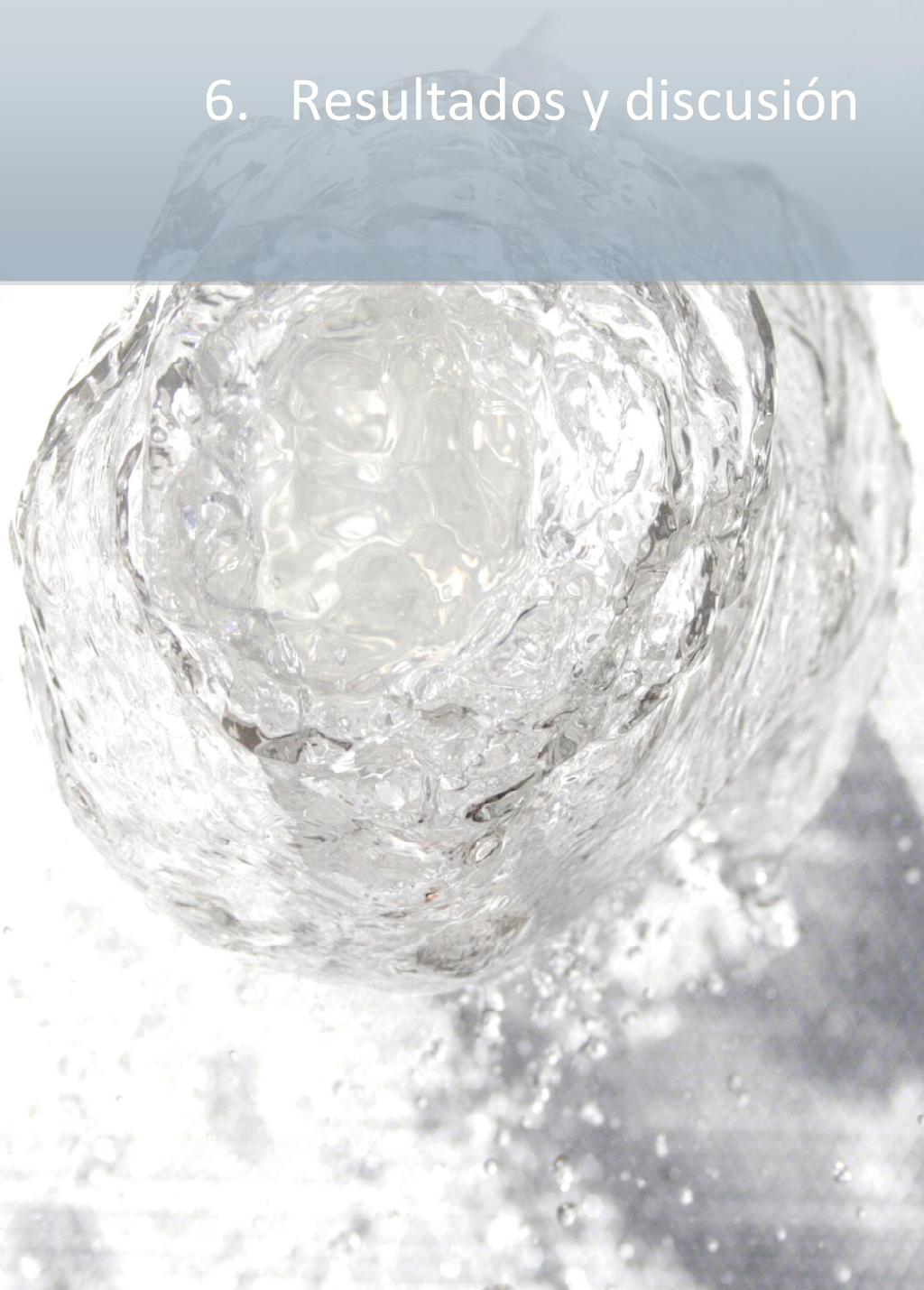
*Tipología llave de Entrada*



*Tipología llave de Salida*



## 6. Resultados y discusión



## 6.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS ROTURAS EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS

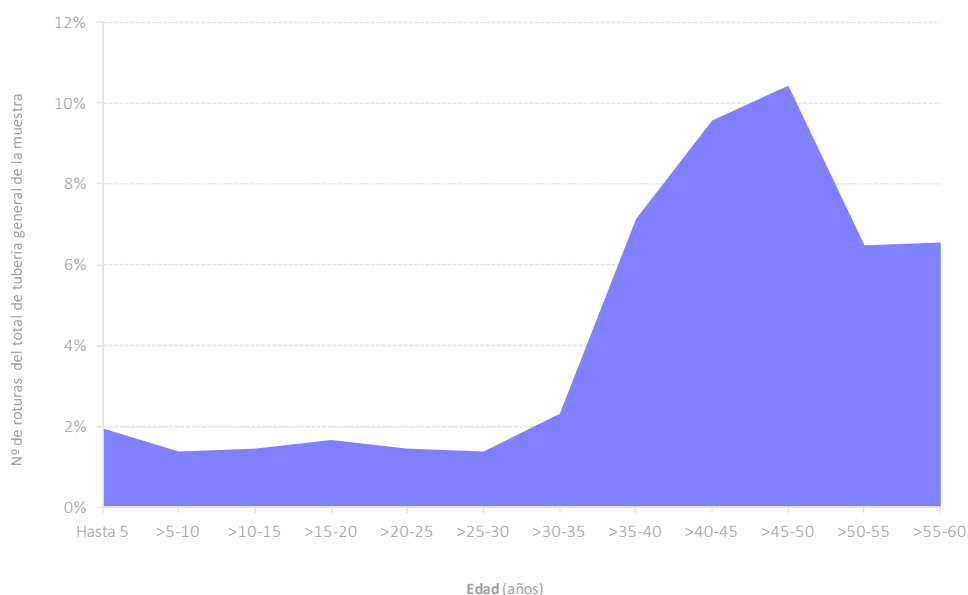
Como se ha indicado en capítulos anteriores, la muestra analizada de roturas en tubería y acometida está constituida por 4.491 registros, de los cuales 1.937 corresponden a fallos en tubería general, 2.545 a fallos en acometidas y 509 a conjuntos de medida. A continuación se realiza un estudio de la muestra en relación a la edad, diámetro y material de las tuberías y acometidas identificando su función de distribución.

### 6.1.1. Según la edad

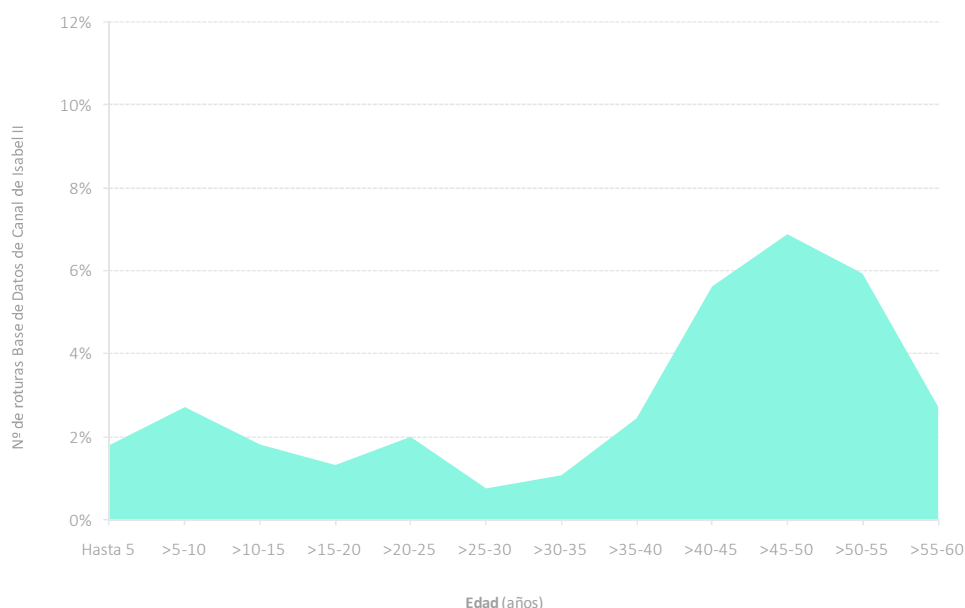
La edad es una variable que, lógicamente y por los procesos de desgaste, influye en la vida útil de las tuberías. Intuitivamente, parece que las tuberías son más propensas a fallar cuanto más envejecen. Sin embargo, se han observado fallos en tuberías a edades relativamente tempranas. Este hecho pone de manifiesto que los procesos de rotura son más complejos de lo que parecen y que la diversidad de factores que existen afecta de manera distinta a la vida de la tubería.

Como se ha indicado en la caracterización de la muestra, se conoce la edad del 37% de la muestra. El resto se corresponde con las tuberías instaladas entre los años 1900 y 1950, que se ha considerado como información no fiable, ya que no figura su edad. Por ello, estudiando las roturas de edad conocida para tubería general, tanto de la muestra (Figura 41), como las registradas en las bases de datos de Canal de Isabel II (Figura 42), se puede observar que el mayor número de roturas se produce a los 50 años de edad. Sin embargo, el análisis del total de roturas registradas muestra también una leve incidencia hasta edades de 10 años. Esto puede explicarse dado que la red está mayoritariamente constituida por fundición dúctil (70%), que es un material de reciente instalación, presentando su máximo en el intervalo anterior a los 5 años para la muestra y hasta los 10 años para el total de las incidencias en la red instalada, ya que en las curvas de fallo siempre hay un valor significativo en el inicio de la vida útil, como se confirma posteriormente en la Figura 43.

FIGURA 41. ROTURAS DE EDAD CONOCIDA EN TUBERÍA GENERAL DE LA MUESTRA



**FIGURA 42. ROTURAS DE EDAD CONOCIDA EN TUBERÍA GENERAL REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS**



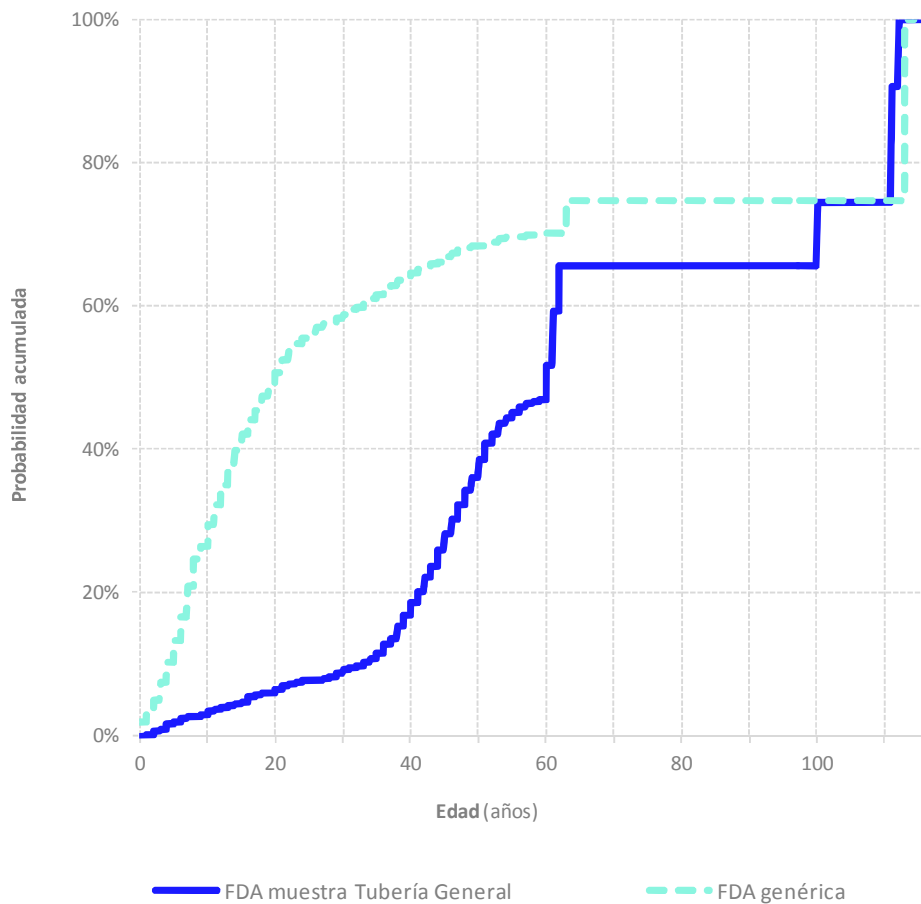
Para confirmar los resultados se ha representado, a su vez, la distribución de las roturas en tubería general en relación a la red instalada en el año 2010, coincidiendo con el inicio del periodo del registro de roturas de la muestra. Las posiciones de graficación permiten estimar la probabilidad acumulada de cada elemento de una muestra de valores. La fórmula que se ha empleado es la ecuación de Weibull, que tiene la siguiente expresión:

$$P(X \geq x_T) = \frac{m}{n + 1}$$

Donde  $m$  es la posición del elemento dentro de una serie ordenada en sentido descendente según su magnitud y  $n$  es el número total de elementos que van a ser graficados. Se ha seleccionado esta formulación porque consiste en una función de distribución centrada, que evita que la probabilidad del valor máximo de la muestra sea igual a la unidad y que el mínimo sea representado por una probabilidad nula.

La gráfica de la Figura 43, construida a partir de los datos de los tubos de la red de abastecimiento disponibles, de edad conocida, refleja la función de distribución acumulada de la red instalada (en adelante FDA genérica) y de la muestra de roturas de tubería general (FDA muestra).

**FIGURA 43. FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA SEGÚN LA EDAD DE LA TUBERÍA GENERAL**



A simple vista se observa un comportamiento dispar entre las dos curvas, siendo muy superior la probabilidad acumulada para una edad temprana cuando se analiza la FDA genérica. En el detalle de la FDA de roturas se diferencian claramente dos pendientes en la curva, con un punto de inflexión hacia la edad de los 35 años. Se puede observar cómo la probabilidad acumulada para esta edad no supera los 0,12 puntos. En cambio, en los 25 años posteriores, la probabilidad acumulada asciende casi 0,4 puntos. Cabe mencionar que los registros hasta una edad próxima a los 60 años superan la probabilidad acumulada del 65%, y esto se debe a que, como se ha indicado anteriormente, a partir de una edad de 60 años no se dispone de información fiable sobre el año de instalación de las tuberías. Como se vio en las figuras 41 y 42, se confirma que en los primeros años (entre los años 1 y 4), la probabilidad acumulada asciende a un ritmo superior que en años posteriores. Algunos autores asocian la mayor tasa de fallo inicial a edades tempranas, a la instalación de las tuberías (Davies et al., 2001). Se puede deducir que a medida que aumenta la edad, el número de fallos en tubería general es superior.

En el caso de las acometidas, no se han representado las curvas de fallo-edad ya que el número de registros en los que se conoce su antigüedad no es lo suficientemente elevada como para que la muestra sea estadísticamente representativa.



### 6.1.2. Según el diámetro

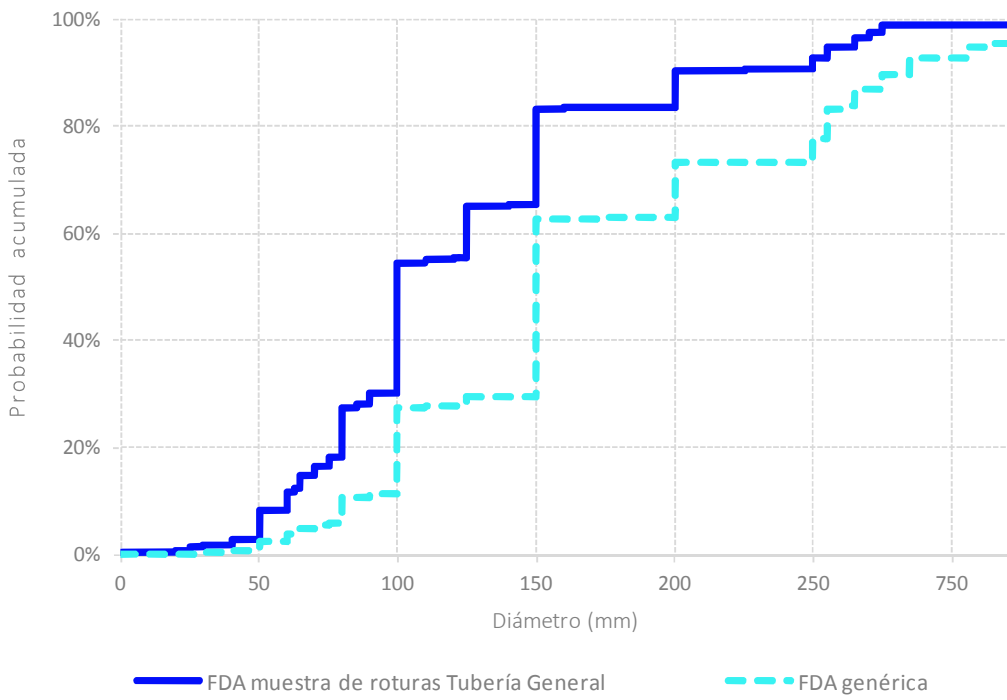
Paralelamente, se ha efectuado un análisis de la distribución de las roturas en tubería y acometida según su diámetro. De nuevo se han representado con la posición de graficación de Weibull las gráficas de FDA genérica y de roturas, para ambos casos.

Como se puede apreciar en la Figura 44 *a*, para el caso de tubería general, el ritmo de crecimiento de la probabilidad acumulada de la muestra de roturas es muy superior en diámetros menores o iguales a 125 milímetros, cuando se compara con la FDA genérica. En la FDA genérica, el mayor aumento se produce para diámetros de 150 milímetros. En la FDA de roturas, la probabilidad acumulada supera el 80% para diámetros menores o iguales a 150 milímetros y el 65%, si se consideran tuberías de 125 milímetros. Para diámetros de 100 milímetros, este porcentaje supera el 50%, resultando más del doble del correspondiente a la FDA genérica.

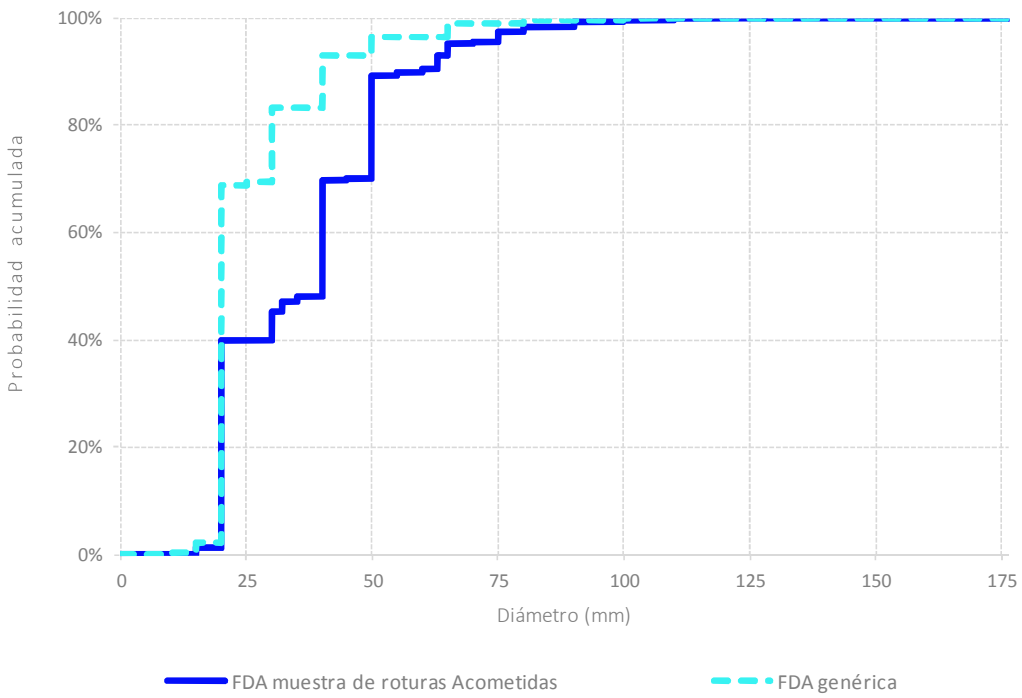
En la Figura 44 *b*, también se analizan los diámetros de las acometidas. Es destacable que en la FDA genérica se produce un incremento de la probabilidad acumulada de más del 60% para los diámetros de 20 milímetros. En la FDA de la muestra de roturas, la probabilidad acumulada para diámetros de 50 milímetros es casi del 90%, y aumenta considerablemente para diámetros de 20, 40 y 50 milímetros.

Dado que aproximadamente el 73% de la red instalada se corresponde con diámetros inferiores o iguales a 200 milímetros y que el 27% de dicha red presenta diámetros inferiores a 100, se corroboran estudios previos que afirman que la probabilidad de ocurrencia de roturas es mayor cuando los diámetros son más reducidos (Andreou, 1987; Walski, 1986; Eisenbeis, 1994; Rostum, 2000; Wang, 2006; Boxal, 2007). Algunos autores justifican que la tubería resista menos porque el espesor es menor cuanto menor es el diámetro de las tuberías (Rostum, 2000; Wang, 2006).

**FIGURA 44. FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA SEGÚN DIÁMETRO, PARA TUBERÍA GENERAL Y ACOMETIDAS**



a. Tubería General



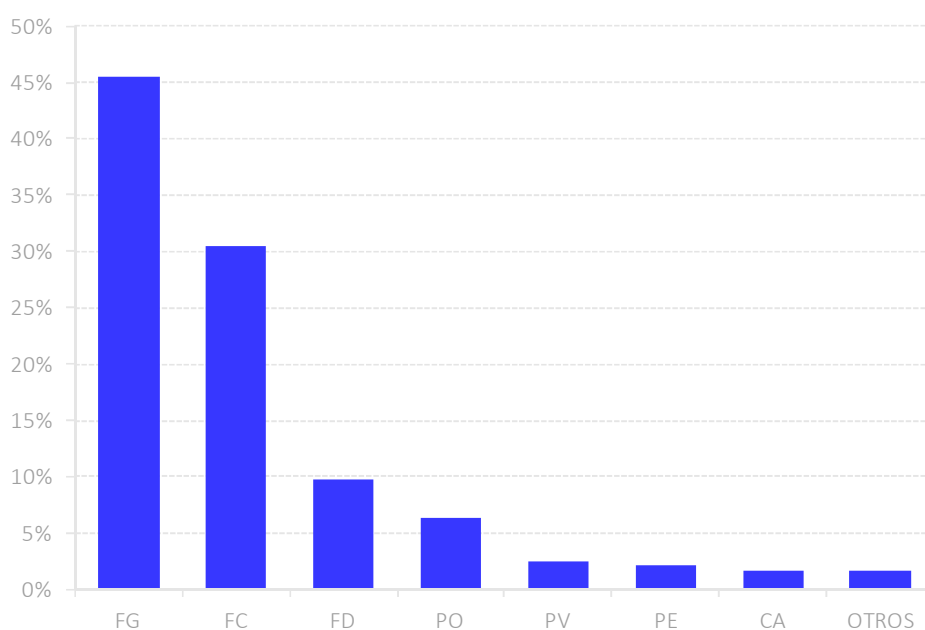
b. Acometidas

### 6.1.3. Según el material

Para completar el estudio sobre la distribución de roturas de la muestra se analizó la tercera variable significativa: el material. En este análisis no se incluyen materiales cuya presencia es inferior al 10% de las roturas de tubería general y acometida, por considerar que los datos disponibles son insuficientes como para obtener conclusiones extrapolables al resto de la red. En la Tabla 5, mostrada anteriormente, se presentaron las abreviaturas de los distintos tipos de materiales de las tuberías, a los que se hace referencia en las figuras 45, 46 y 47. Aquellos materiales registrados con una presencia inferior al 2% se agruparon en la categoría “Otros”.

Como se puede comprobar para tubería general (Figura 45), las roturas de la muestra se concentran en tuberías de fundición gris (45%) y en fibrocemento (31%), pero ambos materiales están fuera de la normativa vigente y actualmente no se instalan en la red de Canal de Isabel II. La fundición dúctil es un material relativamente moderno y con unas buenas características para el transporte de agua, de ahí que el fallo no sea tan habitual en tuberías (10% de la muestra).

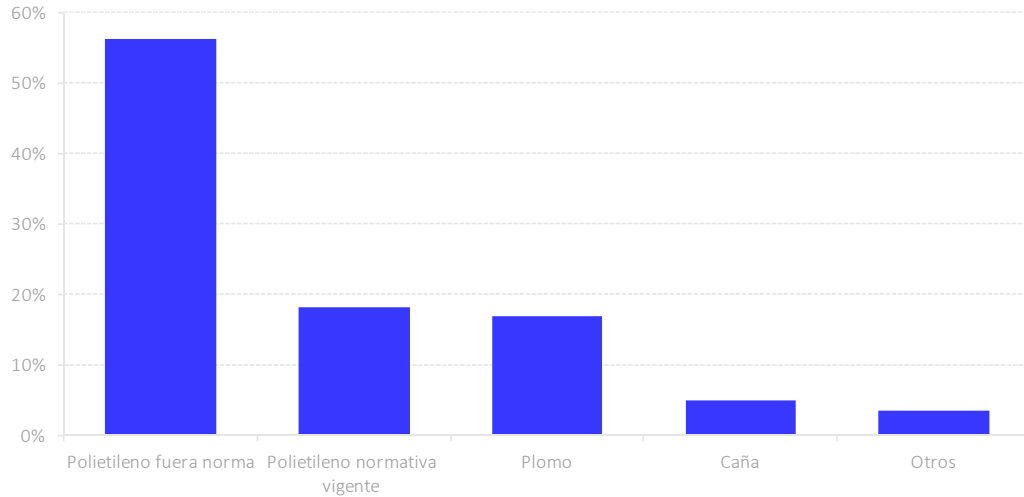
**FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ROTURAS EN LA MUESTRA DE TUBERÍA GENERAL, SEGÚN EL MATERIAL**



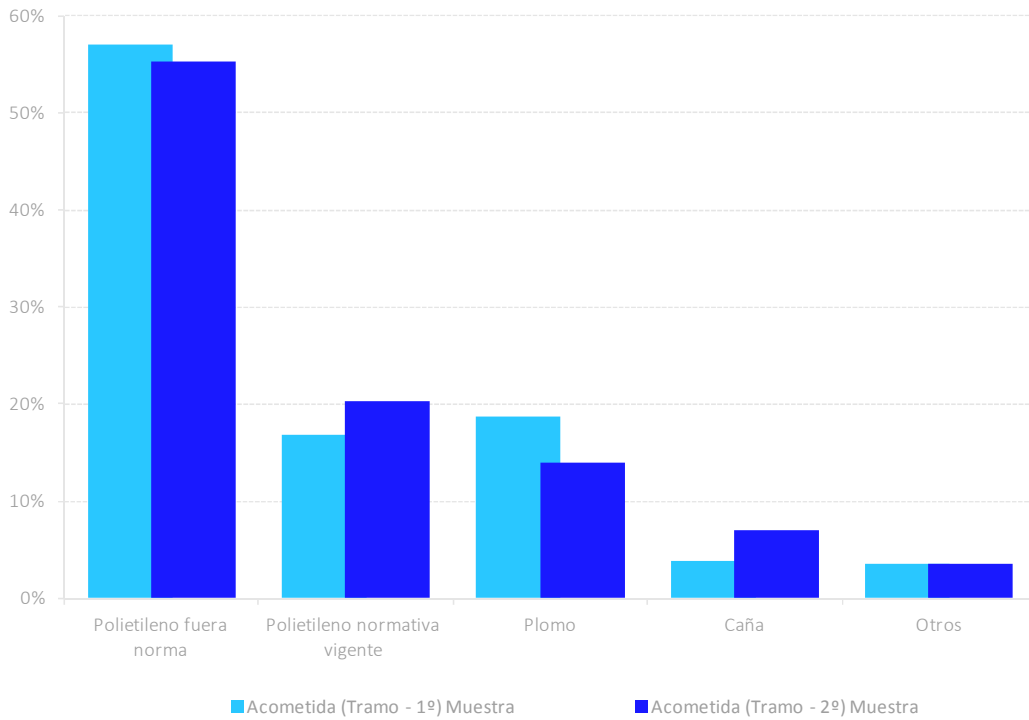
Del análisis de la muestra de acometidas en la Figura 46 *a.* y *b.* se observa que el principal material afectado por las roturas es el polietileno fuera de norma (56%). El polietileno de alta densidad, que consigue perfeccionar las características mecánicas y técnicas de su antecesor, presenta porcentaje razonablemente alto de roturas por su mayor presencia en la red (18%). Las conducciones de plomo, aunque es un material obsoleto que ha de sustituirse, forma una parte importante de la red más antigua de acometidas, por lo que es propenso al fallo (17%).

Además, en la Figura 46 b. se puede observar la similitud en la distribución de roturas entre primer y segundo tramo de acometida, para cada material.

**FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ROTURAS EN LA MUESTRA DE ACOMETIDAS, SEGÚN EL MATERIAL**



a. Distribución porcentual de roturas en la muestra de acometidas, según el material



b. Distribución porcentual de roturas en la muestra de acometidas, según tramo y material

Del análisis previo se deduce que, al haber materiales con mayor presencia en la red que otros, es lógico que su número de roturas registradas sea mayor. Por ello, se caracterizó el comportamiento de los principales materiales presentes en la red con el fin de conocer la frecuencia de roturas, relacionando éstas con los kilómetros registrados de cada material en tubería general<sup>5</sup>. Los ratios de roturas por kilómetro calculados se recogen en la Tabla 7.

**TABLA 7. ÍNDICES DE ROTURAS POR KILÓMETRO INSTALADO, SEGÚN MATERIAL**

MATERIAL	RATIO ROTURAS/KM INSTALADO			
	2010	2011	2011	2012
Fibrocemento	0,82	0,80	0,71	0,72
Fundición dúctil	0,04	0,03	0,03	0,02
Fundición gris	0,69	0,55	0,55	0,52

Del análisis de los ratios se concluyó que:

- La **fundición dúctil** presenta el menor índice de rotura, por lo que se puede constatar el buen comportamiento de este material. Además, se observa que anualmente se mantiene el número de roturas, aumentando la longitud instalada de este material.
- El **fibrocemento** y la **fundición gris**, presentan ratios muy superiores a pesar de que han denotado una reducción paulatina de sus roturas en los últimos años, posiblemente porque son materiales más antiguos que van siendo sustituidos.

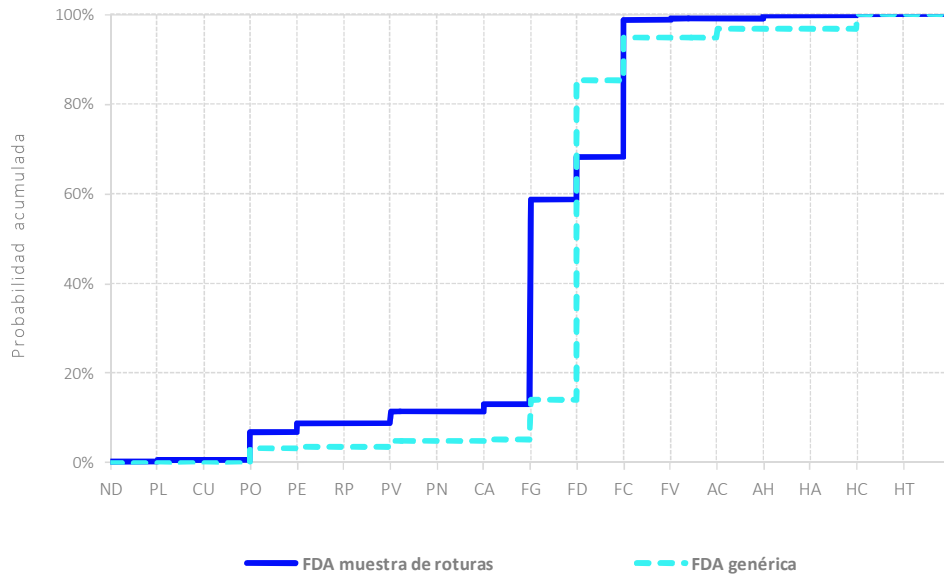
Asimismo, se analizó la probabilidad acumulada mediante las FDA genérica y condicionada para tubería general y acometida (Figura 47).

En resumen, del análisis de los datos se observa que en la muestra de roturas de tubería general, el mayor aumento en la probabilidad acumulada se corresponde con el material de fundición gris. También es relevante el número de fallos en tuberías de fibrocemento (del orden del 30%). Se trata de dos materiales que están siendo sustituidos por otro tipo de material, principalmente por fundición dúctil, con menores índices de rotura (0,02 roturas/km), que ya constituye un gran porcentaje de la tubería general instalada (como se observa en la Figura 47 a. la probabilidad acumulada de la FDA genérica para el material de fundición dúctil es de más del 70%).

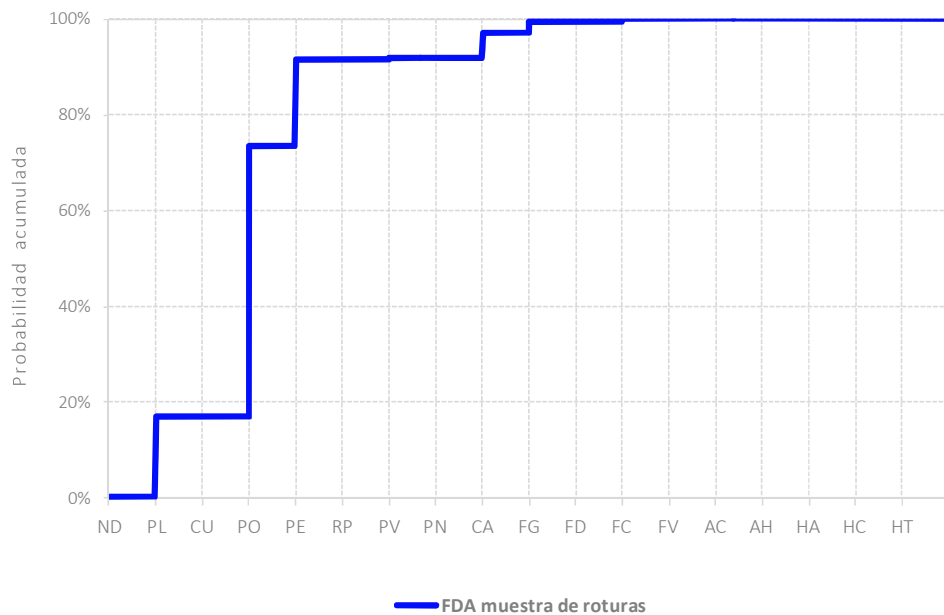
En la Figura 47 b. se observa que, en el caso de las acometidas, el material que da lugar a un ascenso mayor en la probabilidad acumulada (más del 50%) es el polietileno, que fue instalado cumpliendo normativas anteriores a la vigente en Canal de Isabel II, y que está en proceso de sustitución. La información sobre el tipo de material de las acometidas en servicio es insuficiente como para mostrar gráficamente la FDA genérica del material.

<sup>5</sup> En el momento de realización del estudio, no se disponía de datos suficientemente fiables para la obtención de índices de rotura, según material en acometidas. Además, el resto de materiales tienen menor presencia en la red, algunos incluso con menos de 50 km de red instalados, lo que altera los índices mostrando grandes fluctuaciones.

FIGURA 47. FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA, SEGÚN MATERIAL



a. FDA genérica y de la muestra, según material, para tubería general



b. FDA genérica y de la muestra, según material, para acometida

ND	No definido	FG	Fundición gris
PL	Plomo	FD	Fundición dúctil
CU	Cobre	FC	Fibrocemento
PO	Polietileno normativa anterior a la vigente	FV	Fibra vidrio
PE	Polietileno de normativa vigente	AC	Acero
RP	Rehabilitado polietileno	AH	Acero helicosoldado
PV	PVC de normativas anteriores a la vigente	HA	Hormigón armado
PN	PVC de normativa vigente	HC	Hormigón armado con camisa de chapa
CA	Caña	HT	Hormigón pretensado con camisa de chapa

Por último, se compararon, según materiales, las roturas producidas en los 20 y 90 días anteriores en un radio inferior a los 2 km. Se observó distinto comportamiento entre los materiales propios de tubería general (fundición dúctil, fibrocemento y fundición gris) y los de acometidas (PO-PE-Plomo). En éstos últimos, y especialmente en el polietileno dentro de norma (PE), no parece que hubiera relación significativa con las roturas próximas.

## 6.2. DISTRIBUCIÓN DE LAS ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA

La muestra analizada de roturas en conjuntos de medida está constituida por 509 registros. Dadas sus características particulares se realizó su estudio independientemente al de tuberías y acometidas. A continuación se exponen los resultados obtenidos del análisis en relación a la edad, diámetro y tipo de instalación y alojamiento de los conjuntos de medida identificando su función de distribución.

### 6.2.1. Según la edad

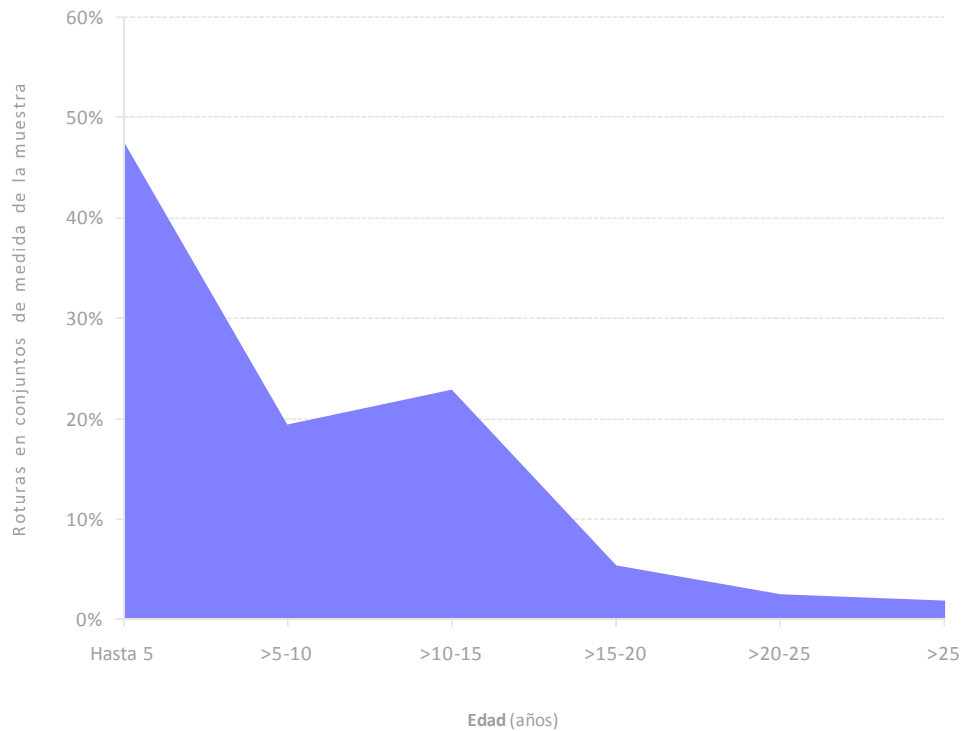
Al igual que en acometidas y tuberías, cabe esperar que la edad sea una variable de influencia en la vida útil de los conjuntos de medida. Como se comentó en el capítulo 5, “Caracterización de la muestra estudiada”, los conjuntos están constituidos por varios elementos, por lo que la edad de cada uno de los elementos puede repercutir en la consecución del fallo.

En este apartado se han estudiado las curvas que relacionan la edad de los contadores y el número de fallos, para aquellos registros de edad conocida, tanto para la muestra, como para el parque de contadores de Canal de Isabel II sustituidos en 2010 y 2011 por fallo mecánico. A falta de datos más precisos se ha estudiado la edad a partir del conocimiento del año de fabricación del contador, disponible para el 62% de la muestra de los conjuntos de medida.

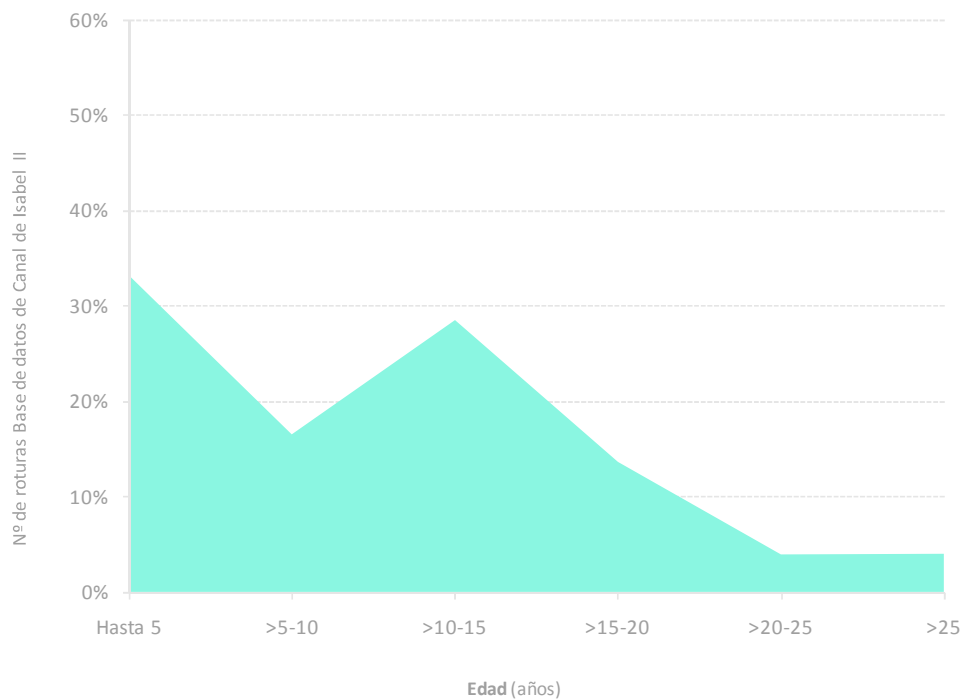
Analizando las roturas de edad conocida (Figura 48 *a.* y *b.*) tanto de la muestra, como de aquellas registradas en las bases de datos de Canal de Isabel II, se puede observar que las curvas de fallo son decrecientes con la edad, con un repunte hacia los 15 años de prestación del servicio. La mayor probabilidad de roturas se produce los primeros 5 años de antigüedad, esto puede explicarse debido a que, al igual que en tuberías y acometidas, hay un valor significativo en el inicio de la vida útil, como consecuencia de deficiencias en la instalación que derivan en un fallo mecánico, el cual comprende fugas y averías en las manillas y rodillos.



**FIGURA 48. FUNCIÓN DE FALLO EN CONTADORES DE CONJUNTOS DE MEDIDA DE EDAD CONOCIDA**



a. *Función de fallo en contadores de Conjuntos de medida de edad conocida de la muestra*

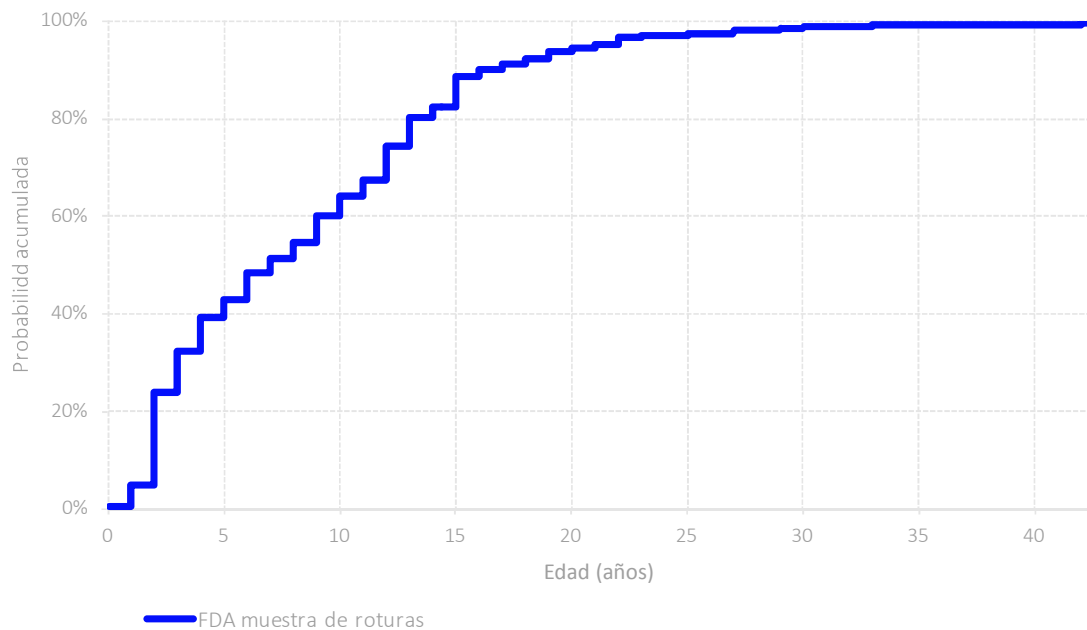


b. *Función de fallo en contadores de Conjuntos de medida de edad conocida, registrados en las Bases de datos de Canal de Isabel II (2010 – 2011)*

Para confirmar los resultados se ha representado, a su vez, la función de distribución acumulada (Figura 49) de la muestra, y de los fallos mecánicos registrados en contadores en los años 2010 y 2011, coincidiendo con el inicio del periodo del registro de roturas de la muestra.

En la FDA de roturas de la muestra se diferencia dos pendientes en la curva, con un punto de inflexión hacia los 15 años de edad. Se puede observar que, para esta edad, la probabilidad acumulada supera los 0,5 puntos (80% del total de conjuntos de medida de edad conocida). Como se comentó anteriormente, no se dispone de información fiable cuando el año de instalación de los contadores supera los 25 años. Además, se tiene constancia de que más del 25% de la muestra de edad conocida ha sido instalada en los 5 años previos a la realización de este estudio. Junto con los gráficos anteriores, se puede confirmar que en los primeros años de vida útil la tasa de fallo asciende a un ritmo superior que en años posteriores.

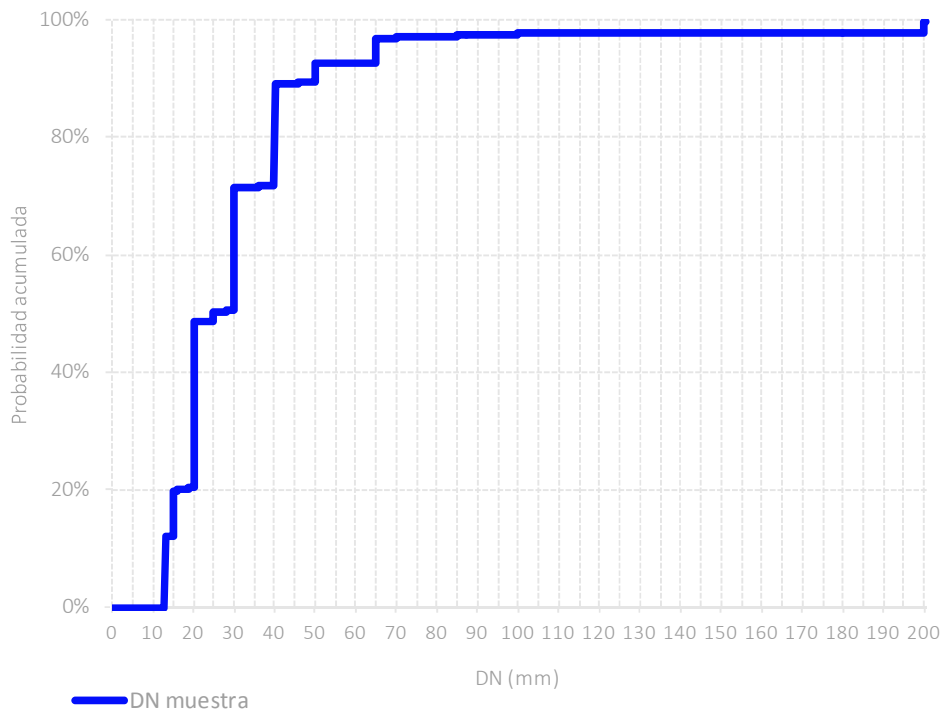
**FIGURA 49. FDA DE LA EDAD DE LOS CONTADORES DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**



### 6.2.2. Según el diámetro

En segundo lugar, se realizó un análisis de la distribución de roturas según diámetro nominal del contador del conjunto de medida (Figura 50).

**FIGURA 50. FDA DEL DIÁMETRO NOMINAL DE LOS CONTADORES DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**

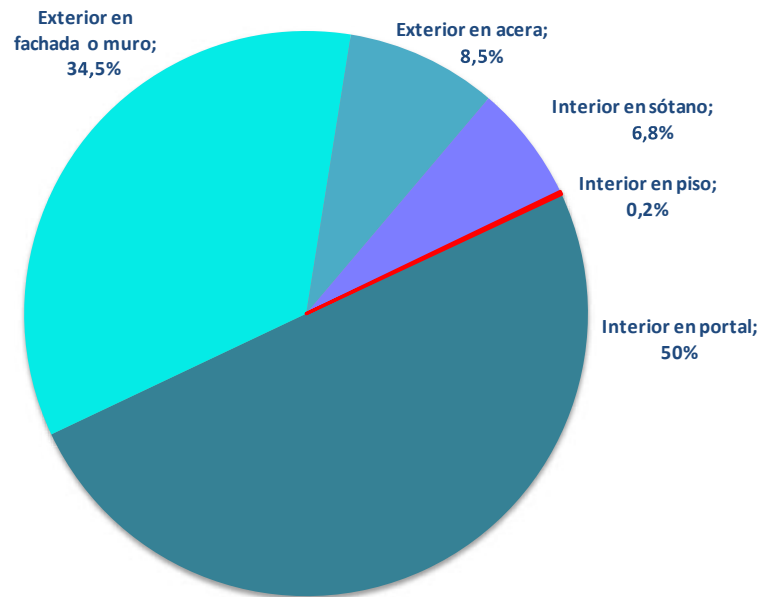


### 6.2.3. Según el tipo de instalación y alojamiento

Para completar el estudio se analizaron parámetros relacionados con la instalación y de influencia en la consecución de las 509 roturas registradas en conjuntos de medida: la ubicación, el alojamiento y el montaje de los registros muestreados.

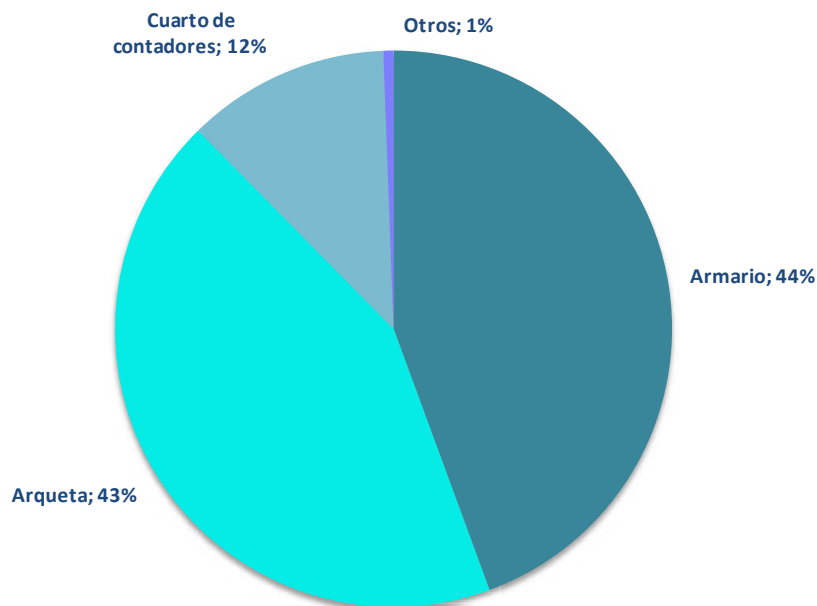
En primer lugar, en la Figura 51 se representa la distribución porcentual de la muestra en relación a la ubicación del conjunto de medida. Mayoritariamente se registraron roturas interiores, especialmente las producidas en portales, que constituyen el 50% de las roturas. En segundo lugar, destacan los fallos ubicados en el exterior en fachada o muros (34,5%).

**FIGURA 51. DISTRIBUCIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**

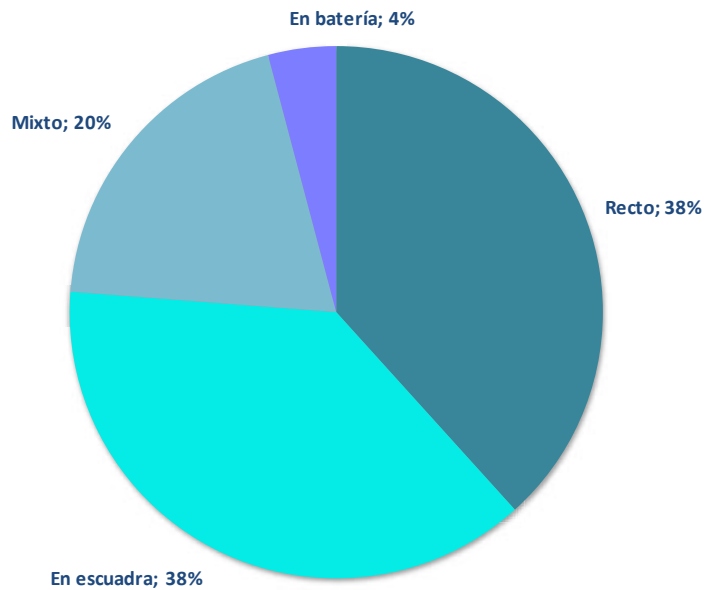


Del estudio del alojamiento (Figura 52) se observó que la proporción de fallos registrados en armarios y arquetas es similar, y juntos constituyen el grueso de la muestra. Lo mismo ocurre al analizar el montaje (Figura 53), la proporción de roturas en montajes en escuadra y rectos es idéntica y ambos suponen más del 75% de los registros.

**FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN DEL ALOJAMIENTO DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**

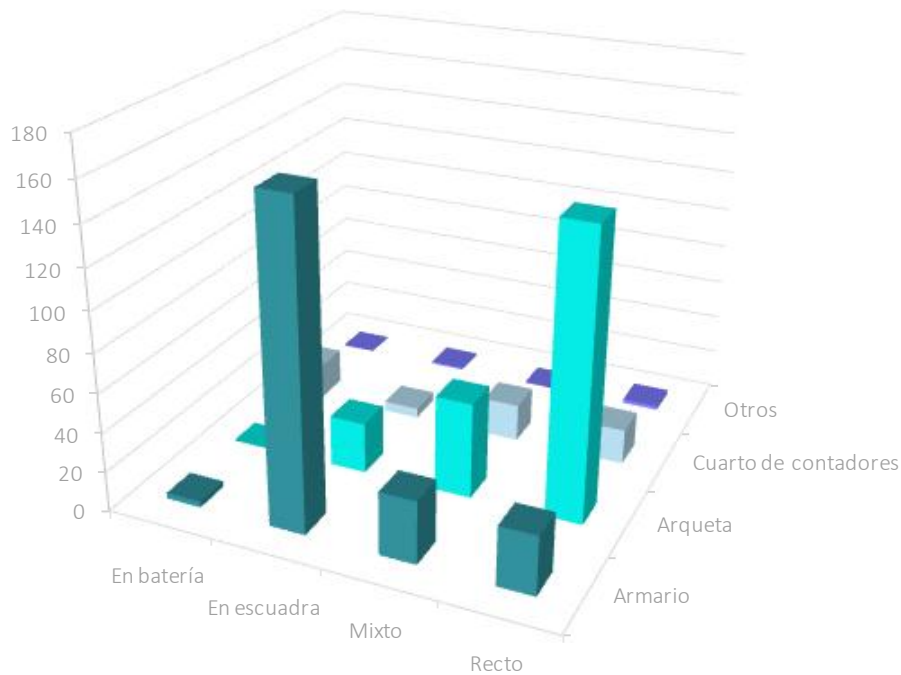


**FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN DEL MONTAJE DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**



En resumen, del análisis de los datos (Figura 54), en primer lugar se observó que mayoritariamente se produjeron roturas montadas en escuadra y alojadas en armarios; y en segundo lugar, roturas con montaje recto y alojadas en arquetas.

**FIGURA 54. RELACIÓN DE LOS FALLOS SEGÚN ALOJAMIENTO Y EL MONTAJE DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA**



### 6.3. TIPIFICACIÓN DE LAS ROTURAS

Durante la inspección y toma de datos en campo, se recopiló información referente a la causa aparente de fallo, a la localización y al modo de fallo; variables que responden a dónde, cómo, y por qué se produce la rotura. Con el objeto de responder a estas tres preguntas básicas, se describen a continuación los criterios seguidos para tipificar las causas aparentes de fallo consideradas en tuberías, acometidas y conjuntos de medida del estudio, así como la localización del fallo y la tipología del mismo, según su forma y grado de afección del elemento.

#### 6.3.1. Causas aparentes de fallo

La presencia o no de ciertas patologías (ovalación, incrustaciones, etc.) son muestra del estado general de una tubería inspeccionada. Dicho estado está relacionado con la causa de fallo, aunque no debe confundirse con la causa en sí misma de la rotura; el fallo de una tubería se entiende como la sucesión de un compendio de estados de servicio, en el que finalmente, una causa desencadena la rotura de la tubería.

En este apartado se define la causa principal de fallo, es decir, la que más probabilidad tiene por haber sido más influyente que otras, en la ocurrencia de una rotura. Se detalla a continuación el análisis realizado de la casuística detectada, tipificando las causas aparentes de fallo y mostrando los resultados obtenidos para esta tipificación.

Las roturas en tramos de tubería y acometida presentaron una casuística común en la mayor parte de los casos. Sin embargo, el fallo en los conjuntos de medida ha requerido un estudio independiente de las causas de fallo como consecuencia de sus condiciones particulares de localización e instalación.

#### Tipificación de las causas para tuberías y acometidas

Las causas más probables de roturas para tuberías y acometidas se agruparon en cinco categorías, (Tabla 8) diferenciando entre aquellas debidas a agentes externos, intrínsecas al material de la tubería, y las ocasionadas por las condiciones de la instalación o por la operación de la red. La casuística particular, y menos frecuente, que no se ha podido incluir en estas categorías, se incorporó a un quinto grupo de otras causas.

Sobre la base de las roturas registradas, se describe seguidamente la tipificación de cada una de las causas de fallo en tuberías y acometidas consideradas en el estudio, así como los criterios tenidos en cuenta para asignar una, u otra causa, a la rotura del elemento.

**TABLA 8. CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS**

AGRUPACIÓN	NÚMERO	CAUSAS DE FALLO
💧 Agentes externos a la tubería	1	Presencia de raíces
	2	Provocadas
	3	Heladas o condiciones climáticas extremas
	4	Sobrecargas externas
💧 Características intrínsecas del material	5	Procesos de corrosión
	6	Defectos de material
💧 Condiciones de instalación	7	Asentamientos del terreno
	8	Defectos de instalación
💧 Operación de la red	9	Variaciones de presión o maniobras
	10	Vibraciones o esfuerzos continuados (fatiga)
💧 Otras causas	11	Otros (incendios, roedores, etc.)
	12	Desconocido

#### 💧 AGENTES EXTERNOS A LA TUBERÍA

**Presencia de raíces.** Se consideró esta causa de fallo en aquellas roturas derivadas de los daños producidos por las raíces de las plantas sobre las tuberías, con especial atención en tuberías de fundición, fibrocemento y polietileno, por ser estos los materiales mayoritarios en la red actual de Canal de Isabel II (Figura 55). En función del grado de incidencia de las raíces sobre las tuberías se diferenciaron tres grupos:

- a) **Grandes raíces** que en su proceso de crecimiento ejercieron cargas sobre las tuberías, en cualquier dirección, provocando el fallo del material de las mismas. Las raíces en paredes de tubo de materiales rígidos, como el fibrocemento y la fundición gris, se vieron sometidas en ocasiones a grandes esfuerzos que provocaron el fallo.
- b) **Pequeñas raíces** que, en su proceso de crecimiento, penetraron en las juntas de las uniones de bridas o manguitos plásticos entre tubos generando fuerzas capaces de romperlas. A veces no producen daños a las piezas, sino fugas a través de las juntas, que se van convirtiendo en averías por el desgaste ejercido en la fuga del agua a presión.
- c) **Raíces** que envolvían las tuberías para obtener el agua de condensación que sobre éstas se deposita, aumentando la velocidad de corrosión de las tuberías de fundición, caña, etc. En los tubos de fibrocemento pueden llegar a degradar la superficie hasta convertirlo en algo terroso.



**FIGURA 55. CAUSA DE ROTURA POR PRESENCIA DE RAÍCES**



*Raíces que provocaron fugas al penetrar en las juntas y uniones*



*Presencia de grandes raíces que provocaron una fisura en tubería de fibrocemento*

**Provocadas.** Aquellas que mayoritariamente se produjeron por máquinas y útiles de excavación, durante los procesos de ejecución de nuevas obras o reparación de averías, se consideraron causas de fallo provocadas (Figura 56).

Durante la reparación de averías, las roturas más frecuentes se produjeron en el proceso de corte y separación de la parte del tubo a sustituir por el uso de martillos neumáticos y en la compactación del relleno posterior a la reparación de las tuberías, la rotura ha ocurrido en ocasiones en tramos que se descubrieron pero no se sustituyeron.

También se incluyen en este grupo las averías provocadas en tuberías ubicadas dentro de edificaciones. En ocasiones se pueden producir por vehículos que impactan en las fachadas y muros exteriores donde se encuentran alojados.

**FIGURA 56. ROTURAS PROVOCADAS**



*Rotura provocada por retroexcavadora en tubería de fibrocemento*



*Rotura provocada durante la ejecución de una hinca para alcantarillado en tubería de fundición dúctil*

**Heladas o condiciones climáticas extremas.** La temperatura es un factor a considerar en los fallos en tuberías. Las heladas y las bajas temperaturas se asociaron a un aumento de las roturas en tuberías de pequeño diámetro correspondientes a acometidas situadas a menor profundidad, principalmente, en municipios del norte de Madrid.

**Sobrecargas externas.** Este tipo de roturas se relacionó con sobrecargas generadas por la presencia de árboles de cierta envergadura, tráfico pesado en una zona industrial, presencia de maquinaria de obra o equipamiento público, entre otros. Aparecieron, por lo general, debajo o cercanas al objeto que producía la sobrecarga (Figura 57).

**FIGURA 57. ROTURAS POR SOBRECARGA EXTERNA**



*La carga del muro creó una fisura circunferencial en la tubería de fibrocemento situada debajo*



*El muro provocó una fisura circunferencial en la tubería de fundición gris*

#### **CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL MATERIAL**

**Proceso de corrosión.** Los procesos de corrosión, tanto interna como externa, se manifiestan en los materiales de las tuberías que contienen hierro. En algunos casos, las concreciones de hierro crecieron, disminuyendo la sección de la tubería y provocando discontinuidades en el flujo, entre otros efectos. Los agujeros producidos en tubos de fundición dúctil o de acero, se clasificaron como causa de fallo por corrosión interna, o externa, en función del diámetro del agujero, correspondiendo al de mayor diámetro el sitio por donde se inició la corrosión. Se definió causa de fallo **corrosión interna** cuando el adelgazamiento de la pared del tubo se producía desde el interior, y **corrosión externa** cuando el adelgazamiento era desde el exterior. En ambos casos se produjo la pérdida sucesiva de capas de óxidos marrones, hasta que se formaron los agujeros o zonas debilitadas donde surgieron las fisuras (Figura 58).

**FIGURA 58. ROTURAS POR CORROSIÓN**



*Tubo de fundición con múltiples incrustaciones*



*Agujero de corrosión externa en una tubería de fundición gris; se observa la reducción del espesor del metal original en los bordes de la fisura*

La aparición de óxidos en la parte interior se ha dado en tuberías de fundición gris que no presentaban recubrimiento interno de mortero de cemento, y en tubos de fundición dúctil cuando se había producido la pérdida parcial del mismo. En tubos de acero la corrosión interna se relacionó con defectos de pintura interior, fundamentalmente en los tramos de unión soldados a pie de obra.

No obstante, también se observó corrosión en tuberías plásticas. La corrosión no es un proceso exclusivo de los metales; aunque los procesos químicos asociados son diferentes, las tuberías de polietileno y PVC también presentaron signos de corrosión interna y externa. Según Parra (2013), en los fenómenos corrosivos sobre tuberías plásticas se produce la adsorción de especies activas que se encuentran en el ambiente, produciendo reacciones con las cadenas de polímeros. A diferencia de los metales, la corrosión plástica es un proceso interno, que en condiciones oxidantes genera una pérdida de la plasticidad del material, haciéndolo susceptible a una falla súbita por la fragilidad adquirida.

Las piezas de fundición alteradas por el fenómeno de la corrosión y que sirven de unión con tubos o piezas de otros materiales solían presentar daños en las gomas de las juntas bridadas. También sufrieron las uniones emplomadas en las tuberías de fundición gris y los manguitos plásticos de tubos de polietileno unidos a tuberías de caña o fundición, pues la degradación del material producía deposiciones en las juntas.

Por otra parte, el terreno juega un papel importante en esta causa. En ocasiones el relleno de las zanjas se hace con escombros, lo cual puede agravar el problema de corrosión, ya que estos materiales pueden contener una alta concentración de sulfatos, sobre todo si provienen de derribos. Los fenómenos de corrosión externa se intensifican con la presencia de sulfatos y otros componentes de carácter ácido en el terreno cercano a las tuberías o en las aguas freáticas y de infiltración, así como con la presencia de corrientes vagabundas inducidas. Estas corrientes pueden generarse desde conductores de media o alta tensión soterrados cerca de las tuberías o por los aterramientos de las vías de ferrocarril eléctrico. Como se ha indicado en el apartado de ensayos, otros factores que afectan a la velocidad de corrosión de las tuberías enterradas son la porosidad del terreno, la salinidad, la humedad, la resistividad, el contenido en materia orgánica y el pH.

Ocasionalmente, en las tuberías de fundición gris, junto a la capa de óxido marrón, se ha detectado una capa de óxido negro, difícilmente apreciable en campo, sin que ocurra un aumento importante de volumen, que no cambia la apariencia exterior del tubo pero que tiene un comportamiento frágil ante los golpes, cargas y presiones. Esto se debe a que en suelos muy agresivos, la fundición sufre una corrosión apreciable tanto de tipo corriente, como de grafitización. En esta última corrosión selectiva, la fundición sufre una transformación, dejando en las zonas afectadas un material sin resistencia mecánica (Figura 59).



**FIGURA 59. PRESENCIA DE ÓXIDO NEGRO EN TUBERÍAS DE FUNDICIÓN GRIS**



**Defecto de material.** Se incluyeron en esta causa aquellas roturas donde el tubo presentó un estado general satisfactorio, excepto en un pequeño sector; así como comportamientos diferentes de las características tecnológicas y/o mecánicas a las comunes de cada material, como son la ductilidad, la soldabilidad, la resistencia, la dureza, la plasticidad y la fragilidad entre otras.

En algunos tubos de fundición gris se observaron oquedades producidas por gases y escorias; en otros casos defectos de moldeo, tales como reducción del espesor en parte del tubo no corroído, y en la cara opuesta un aumento con relación a su espesor medio. En ocasiones esta causa se asoció a elementos de edad avanzada (Figura 60).

**FIGURA 60. ROTURAS EN TUBERÍA PLOMO Y FUNDICIÓN GRIS**



*Rajadura de 10 cm en tubería de plomo por edad avanzada*

*Rotura explosiva en tubería de fundición gris que presentó oquedades y otros defectos de fundición*

## CONDICIONES DE INSTALACIÓN

**Asentamientos del terreno.** Esta causa de fallo hace referencia, principalmente, a asentamientos diferenciales de las capas sobre las que se apoya la tubería, probablemente debidos a la mala calidad de los rellenos y camas. Este tipo de averías se ha producido con más frecuencia en espacios naturales y zonas ajardinadas, pues el lecho ejecutado bajo la tubería está constituido por materiales de diferentes características mecánicas. En calles y aceras influye, además, la existencia, o no, de una capa de hormigón inferior a la asfáltica, la compactación del relleno sobre la tubería y la existencia de otros servicios soterrados que modifican las condiciones originales de la cama y el relleno.

Hay que aclarar que no se observaron grandes fenómenos de asentamientos del terreno adyacente. Las roturas por asentamientos estuvieron más relacionadas con la presencia de huecos fruto de una posible mala compactación. Se observó que los casos de fallo por asentamientos del terreno aumentaban con la presencia de árboles cercanos, pudiendo haber también relación entre ambos hechos.

En redes antiguas, los nuevos elementos de corte y medida se alojan en arquetas y es frecuente que la tubería quede embutida directamente en el hormigón de las paredes de ésta. Se observó algún caso de asentamiento diferente entre la tubería y la arqueta, sobre todo, en terrenos poco consistentes. Los materiales más propensos a estos tipos de fallos han sido la fundición gris, fundición dúctil y fibrocemento, registrándose fallos cercanos a las paredes de arquetas o a los macizos de anclaje (Figura 61).

**FIGURA 61. ROTURAS EN TUBERÍAS DE FUNDICIÓN GRIS**



*Avería en fundición gris.  
El tubo atravesaba parte de la pared de la arqueta.*

*Fisura longitudinal en tubo de fundición gris en  
proximidad de una arqueta*



**Defecto de la instalación.** Se asignó esta causa de fallo a aquellas roturas producidas por la inadecuada puesta en obra de la tubería, por ejemplo por los defectos de alineación o la presencia de escombros, así como por las características de la zanja, como puede ser que el material de relleno no fuera el más apropiado. Comprende los defectos geométricos generados en la instalación de tubos, y de otros componentes por exceder el ángulo de inflexión normalizado, debido a la falta de montaje de codos de pequeño ángulo o a la colocación de codos de ángulo inadecuado, así como los defectos producidos por la ausencia de macizos de anclajes y por una incorrecta manipulación de las tuberías de polietileno en reparaciones, que en ocasiones, pueden provocar un estrangulamiento defectuoso de la tubería, generando puntos débiles en el material que a la larga se convierten en roturas (Figura 62).

Esta causa de fallo es también recurrente en el montaje de componentes de piezas especiales debido a deficiencias durante su puesta en obra, por no corresponderse con los protocolos y buenas prácticas adquiridos en la actualidad, y por falta de recursos durante la instalación.

**FIGURA 62. EVIDENCIAS DE ROTURAS POR DEFECTO DE INSTALACIÓN**



*Partículas en la zona de electrofusión*

*Rotura en la que el tubo no fue introducido en el acceso hasta la profundidad indicada por el fabricante*

## OPERACIÓN DE LA RED

**Variaciones de presión o maniobras.** Los aumentos de presión en la tubería, ya sean situaciones propias de la variabilidad de la demanda, o derivadas de la manipulación de válvulas y otros elementos, pueden provocar averías cercanas en el mismo polígono o en los alrededores, presumiblemente al unísono, aunque se detecten con desfases de tiempo. En la mayoría de los casos, el estado de los puntos donde se producen roturas por esta causa no es el óptimo, aunque también se pueden dar estas averías en tuberías aparentemente en buen estado, debiéndose el fallo a altas presiones (golpes de ariete u otras causas).

Por ello, se estudió la información disponible en la empresa sobre los registros de maniobras y presiones próximas al lugar de la rotura. Así se analizó la correspondencia en el tiempo con algún evento de este tipo y se consideró que el fallo se podía deber a este tipo de causa cuando se tuvo constancia de manipulaciones de válvulas en procesos de reparación de averías, en el que surgieron nuevas averías al restablecer el servicio de agua, o que presumiblemente ocurrieron en ese momento, aunque se detectasen horas o días después (Figura 63).

**Variaciones o esfuerzos continuados (Fatiga).** Este tipo de causa de fallo se observa en tuberías con materiales sometidos en el tiempo a esfuerzos con signo alternativo, a vibraciones, etc. También es habitual en tuberías no soterradas con cambios bruscos de dirección (codos) y sección y en las partes más debilitadas de las piezas, como en las aristas interiores de las roscas. Se identificó con superficies de roturas pulidas y brillantes, generalmente debido a los fenómenos de vibraciones o esfuerzos continuados que producen el desgaste del material. No hay que confundir la superficie pulida que se produce en la sección de las grietas con el desgaste ocasional por el agua al fugarse en la etapa inicial en que se origina la fisura de casi todos los materiales.

**FIGURA 63. ROTURAS POR MANIOBRAS O VARIACIONES DE PRESIÓN**



*Tubería de fibrocemento con fallo longitudinal*



*Tubería de fundición gris con fallo longitudinal*

**Variaciones o esfuerzos continuados (Fatiga).** Este tipo de causa de fallo se observa en tuberías con materiales sometidos en el tiempo a esfuerzos con signo alternativo, a vibraciones, etc. También es habitual en tuberías no soterradas con cambios bruscos de dirección (codos) y sección y en las partes más debilitadas de las piezas, como en las aristas interiores de las roscas. Se identificó con superficies de roturas pulidas y brillantes, generalmente debido a los fenómenos de vibraciones o esfuerzos continuados que producen el desgaste del material. No hay que confundir la superficie pulida que se produce en la sección de las grietas con el desgaste ocasional por el agua al fugarse en la etapa inicial en que se origina la fisura de casi todos los materiales.





## OTRAS CAUSAS

**Otros.** Se consideró esta categoría en aquellas roturas cuyas causas de fallo no se corresponden con ninguna de las anteriormente descritas, y que se dieron con muy poca frecuencia. Entre ellas destacan las fisuras provocadas por roedores en acometidas de polietileno, y el deterioro por incendio (Figura 64).

**Desconocido.** Se consideran causas de fallo desconocidas aquellas que no cumplen con ninguna de las anteriormente descritas.

**FIGURA 64. ROTURAS POR OTRAS CAUSAS**



*Polietileno deteriorado por mordeduras de ratas*

*Tubería de polietileno no soterradas, dañadas por un incendio*

### Valoración de las causas para tuberías y acometidas

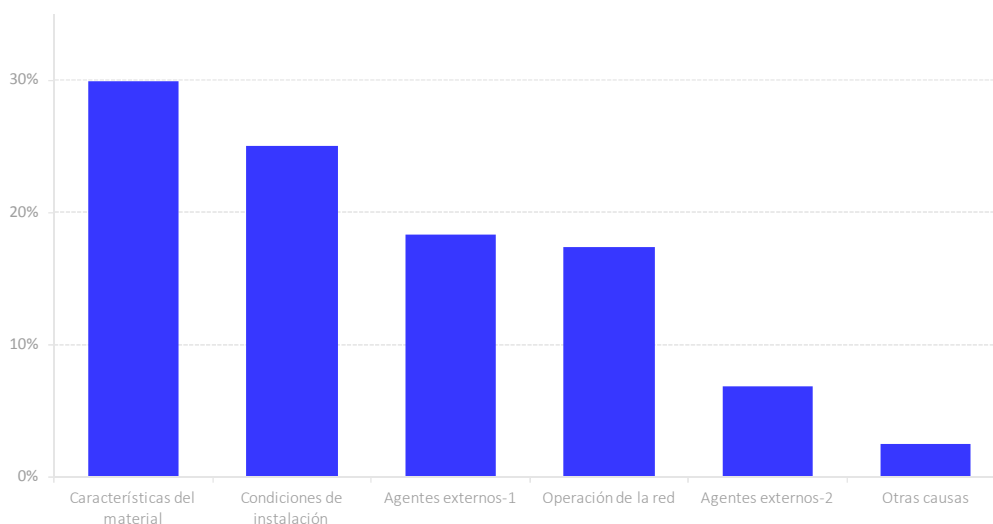
Se presentan en la Tabla 9 los resultados de las causas de roturas, en función de los grupos considerados, tanto en tubería general como en acometida, del caso de estudio. En ambos casos, la causa de fallo asociada a las características intrínsecas del material es la que ha registrado mayores fallos.

**TABLA 9. RESUMEN DE LA CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS CAUSAS DE FALLO**

<i>Causa Fallo Gabinete</i>	<i>Tubería General</i>	<i>Acometidas</i>
<b>Agentes externos a la tubería</b> (Raíces, heladas y sobrecargas externas)	18%	16%
<b>Características intrínsecas del material</b> (Corrosión y defectos de material)	30%	56%
<b>Condiciones de instalación</b> (Asentamientos del terreno y defectos de instalación)	25%	15%
<b>Operación de la red</b> (Variaciones de presión/maniobras y fatiga)	17%	5%
<b>Agentes externos a la tubería</b> (Provocadas)	7%	7%
<b>Otras causas</b>	3%	1%

En el caso de **tubería general**, las causas mayoritarias de la muestra de roturas fueron las características intrínsecas del material (30%) y las condiciones de instalación (25%). Figuran seguidas de las roturas cuyas causas de fallo fueron debidas a agentes externos (18%), operación de la red (17%) y roturas provocadas (7%), (Figura 65).

**FIGURA 65. CAUSA DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL**

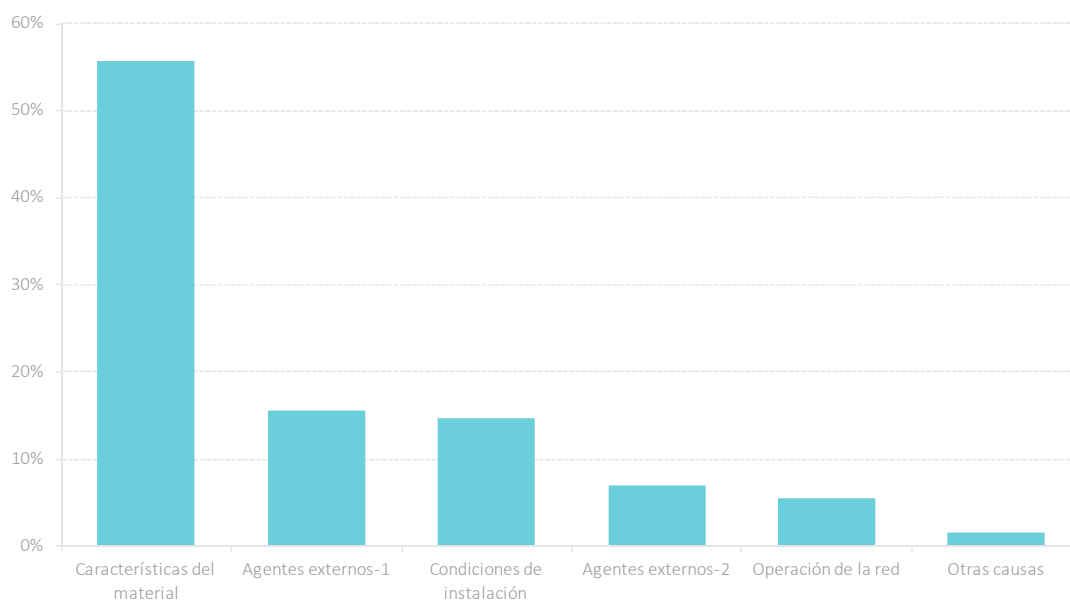


*Características del material:* Corrosión y defecto de material  
*Condiciones de instalación:* Asentamientos del terreno y defectos de instalación  
*Agentes externos-1:* Raíces, heladas y sobrecargas externas  
*Operación de la red:* Variaciones de presión/maniobras y fatiga  
*Agentes externos-2:* Provocadas  
*Otras causas*

En el caso de las **acometidas**, el porcentaje de fallos debido a las características del material aumentó respecto al caso de tubería general, llegando al 56%. En cambio, las roturas ocasionadas por las condiciones de la instalación disminuyeron hasta el 15%. Las roturas provocadas en porcentaje se mantuvieron respecto a las de tubería general, y la causa de fallo menos significativa fue la operación de la red (Figura 66).

Además, se ha confirmado que la distribución de las causas de fallo es prácticamente homogénea para el primer y el segundo tramo de acometida, lo que justifica que los análisis posteriores se realicen de forma unificada para el conjunto de la muestra de acometidas.

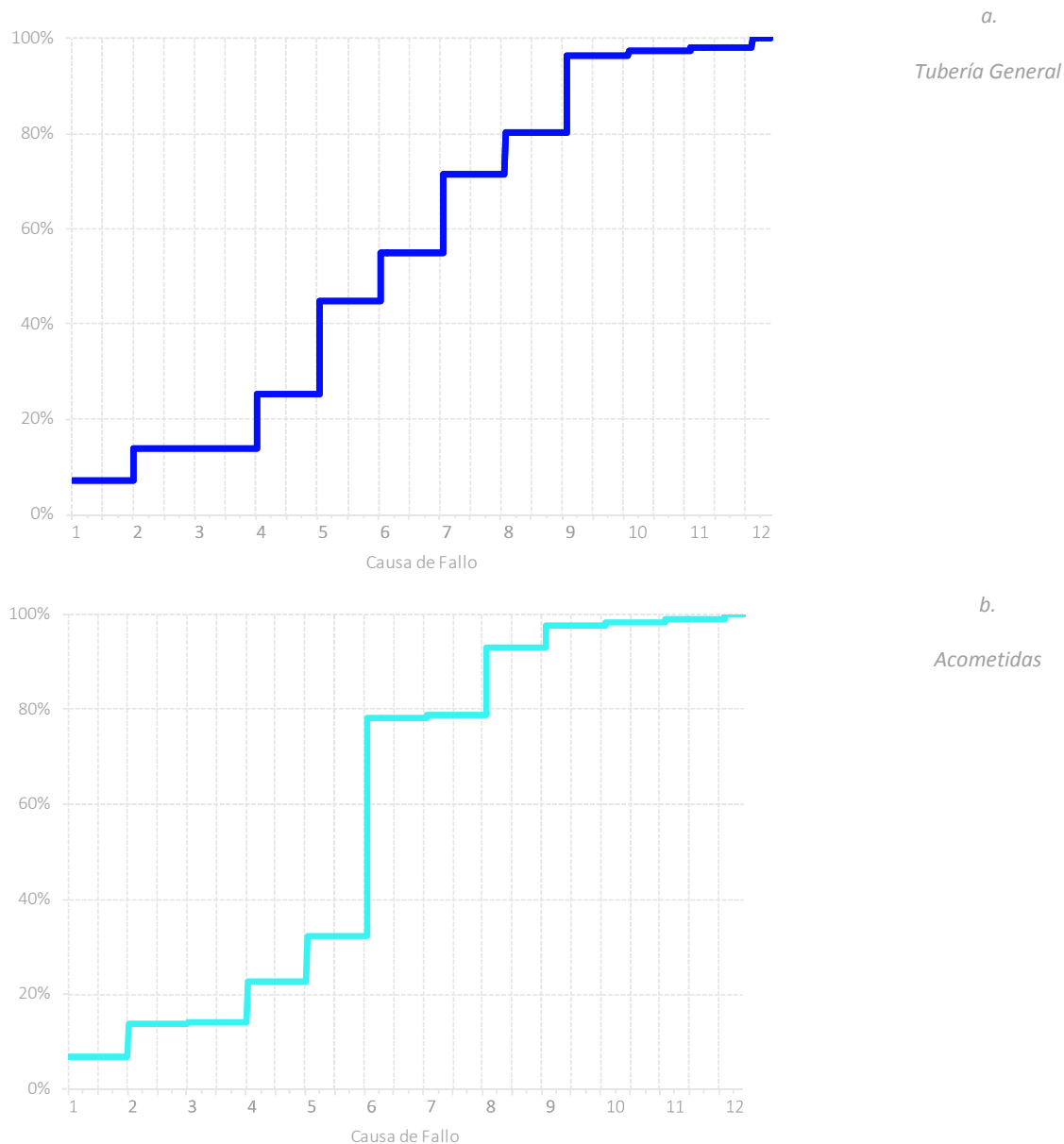
**FIGURA 66. CAUSA DE FALLO EN ACOMETIDAS**



<i>Características del material:</i>	<i>Corrosión y defecto de material</i>
<i>Condiciones de instalación:</i>	<i>Asentamientos del terreno y defectos de instalación</i>
<i>Agentes externos-1:</i>	<i>Raíces, heladas y sobrecargas externas</i>
<i>Operación de la red:</i>	<i>Variaciones de presión/maniobras y fatiga</i>
<i>Agentes externos-2:</i>	<i>Provocadas</i>
<i>Otras causas</i>	

La Figura 67 resume gráficamente las causas de fallo, desagrupadas según la Tabla 8, para tubería general y acometidas.

FIGURA 67. PROBABILIDAD ACUMULADA SEGÚN LAS CAUSAS DE FALLO



Agrupación	Causas de fallo	
	Nº Referencia	
Agentes externos a la tubería	1	Presencia de raíces
	2	Provocadas
	3	Heladas o condiciones climáticas extremas
	4	Sobrecargas externas
Características intrínsecas del material	5	Procesos de corrosión
	6	Defectos de material
Condiciones de instalación	7	Asentamientos del terreno
	8	Defectos de instalación
Operación de la red	9	Variaciones de presión o maniobras
	10	Vibraciones o esfuerzos continuados (fatiga)
Otras causas	11	Otros (incendios, roedores, etc.)
	12	Desconocido

En **tubería general** la mayor probabilidad de ocurrencia es debida a la corrosión (20%), seguida de asentamientos del terreno (16%) y variaciones de presión o maniobras (16%). Le siguen las sobrecargas externas (11%) y los defectos de material (10%).

En cuanto a las **acometidas** analizadas, el defecto de material está vinculado a casi la mitad de los casos (46%). A continuación, se encuentran las causas debidas al defecto de instalación (14%) y a los procesos de corrosión (10%).

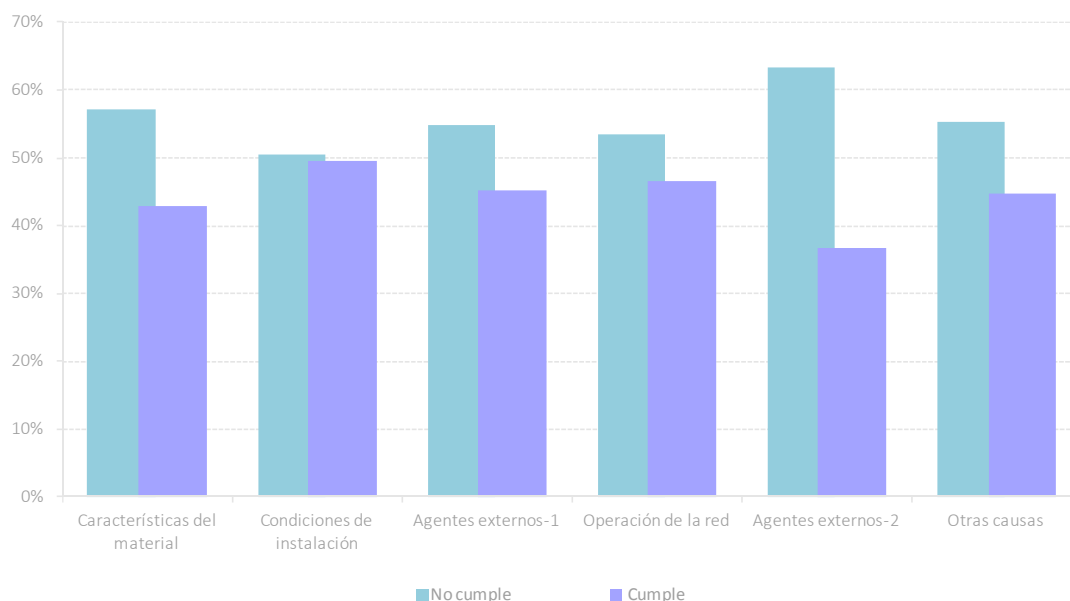
El criterio para la asignación de las causas es complejo. En los casos en los que se estableció la corrosión como causa de fallo se intuía que podía haber estado influido por una variación de la presión, de forma que unido al estado de la tubería desencadenaba el fallo. Las causas de fallo donde parece tener más influencia las roturas próximas en el sector, se relacionaron en campo con: sobrecargas y variación de presiones o maniobras, por lo que se confirmó la causa de fallo en gabinete tras estudiar la agrupación temporal y espacial de las roturas en el sistema.

Por otra parte, dado que las condiciones de la instalación han supuesto un porcentaje significativo de roturas se efectuó un análisis en profundidad de los motivos. De la inspección y toma de datos en campo se observaron relaciones entre las causas de fallo y la instalación de las tuberías, tanto en tubería general, como en acometidas. Algunas de ellas se reflejan en la Figura 68, y son las que siguen:

- El 56% del total de las roturas no cumplían los recubrimientos mínimos en zanja, (59% en acometidas; y un 51% en tubería general).
- En el 63% de los casos de las roturas provocadas por agentes externos no se cumplía el recubrimiento mínimo en zanja.
- Las roturas por condiciones de instalación que no cumplían el recubrimiento mínimo en zanja resultaron ser prácticamente las mismas que las que sí cumplían.
- El 37% de los casos estaban ubicados en zonas de rellenos procedentes de escombros. La mayor parte de los rellenos analizados no cumplían la normativa actual.
- El 21% de los casos disponía, al menos, de una canalización de servicios que no cumplía la distancia mínima en norma (observándose relación entre el cableado eléctrico y la corrosión externa en caña y fundición gris).
- Casi la totalidad de las roturas carecía de banda señalizadora.
- La existencia de arquetas cercanas tiene peso como desencadenante del fallo. Las roturas que se achacaron a esta causa apenas estaban influidas por la edad.

Además se avanzó estudiando tanto para acometida, como para tubería general, la relación entre la distribución de roturas en función del cumplimiento del recubrimiento mínimo en zanja y la presencia del tráfico. Así se pudo confirmar que se producía un incremento de las roturas por sobrecargas de tráfico en aquellos casos en los que se registraba incumplimiento en el recubrimiento.

**FIGURA 68. PORCENTAJES DE ROTURAS RELATIVOS A CADA CAUSA DE FALLO, SEGÚN CUMPLIMIENTO DE RECUBRIMIENTO MÍNIMO EN ZANJA**



*Características del material:* Corrosión y defecto de material

*Condiciones de instalación:* Asentamientos del terreno y defectos de instalación

*Agentes externos-1:* Raíces, heladas y sobrecargas externas

*Operación de la red:* Variaciones de presión/maniobras y fatiga

*Agentes externos-2:* Provocadas

*Otras causas*

De los resultados observados en campo, también se constató que la falta de uniformidad del relleno y cama de la zanja, provocaba que las aristas y puntas de los fragmentos que la componen produzcan fisuras en las tuberías. Esto fue especialmente significativo en tuberías plásticas aunque también se observaron daños en tubos de fibrocemento, por su fragilidad. Incluso en tuberías de fundición, pues la transmisión de tensiones localizadas en un punto puede ocasionar fisuras microscópicas que llegan a provocar agujeros que pueden confundirse con los de corrosión.

Asimismo, el aumento de la causa de fallo asociada a la corrosión con presencia de tráfico pesado, podría explicar por qué en los casos de fundición gris donde se dio esta característica, sus aptitudes mecánicas se vieron resentidas no permitiendo a la tubería resistir las mayores sobrecargas a las que estaba expuesta.

Por otra parte, tras el estudio de las incidencias detectadas en juntas electrosoldables, se comprobó que el 70% de estos fallos se debieron a una mala instalación, y el 90% de estas electrosoldaduras presentaron un raspado nulo o incorrecto (Figura 69).

En general, la mayoría de los fallos por asentamientos del terreno se refieren a asentamientos diferenciales de las capas sobre las que se apoyó la tubería.

**FIGURA 69. INCIDENCIAS EN JUNTAS ELECTROSOLDABLES**



Por último, la incidencia de la operación de la red en las roturas, se analizó a partir de la información de las bases de datos, comprobando la existencia de roturas cercanas a las de la muestra producidas los 20 y 90 días anteriores en un radio inferior a 2 km y en el mismo sector.

De esta forma se podían estudiar las roturas ocasionadas por fatiga, vibraciones o esfuerzos continuados y variaciones de presión derivadas de la manipulación de válvulas y otros elementos que pueden provocar averías cercanas. Así se observó que alrededor del 40% de los casos de fallo presentaron más de diez roturas en un radio inferior a 2 kilómetros en los 20 días previos. Estudiando el mismo índice a 90 días, en el 51% de los casos se produjeron roturas previas (más de diez roturas) en menos de 2 kilómetros. En último lugar se observó que en el 50% de la muestra estudiada se había producido al menos una rotura los 20 días previos al fallo en el mismo sector.




### **Tipificación de las causas para conjuntos de medida**

Al igual que para tuberías y acometidas, se han identificado las categorías para agrupar las causas probables de fallo en conjuntos de medida: aquellas derivadas de agentes externos al conjunto de medida, las debidas a características intrínsecas del material y las ocasionadas por las condiciones de la instalación. Además, debido a la variabilidad encontrada, se incluyó la categoría otras causas de fallo (Tabla 10).

Respecto a las diferencias con las causas de fallo consideradas en tubería, los agentes externos sólo incluyeron las bajas temperaturas y el robo de componentes, y a partir de los fallos registrados, no se consideraron representativos los factores derivados de la operación de la red o los asentamientos del terreno en la instalación.



**TABLA 10. CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA**

AGRUPACIÓN	CAUSAS DE FALLO
 Agentes externos al conjunto	Heladas o condiciones climáticas
	Robo de componente
 Características intrínsecas del material	Corrosión o desgaste de los elementos del conjunto
	Defecto de material
 Condiciones de instalación	Defecto de instalación
 Otras causas	Otro
	Desconocido

 **AGENTES EXTERNOS AL CONJUNTO**

**Heladas o condiciones climáticas.** Dentro de las condiciones climáticas, las heladas son la principal causa de fallo para los conjuntos de medida. Los elementos más dañados por las heladas fueron los contadores, las llaves y otros componentes de los conjuntos situados en el exterior de las edificaciones, sobre todo, en los muros de las fachadas (Figura 70).

**FIGURA 70. ROTURAS DEBIDAS A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS**



*Rotura de parte plástica de contador por efecto de la congelación*

*Fisura en cuerpo de unión de bronce latón detectada con posterioridad a una helada*

**Robo de componente.** Se asignó esta causa de fallo en el caso de roturas y/o averías derivadas del robo de uno o varios de los componentes que integran el conjunto de medida tales como: llaves, contadores y piezas metálicas de bronce latón (Figura 71).

**FIGURA 71.** ROBO DE CONTADOR, SE COLOCÓ UN PUENTE DE POLIETILENO PROVISIONAL



💧 **CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL MATERIAL**

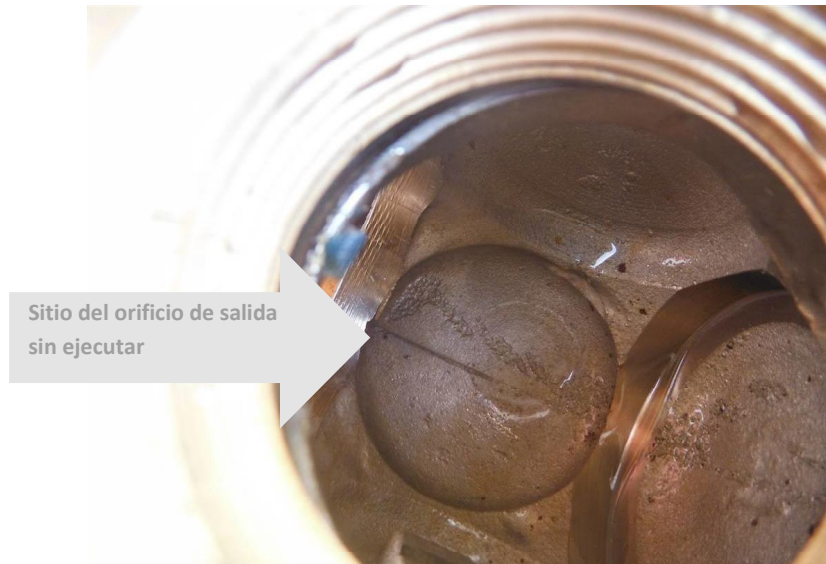
**Corrosión o desgaste de los elementos del conjunto.** Los procesos de corrosión de los diferentes componentes metálicos fueron una causa de fallo frecuente en los conjuntos de medida (Figura 72).

**FIGURA 72.** PÉRDIDA DE FUNCIONALIDAD EN UNA VÁLVULA DE COMPUERTA, POR CORROSIÓN E INCRUSTACIONES DE HIERRO



**Defecto de material.** Se incluyeron en esta causa de fallo las roturas derivadas de los defectos de fabricación o de diseño que podían darse en cualquiera de los elementos que constituyen el conjunto de medida (Figura 73).

**FIGURA 73. FALLO POR DEFECTO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN. ESFERA DE UNA VÁLVULA DE BOLA A ESCUADRA EN LA CUAL NO SE PRACTICÓ EL ORIFICIO DE SALIDA DE LA ESFERA**



#### 💧 CONDICIONES DE INSTALACIÓN

**Defecto de instalación.** Se asignó esta causa de fallo a aquellas roturas derivadas de una desalineación geométrica de los componentes del conjunto, principalmente en la entrada de acometida y salida a la propiedad, que provoca fugas o roturas de los componentes más delicados.

Esta causa de fallo se asoció también al montaje de los componentes de piezas cuando se realizaba en un orden inadecuado, cuando se producía una mala colocación de la junta de goma en las uniones, o cuando la junta de goma era inapropiada.

#### 💧 OTRAS CAUSAS

**Otro.** Esta categoría hace referencia a aquellos fallos producidos en cualquiera de los otros elementos del conjunto, tales como la "T" de comprobación, codos, uniones de tubos que no sean en las uniones con las llaves o el contador, etc.

**Desconocida.** Se consideraron roturas por causa de fallo "desconocida" aquellas a las que no se pudo asignar ninguna de las causas anteriormente descritas.

### Valoración de las causas para conjuntos de medida

Según la agrupación descrita, las dos causas mayoritarias de fallo en los conjuntos de medida fueron las características del material y las condiciones de instalación (defectos de instalación), cuyo porcentaje asciende al 76% y 16% respectivamente (Figura 74 *a*).

No obstante, para analizar con mayor exactitud los motivos que influyen en las roturas se desglosaron las causas de fallo en seis específicas de estos elementos, cuyo porcentaje de ocurrencia de rotura puede observarse en la Figura 74 *b*.

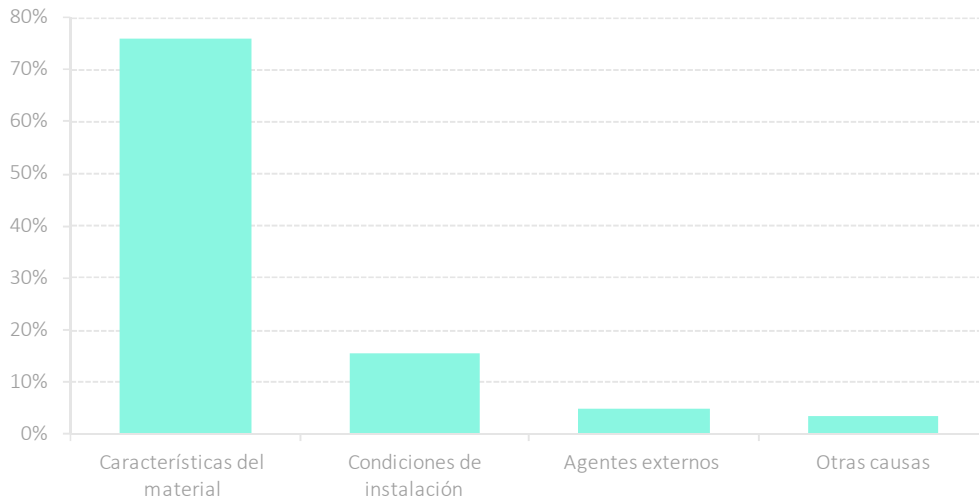
El 73% de los casos de roturas se debieron a **corrosión o desgaste**, siendo la principal causa de fallo en los conjuntos de medida, especialmente debido al deterioro del obturador, del accionamiento y del eje de las llaves. En concreto constituyó el 95% de la causa de rotura en el accionamiento y el obturador. Comparando estos resultados con la edad del contador, que da idea de la edad del conjunto de medida, se ha observado que los procesos de corrosión o desgaste se han producido con independencia de la edad de la instalación.

El 16% de las roturas se debieron a **defectos de instalación** y el 40% de los defectos de la instalación se produjeron en las uniones de las llaves. Como defectos de instalación se detectaron fallos relacionados con el mal ajuste de las uniones roscadas, ya fuera por defecto o exceso de rosca, que provocaban fisuras en la parte del cuerpo roscada o la rotura de las llaves y los racores de unión.

Las **bajas temperaturas** fueron la causa de rotura en el 3% de los casos. En el 80% de los fallos producidos por este motivo, el elemento de rotura no poseía aislante térmico, lo que pone de manifiesto la importancia de la protección en aquellas zonas en que se prevén temperaturas por debajo de los 0°C durante periodos prolongados. El 60% de las roturas derivadas de esta causa se dieron en contadores, por lo que se consideró que es el elemento más susceptible al efecto de la congelación.

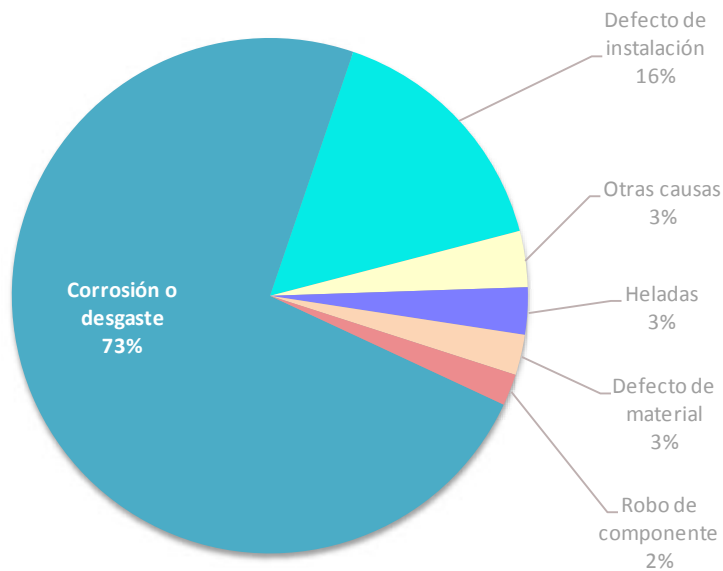
Los **defectos de material** representaron un 3% del total de la muestra. Cabe decir que donde más se observó este defecto fue en contadores. Los **robos de componentes** alcanzaron un 2% del total de la muestra.

**FIGURA 74. CAUSAS DE FALLO EN CONJUNTOS DE MEDIDA**



*Características del material:* Corrosión y defecto de material  
*Condiciones de instalación:* Defectos de instalación  
*Agentes externos:* Heladas y robos  
*Otras causas*

**a. Causas de fallo en conjuntos de medida**



**b. Distribución de roturas en conjuntos de medida, según la causa de fallo**



### 6.3.2. Localización del fallo

En este apartado se tipifican las roturas basándose en la localización más habitual del fallo para el caso de tubería general y acometida, y del análisis del elemento de rotura para el caso de los conjuntos de medida.

#### Tipificación de la localización del fallo

En el caso de tuberías y acometidas, se puede distinguir si el fallo se ha producido en la pared del tubo o en juntas, piezas especiales, o accesorios.

El fallo o rotura de la tubería puede producirse por la rotura de la propia pared del tubo o en uniones con otras tuberías ya sea por la rotura del propio mecanismo de unión para uniones soldadas, o de un accesorio o pieza especial, para uniones mecánicas de tuberías con accesorios. Los fallos en junta, pieza especial, o accesorio incluyen, tanto roturas de las piezas que forman la unión, como pérdidas o fugas que se producen en las uniones, sin necesidad de haber roto ningún elemento (Figura 75).

**FIGURA 75. ROTURAS, EN TUBO Y JUNTA**



*Rotura en pared de tubo*

*Rotura en junta, pieza especial, o accesorio, en tubería de polietileno fuera de la actual normativa vigente de Canal de Isabel II*

A continuación se describen brevemente las cuatro posibilidades contempladas respecto a la tipología de la instalación:

- **Enterrada en zanja:** se corresponde con la tipología de instalación más frecuente, por lo que la gran mayoría de las roturas se registraron en tubería enterradas en zanja.
- **Instalación en arqueta:** se incluyen aquí las roturas producidas en el interior de arquetas, por lo que son más frecuentes aquellas producidas en junta, pieza especial o accesorio.
- **Galería visitable:** se sitúan en galería visitable tuberías generales de cierta envergadura.
- **Instalación aérea:** en ocasiones es necesario sortear obstáculos, lo que da lugar a la instalación de tramos de tuberías autoportantes. La mayor parte de las roturas finalmente incluidas en esta categoría fueron tramos de acometida que discurrían ancladas a muros.

En el caso de los conjuntos de medida, el elemento de rotura pudo ser la válvula de retención (antirretorno), el contador, las llaves, y cualquiera de los otros elementos del conjunto, tales como la “T” de comprobación, codos, uniones de tubos que no sean las uniones con las llaves o el contador, etc. (Figura 76).

Dentro de las llaves se distinguió si el elemento de rotura fue el accionamiento, el cuerpo de la llave, el obturador y/o el elemento de unión.

**FIGURA 76. EJEMPLOS DE VÁLVULAS AFECTADAS**



*Válvula de compuerta con obturador de fundición gris, afectada por incrustaciones de hierro y de tipo calcáreo*

*Válvula de retención (antirretorno) afectada*

### Valoración de la localización de fallo

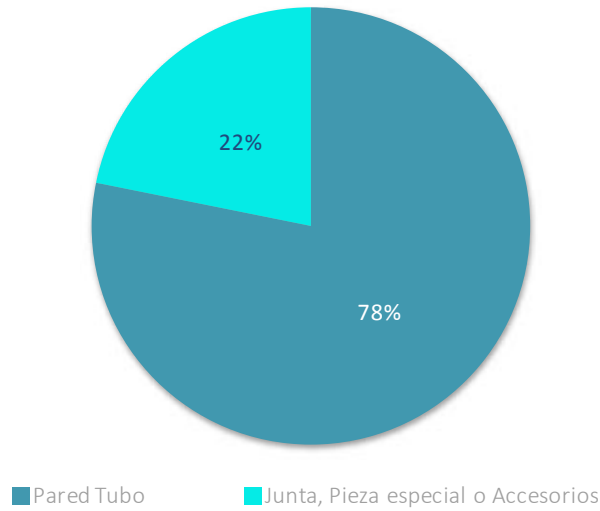
En el caso de **tubería general**, al estudiar el punto de ubicación de las roturas de la muestra, se observó que el mayor número de fallos se concentró en pared de tubo, con un 78% de incidencia, mientras que en juntas, piezas especiales o accesorios, este porcentaje fue tan solo de un 22%. Estos fallos incluyeron tanto roturas de las piezas que forman la unión como pérdidas o fugas que se producen en las uniones, sin necesidad de haber roto ningún elemento (Figura 77).

En cuanto a la tipología de la instalación, el 94% de las roturas se produjeron en tuberías enterradas en zanja, principalmente en fundición gris y fibrocemento, como se refleja en la Tabla 11. Los fallos en tuberías con instalación en arqueta se concentraron fundamentalmente en tuberías fundición gris.

**TABLA 11. DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA SEGÚN TIPOLOGÍA DE INSTALACIÓN**

	<i>Tubería General</i>	<i>Acometidas</i>
Aérea	0,5%	1,8%
Arqueta	4,5%	9,0%
Enterrada en zanja	94,4%	88,3%
Galería visitable	0,6%	0,2%
Otros	-	0,6%
Sin datos	-	0,1%

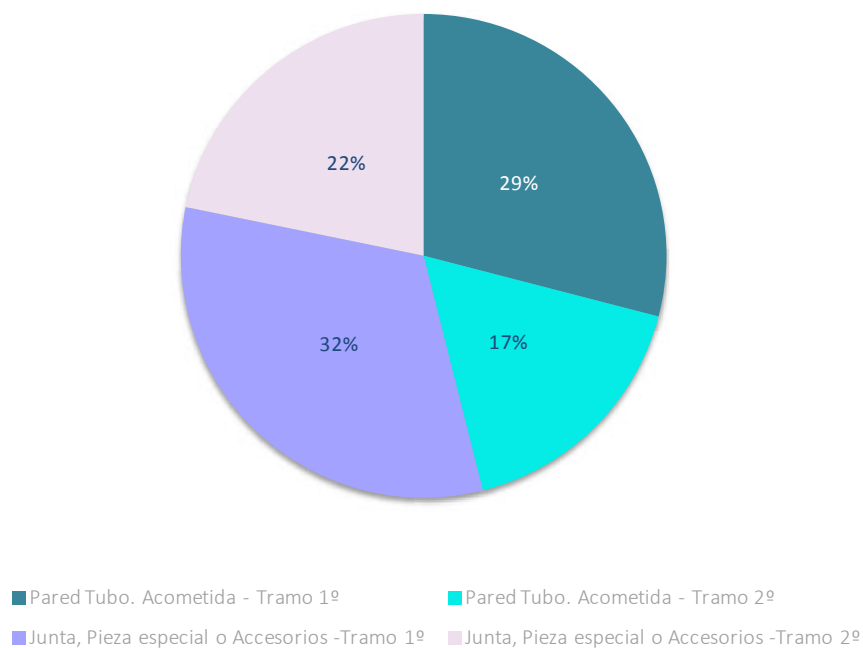
**FIGURA 77. LOCALIZACIÓN DE LAS ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL**



Sin embargo, al estudiar las **roturas en acometidas** se observó que el porcentaje de roturas en uniones superó en un 8% al producido en pared de tubo, alcanzando un 54% de las roturas en acometida.

Esto tiene sentido ya que el número de elementos y uniones por kilómetro de tubería es muy inferior al que hay por kilómetro de acometida. En ambas localizaciones fueron mayores las roturas en acometida de primer tramo que de segundo tramo, lo cual puede deberse a que las acometidas de primer tramo tienen por lo general una parte bajo calzada, mientras que las de segundo tramo suelen ir bajo acera (Figura 78).

**FIGURA 78. LOCALIZACIÓN DE LAS ROTURAS EN ACOMETIDA**

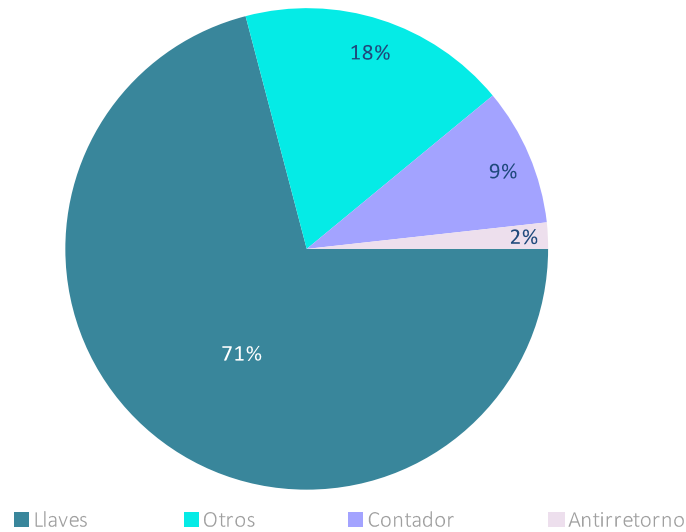




En cuanto a la tipología de la instalación, se comprueba de nuevo que la mayoría de las roturas se produjeron en acometidas enterradas en zanja, principalmente de polietileno fuera de norma (50% del total de roturas en acometidas), plomo (16%) y polietileno dentro de norma (15%). Los fallos en tuberías con instalación en arqueta se concentraron fundamentalmente en acometidas de polietileno fuera de norma (5%).

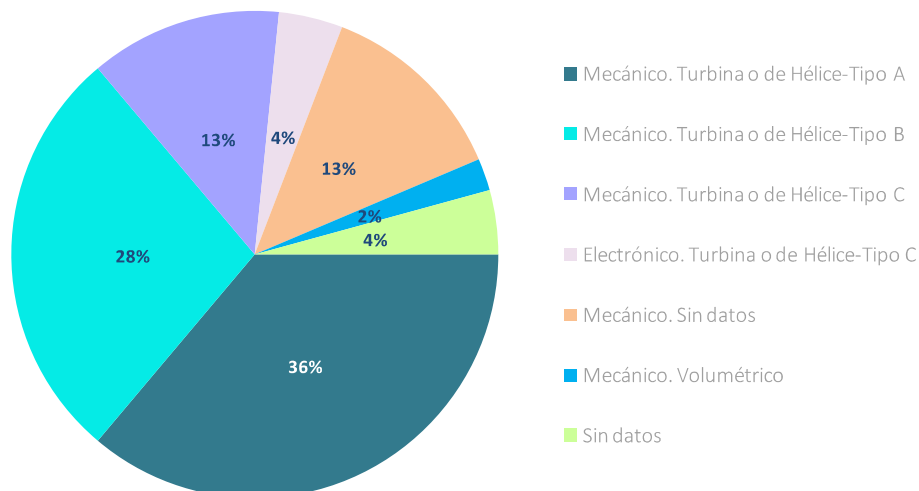
Por último, la Figura 79 refleja la distribución de fallos en los **conjuntos de medida** de la muestra, en función del elemento de rotura.

**FIGURA 79. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS SEGÚN ELEMENTO DEL CONJUNTO DE MEDIDA**



El 9% de las roturas en conjuntos de medida se produjeron en contadores, principalmente de tipo mecánico (91% del total de roturas en contadores), con predominio de medidor de turbina o hélice tipo A (Figura 80), con fallo por fugas en uniones, degradación de las juntas de goma, mala instalación, defecto de lectura, roturas en la parte plástica por congelación, atascos de filtros, etc.

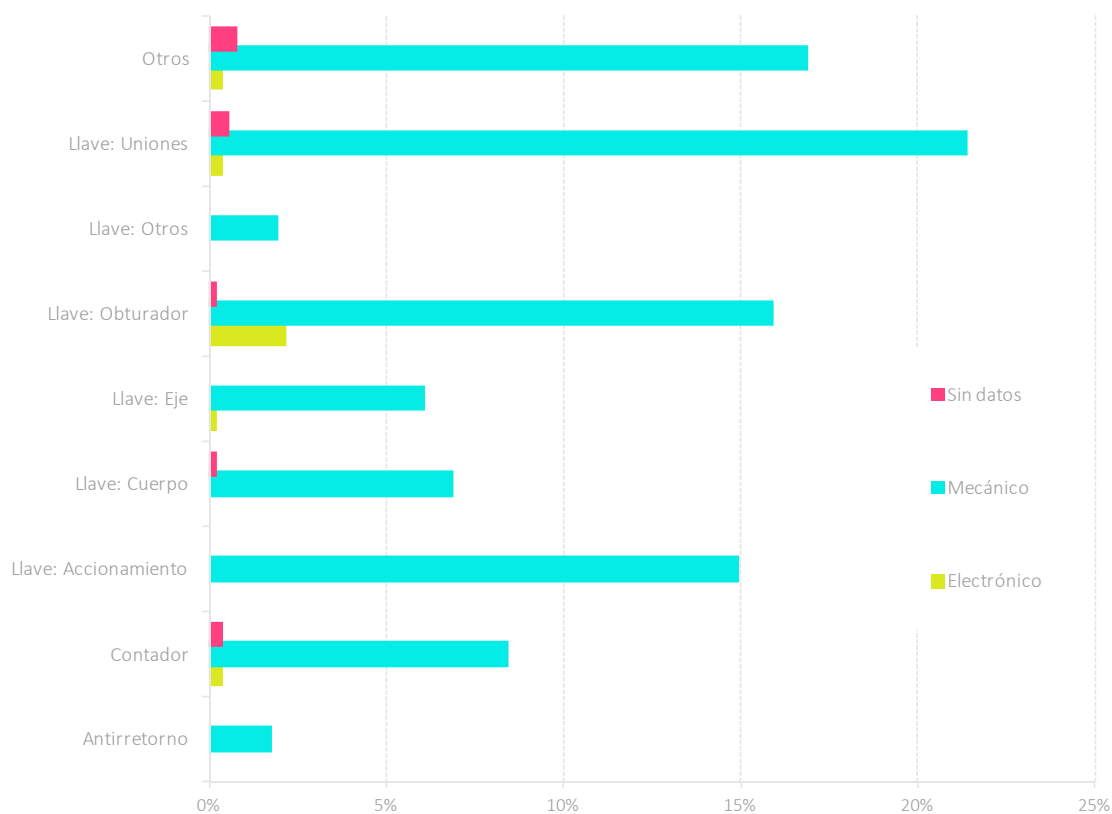
**FIGURA 80. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONTADORES SEGÚN TIPOLOGÍA DEL MEDIDOR**



En cuanto a elementos del **conjunto medidor**, el 71% de las roturas se produjeron en las llaves siendo mayoritaria en las llaves de unión (23%), y en menor medida en obturador (18%), accionamiento (15%), cuerpo (7%), y eje (6%), (Figura 81). La categoría "otros" supone un 18% de la muestra, y como ya se comentó anteriormente, hace referencia a fallos que se produjeron en otros elementos tales como la "T" de comprobación, codos, uniones de tubos que no se localizasen en las uniones con las llaves o contador.

Las roturas en elementos **antirretorno** constituyeron un porcentaje muy bajo de la muestra (2%), habiéndose comprobado que el 48% de la muestra disponía de este elemento.

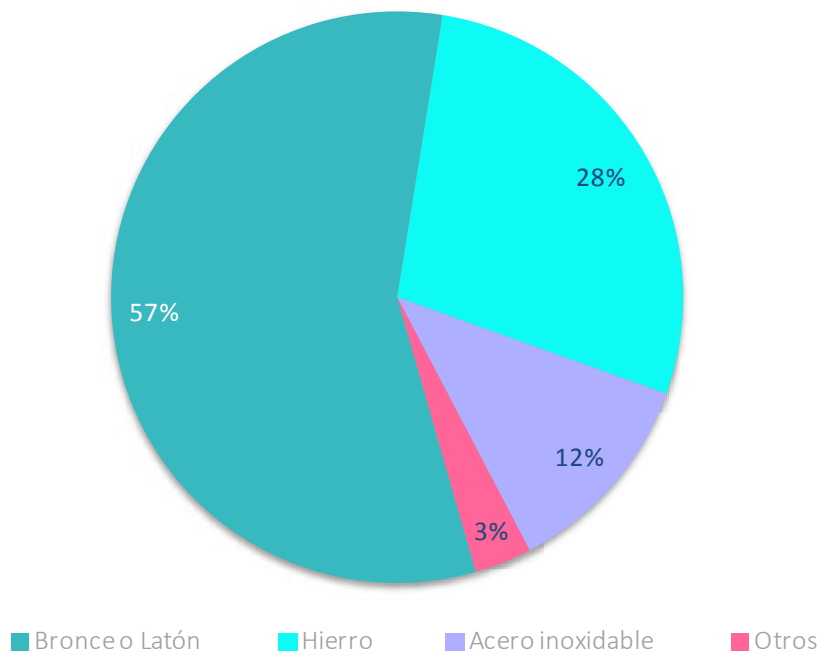
**FIGURA 81. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE MEDIDOR**



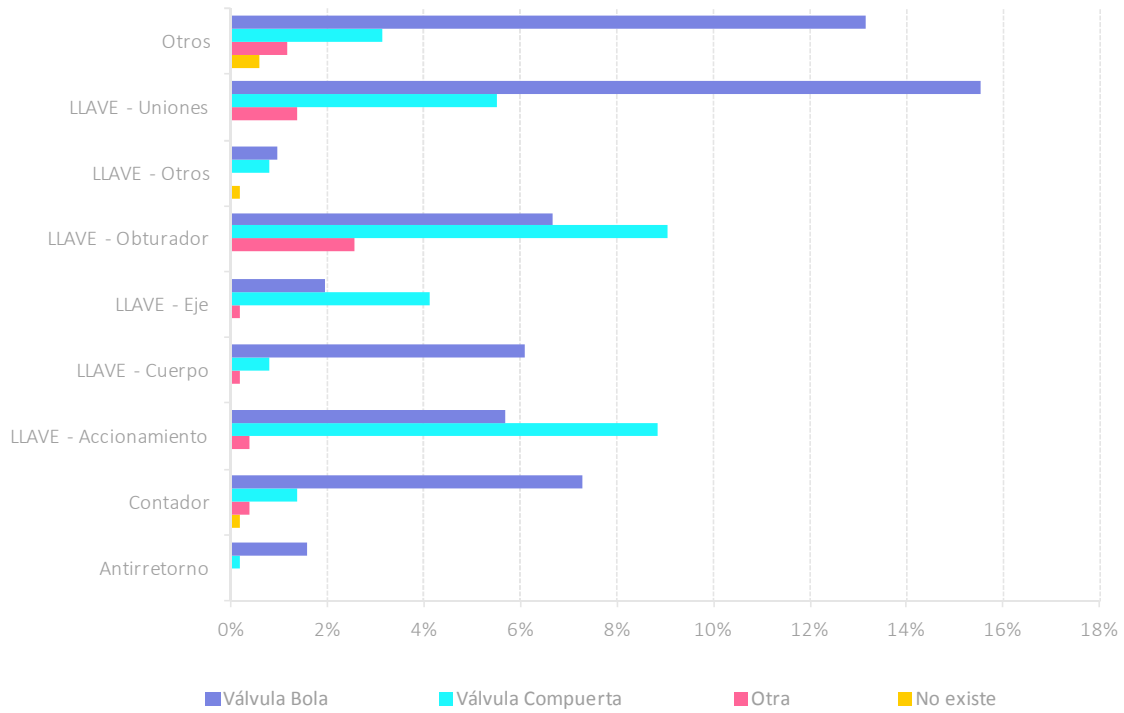
En cuanto al tipo de roturas en **obturador**, destacan las roturas de este elemento en **bronce o latón** con un 57% del total, y las de **hierro** con un 28%, según se refleja en la Figura 82, con fallos en la llave.

Dentro de las roturas en las **llaves de corte**, prevaleció la rotura en los elementos de unión, rompiendo más las válvulas de bola que las de compuerta, tanto para la llave de entrada (Figura 83) como para la llave de salida (Figura 84), y accionamientos de tipo manilla (Figuras 83 y 84). Este hecho es comprensible pues las válvulas de bola se instalan en diámetros menores de 65 mm, que son más frecuentes en las acometidas.

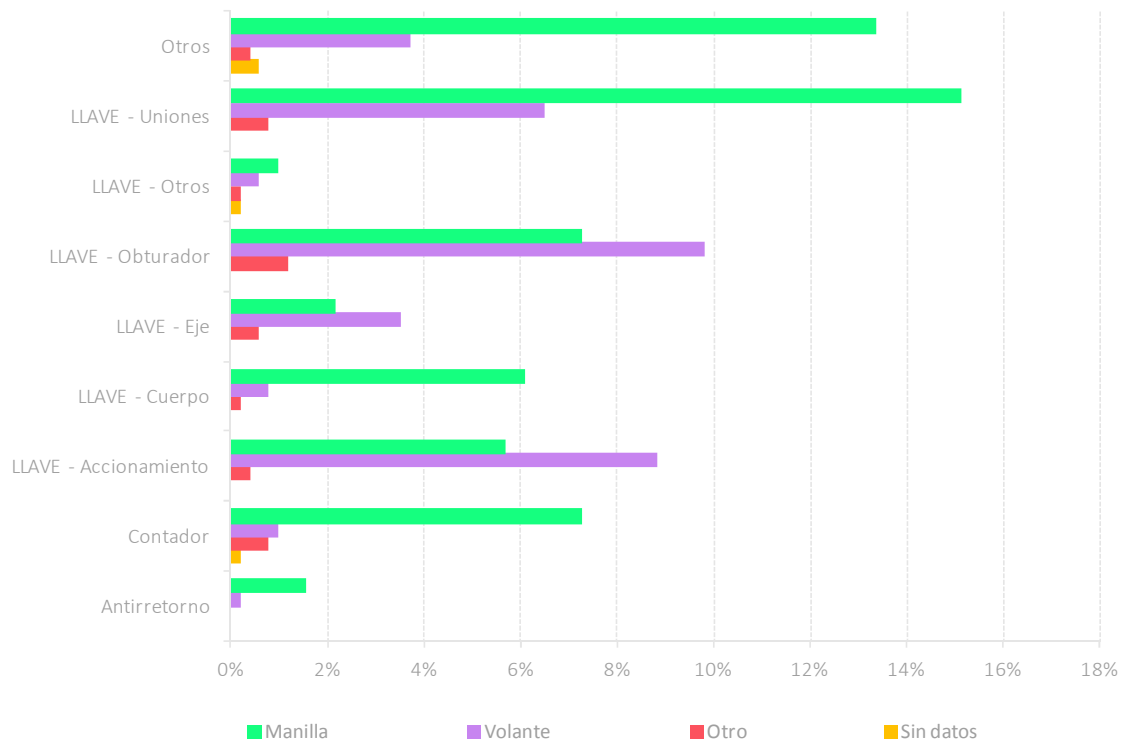
**FIGURA 82.** DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN MATERIAL DEL OBTURADOR



**FIGURA 83. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE ACCIONAMIENTO A LA ENTRADA**

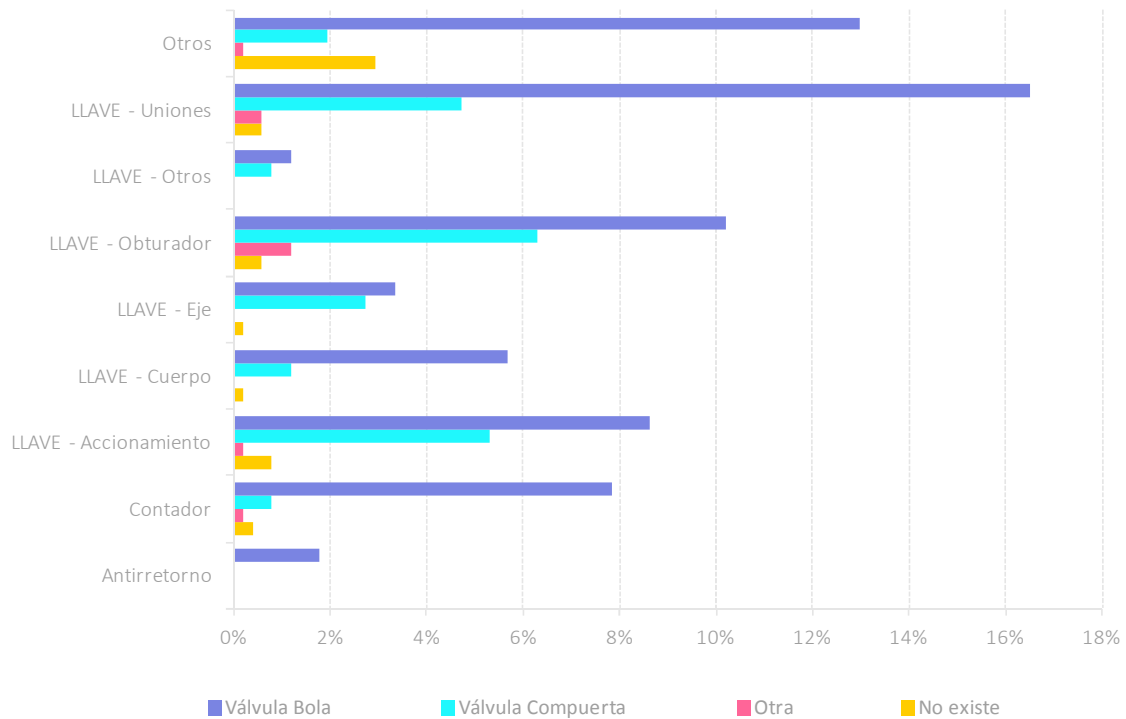


a. Elemento de fallo a la entrada

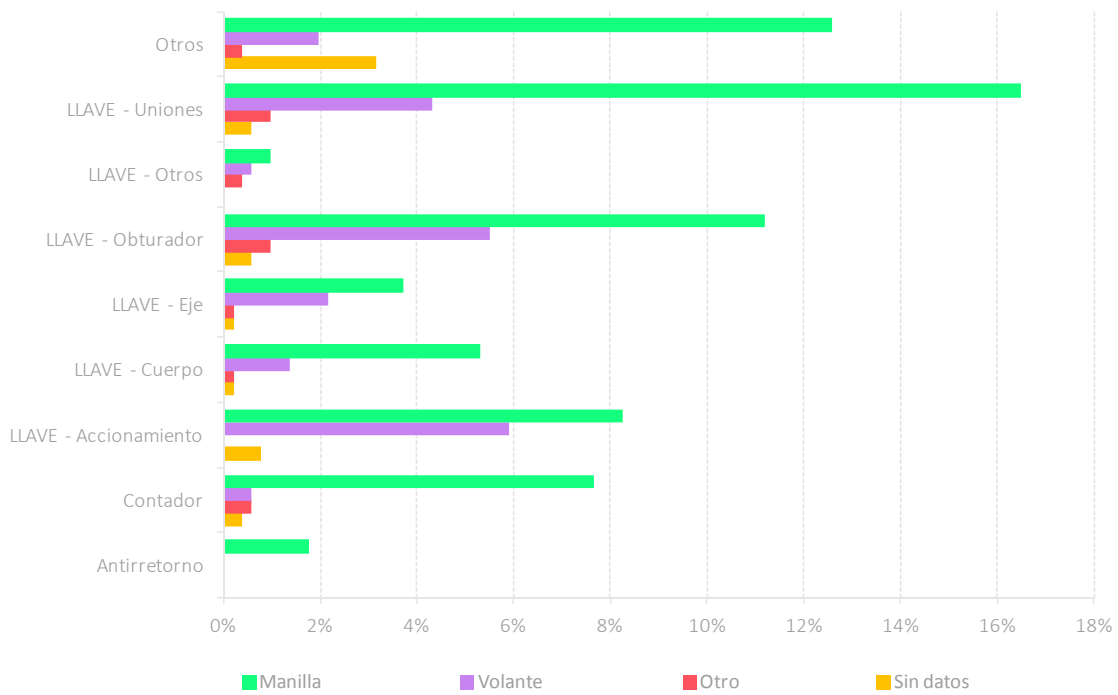


b. Tipo de accionamiento a la entrada

**FIGURA 84. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE ACCIONAMIENTO A LA SALIDA**



**a. Elemento de fallo a la salida**



**b. Tipo de accionamiento a la salida**

### 6.3.3. Modos de fallo

Se presenta en este apartado el resultado del análisis de los modos de fallo identificados en la muestra estudiada.

#### Tipificación de los modos de fallo

🔹 **Para tubería general y acometidas**, se describen seguidamente los modos de fallo mayoritariamente observados en las visitas a las roturas:

- a. Circunferencial
- b. Longitudinal
- c. Explosiva
- d. Poro
- e. Agujero > 1 cm
- f. Fuga
- g. Otro

Se contempla la opción **Otros**, que abarca aquellas roturas singulares que no presentaron ninguna forma de las anteriores. Se resumen en la Tabla 12, y se presentan imágenes de las roturas clasificadas por modos de fallo, en las figuras 85 a 90.

**TABLA 12. CLASIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO**

Número	Modos de fallo
1	Circunferencial
2	Longitudinal
3	Explosiva
4	Poros
5	Agujero > 1 cm
6	Fuga
7	Otro

**FIGURA 85. MODO DE FALLO CIRCUNFERENCIAL**



*Rotura circunferencial en tubo de fundición gris*



*Rotura circunferencial en tubo de fibrocemento, junto a una brida*

**FIGURA 86. MODO DE FALLO LONGITUDINAL**



*Rotura longitudinal en tubo de plomo*



*Rotura longitudinal en tubo de PVC*

**FIGURA 87. MODO DE FALLO EXPLOSIVA**



*Rotura explosiva en tubo de fibrocemento*



*Rotura explosiva en tubo de fundición gris*

**FIGURA 88. MODO DE FALLO PORO**



*Poro en pared de tubo de polietileno*



*Poro en tubo de plomo*



**FIGURA 89. MODO DE FALLO AGUJERO > 1 cm**



*Agujero en tubería de fundición dúctil*



*Agujero en tubería de acero*

**FIGURA 90. MODO DE FALLO FUGA**



*Fuga en unión electrosoldada en una tubería de polietileno*

- En el caso de los conjuntos de medida, que se encuentran constituidos por diversos componentes, el modo de fallo es muy variable en función del elemento de rotura, y está fuera del alcance de este trabajo hacer un desglose pormenorizado de los diferentes modos de fallo para cada uno de los elementos. Por este motivo se ha efectuado el análisis de localización y causa de fallo de manera unificada en el apartado anterior.

### Valoración de los modos de fallo

Los resultados de los modos de fallo de la muestra estudiada para tubería general y acometida, se presentan en la Tabla 13, y en la Figura 91 *a.* y *b.* siguiendo la misma clasificación usada en la Tabla 12 anterior.

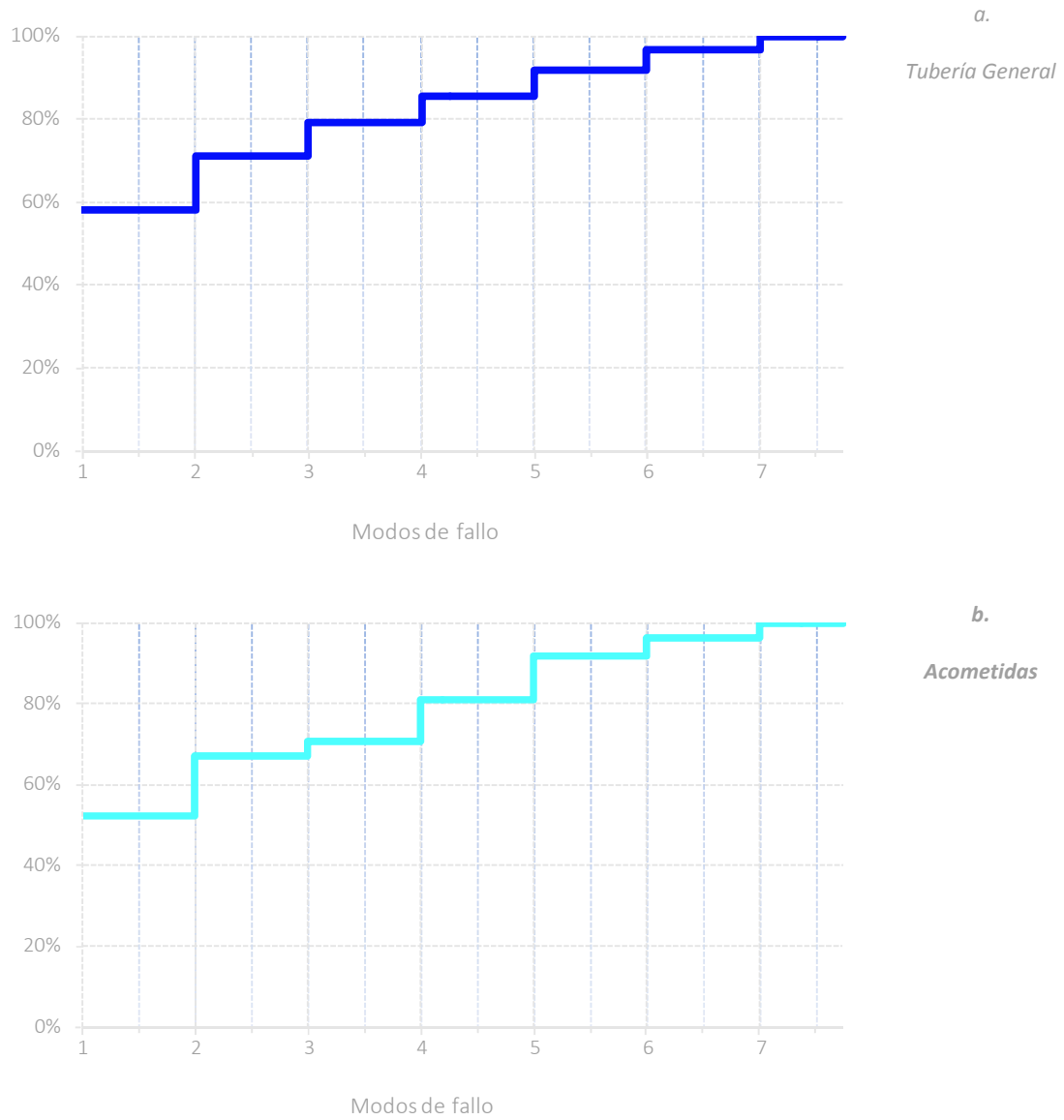
**TABLA 13.** DISTRIBUCIÓN DE LA INCIDENCIA DEL MODO DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL Y EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA

<i>Modos de fallo</i>	<i>Tubería General</i>	<i>Acometidas</i>
Circunferencial	33%	28%
Longitudinal	22%	29%
Explosiva	14%	6%
Poro	11%	20%
Agujero > 1 cm	6%	1%
Fuga	9%	9%
Otro	5%	7%

En la muestra de **Tubería General** el modo de fallo predominante es el circunferencial (33%). A continuación, la mayor probabilidad de ocurrencia se corresponde con roturas de tipo longitudinal (22%) y la rotura explosiva (14%).

En las **Acometidas**, prevalecen las roturas longitudinales (29%) y las circunferenciales (28%) sobre el resto de tipos, y le siguen el modo de fallo en forma de poro (20%).

**FIGURA 91.** FDA DE LA MUESTRA SEGÚN LOS MODOS DE FALLO, EN TUBERÍA GENERAL Y EN ACOMETIDA



Nº Referencia	Modos de fallo
1	Circunferencial
2	Longitudinal
3	Explosiva
4	Poros
5	Agujero > 1 cm
6	Fuga
7	Otro

## 6.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados obtenidos en los ensayos de tuberías metálicas, plásticas y de suelo se presentan a continuación. Se efectuaron sobre las muestras obtenidas en las visitas de campo durante el periodo en que se desarrolló el estudio.

Se realizaron en total 843 ensayos en tuberías y 1.174 en suelos. Dado que el trabajo se desarrolló en dos fases, no todas las muestras fueron sometidas al mismo número de ensayos, y en algunos casos se hicieron coincidir ensayos en tuberías metálicas con análisis en el material de relleno.

### 6.4.1. Ensayos en tuberías metálicas

Se dispone de datos sobre la composición química de 46 tuberías, y datos sobre características mecánicas de 53 tuberías, todas ellas de fundición, incluyendo fundición dúctil y fundición gris. El elevado estado de corrosión en el que se encontraron algunas muestras de fundición solo permitió someter a ensayos de tracción una parte de las mismas, en concreto, el 55% de muestras de fundición gris y el 63% de muestras de fundición dúctil.

Asimismo, cuando en tuberías de fundición dúctil el modo de fallo era de tipo **poro** o **circunferencial** habitualmente la reparación se realizaba mediante manguito o abrazadera en la zona afectada, sin proceder a la sustitución del tubo afectado. Esta circunstancia hizo que se dispusiera de pocas muestras de tubería de este material.

#### Ensayos Mecánicos

En el caso las tuberías de fundición gris, el 34% de las muestras presentó valores de dureza superiores a los 215 HB<sup>6</sup> máximos especificados para este tipo de material en el pliego de prescripciones técnicas generales para tuberías de abastecimiento de aguas (MOP orden 28 julio 1974). Además, el 80% de las mismas presentaron **esteadita**<sup>7</sup> en su estructura, lo que aporta fragilidad a su comportamiento físico.

El 30% de las muestras de fundición gris no superaron los valores mínimos de resistencia a la tracción establecidos en el Pliego General de Obras Hidráulicas de 1974, siendo estos valores de resistencia distintos, según el tipo de fabricación del tubo (moldeo vertical, centrifugado en molde de arena o centrifugado en coquilla metálica).

---

<sup>6</sup> HB Valor usado en la medición de la dureza de materiales, según escala Brinell.

<sup>7</sup> Esteadita Real Academia de Ingeniería. Constituyente estructural duro que aparece en la fundición de hierro consistente en la eutéctica de ferrita y fosfuro de hierro (Fe<sub>3</sub>P).

En el caso de las muestras de fundición dúctil, sólo se pudo ensayar el alargamiento mínimo en rotura en dos muestras, una de ellas presentó un alargamiento inferior al 7% especificado en las normas ISO 2.531 UNE-EN 545 para los diámetros recogidos. Los valores de fósforo y silicio de esta muestra fueron superiores a los establecidos. A pesar de ello, las propiedades mecánicas de las fundiciones dúctiles han demostrado ser buenas y cumplir con la normativa, en las partes del material no afectadas por mecanismos de degradación.

#### 🔹 Ensayos químicos y metalográficos

Los ensayos mecánicos se completaron con el análisis de la composición química de las fundiciones, pues ésta influye directamente sobre las propiedades mecánicas de las tuberías. El análisis de la fundición dúctil se complementó con la norma americana ASTM A395 que limita su cantidad de carbono, silicio y fósforo ( $C \geq 3\%$ ;  $Si \leq 2,75\%$ ;  $P \leq 0,08\%$ ).

El contenido de carbono de todas las muestras de fundición fue acorde a los límites establecidos.

El fósforo se suele añadir a la fundición con el objeto de favorecer su colabilidad. La mejora de la colabilidad de las fundiciones por la presencia del fósforo es debida a la formación de esteadita. La presencia del fósforo aumenta la dureza, pero en exceso puede producir fragilidad en las tuberías.

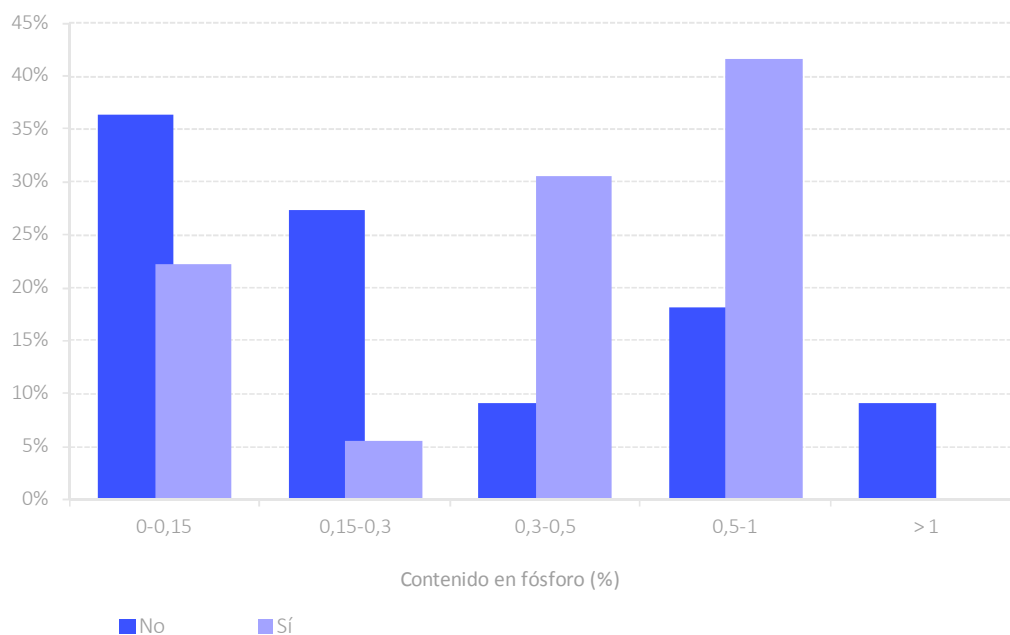
Descartada la causa de fallo provocada, que se estima independiente de las características de la tubería, el estudio de la cantidad de fósforo presente en las muestras (Tabla 14 ) denotó mayores porcentajes de rotura para la causa de fallo sobrecargas externas y variaciones de presiones o maniobras cuando el contenido en fósforo era superior al 0,3%.

**TABLA 14. PORCENTAJES DE CAUSA DE FALLO EN MUESTRAS DE TUBERÍA DE FUNDICIÓN, SEGÚN EL CONTENIDO EN FÓSFORO**

CAUSA DE FALLO	Contenido en Fósforo (%)					Total
	0 - 0,15	0,15 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 1	> 1	
<b>Agentes externos</b> (Raíces, heladas y sobrecargas externas)			40%	60%		100%
<b>Características intrínsecas del material</b> (Corrosión y defecto de material)	30%	10%	23%	37%		100%
<b>Condiciones de instalación</b> (Asentamientos del terreno y defectos de instalación)		50%		50%		100%
<b>Operación de la red</b> (Variaciones de presión/maniobras y fatiga)		17%	50%	17%	17%	100%
<b>Otras causas</b>	100%					100%
<b>TOTAL</b>	24%	11%	26%	37%	2%	100%

Además, se analizó la relación de la existencia de esteadita en la estructura de las tuberías de fundición con el contenido en fósforo (Figura 92), y se vio que a medida que aumentaba el contenido en fósforo ( $P > 0,3\%$ ) aumentaba la existencia de esteadita. El 50% de las muestras de fundición dúctil que presentaron valores de fósforo superiores a los establecidos presentaron esteadita en su estructura.

**FIGURA 92. RELACIÓN CONTENIDO EN FÓSFORO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE LAS MUESTRAS DE FUNDICIÓN**



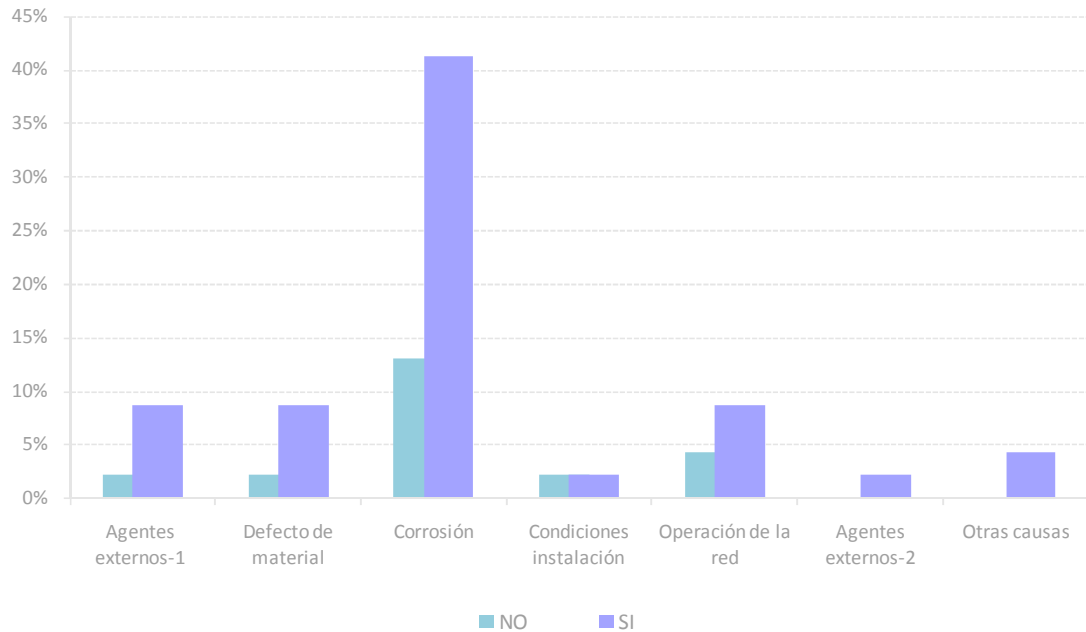
Al analizar las causas de fallo y la presencia de esteadita en muestras de fundición, se observó que el porcentaje de roturas con esteadita en su estructura era superior en la mayor parte de los casos, relacionando así el aumento de fragilidad con la presencia de esteadita.

Destaca sobre el resto la presencia de esteadita para el 76% de las muestras de fundición que fallaron por corrosión (Figura 93).

Estudiando la presencia de esteadita con el modo de fallo (Figura 94) se observó que salvo para roturas de tipo **Agujero > 1 cm**, son mayores los porcentajes de fallo con existencia de esteadita en la estructura de las fundiciones.

González Fernández (1984), en su estudio de la influencia del contenido en silicio de las películas de óxido formadas sobre los metales, concluyó que las muestras ensayadas mostraban una relación entre el contenido en silicio y el número de grietas formadas; un aumento del contenido en silicio se traducía en un aumento del número de grietas. En esta ocasión (Figura 95), el reducido número de muestras no permitió obtener resultados concluyentes, pero se observó que tres de las cuatro muestras de **fundición dúctil**, cuya causa de fallo fue corrosión, presentaron valores de silicio por encima del límite establecido, y dos de las mismas también tenían valores de fósforo superiores, aunque no presentaron esteadita en su estructura.

**FIGURA 93. RELACIÓN CAUSAS DE FALLO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE MUESTRAS DE FUNDICIÓN**



*Agentes externos-1: Sobrecargas externas, raíces y heladas*

*Defecto de material*

*Corrosión*

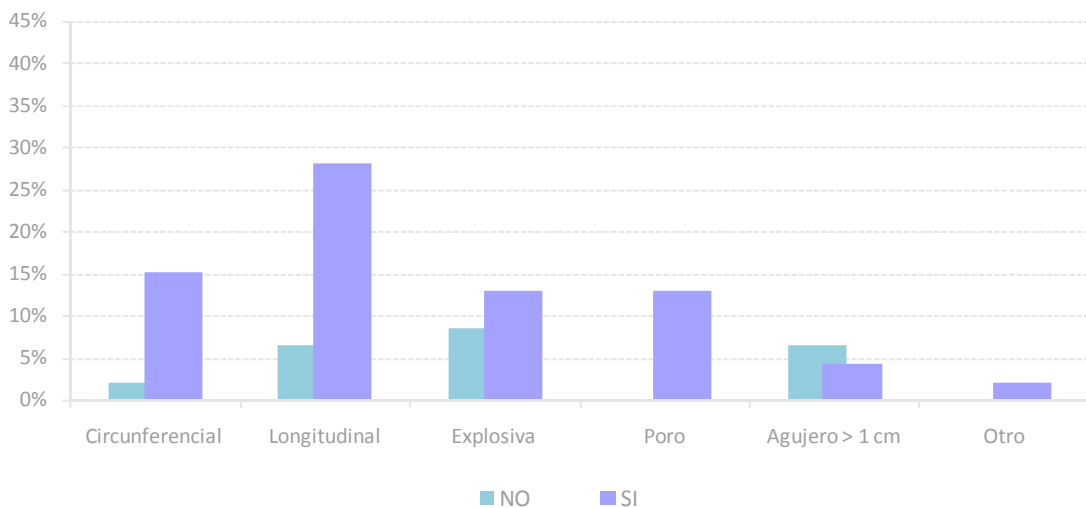
*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

*Operación de la red: Variaciones de presión o maniobras y fatiga*

*Agentes externos-2: Provocadas*

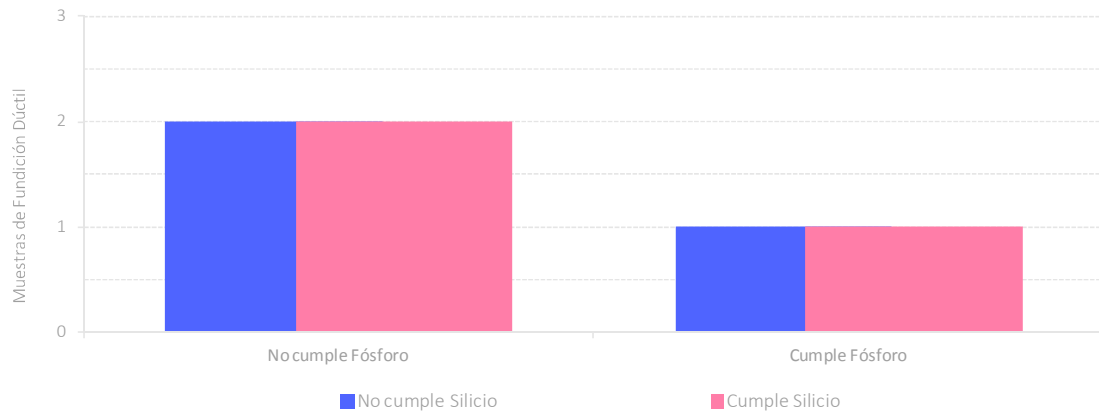
*Otras causas*

**FIGURA 94. RELACIÓN MODO DE FALLO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE MUESTRAS DE FUNDICIÓN**





**FIGURA 95. RELACIÓN CONTENIDO EN FÓSFORO-CONTENIDO EN SILICIO EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL**

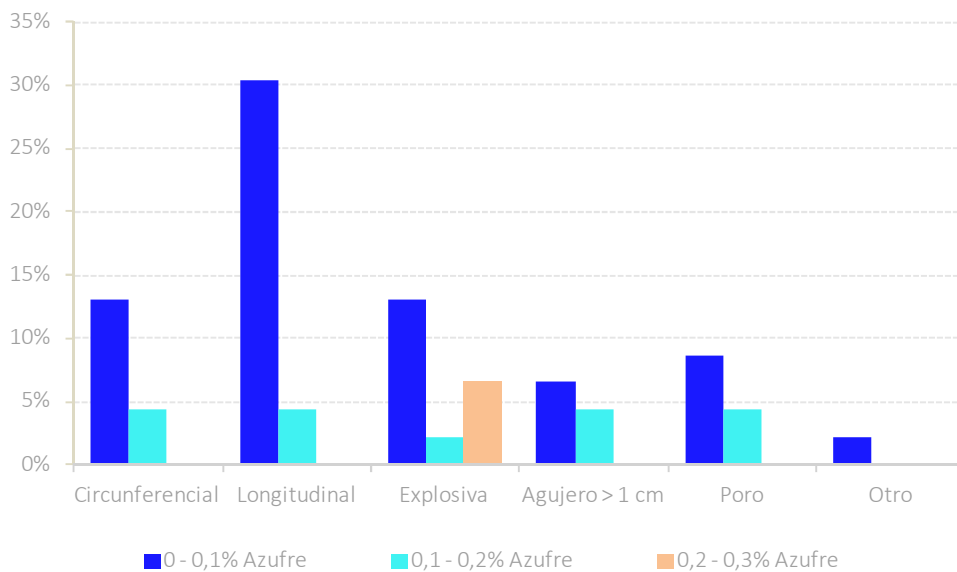


Por otra parte, se estudiaron 25 muestras, en su mayoría de fundición gris, mediante microanálisis. Todas las muestras se encontraron muy corroídas, con incrustaciones y los recubrimientos perdidos. En los ensayos se encontraron con frecuencia sales, cloruros y azufre.

Las muestras de fundición gris ensayadas mostraron por lo general características mecánicas peores que las exigidas en el Pliego General de Obras Hidráulicas de 1974, si bien muchas de estas tuberías son de varias décadas anteriores a esta norma. Se observó debilitamiento de la estructura pues presentaron distintas tipologías de grafito que disminuyen su resistencia tales como grafito B, C y D.

El estudio entre la cantidad de azufre y las causas de fallo no permitió establecer ninguna relación, sin embargo, el análisis entre el modo de fallo y el contenido de azufre (Figura 96) denotó un incremento de roturas de tipo explosivo cuando el contenido en azufre es elevado.

**FIGURA 96. RELACIÓN MODO DE FALLO-CONTENIDO DE AZUFRE EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN**



En cuanto a la oxidación, en general se observó un proceso interno en casi todas las muestras ensayadas, siendo en algunas de ellas muy importante. Las propiedades mecánicas de estos tubos en la parte donde el espesor del metal está afectado se ven disminuidas, por lo que es posible que este aspecto tenga gran influencia en la mayor parte de roturas de fundición gris, aunque no se haya generalizado su causa de fallo como corrosión.

#### 6.4.2. Ensayos en tuberías plásticas

En la primera fase del estudio se realizaron 367 ensayos para determinar las propiedades de tracción, flexión y rigidez, así como la densidad y tiempo de inducción a la oxidación (TIO) de muestras procedentes de roturas en tuberías plásticas. El número de muestras analizadas ha sido variable según el tipo de ensayo.

Los resultados obtenidos en primera fase centraron los ensayos de la segunda fase en el análisis del deterioro que sufre el polietileno debido a los agentes oxidantes presentes en los productos de desinfección del agua potable. Por ello se realizaron únicamente ensayos de TIO sobre 40 muestras seleccionadas en la segunda fase.

#### Ensayos en primera fase

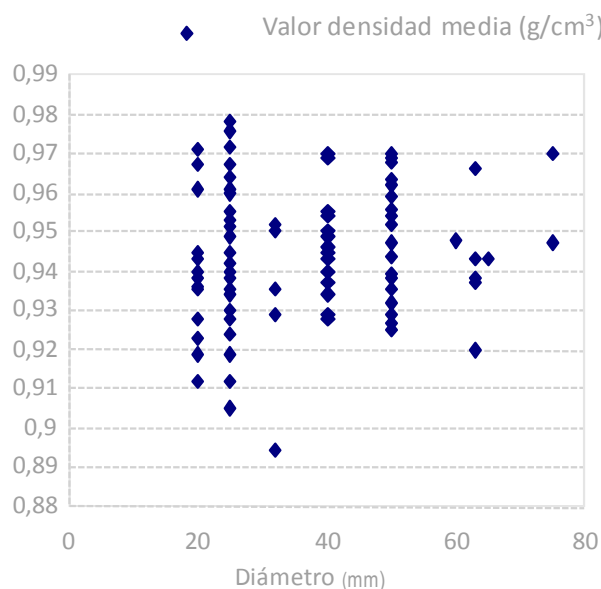
A excepción de una muestra de tubería general, las 100 muestras ensayadas a **tracción** pertenecían a acometidas de polietileno dentro de norma (15%), y fuera de norma (85%), cuya fecha de instalación era desconocida. El alargamiento en rotura de todas ellas fue inferior al 350% establecido como mínimo en la norma UNE EN 12201-2. Los valores obtenidos están uniformemente distribuidos, lo que puede indicar una variación en las propiedades físicas del material a lo largo del tiempo.

La **densidad** del polietileno permite diferenciar entre las distintas clases del mismo (baja, media, o alta densidad) dependiendo de la estructura interna del material. Aunque según la normativa los parámetros de fabricación pueden cambiar en función del color de los tubos de polietileno, las características físicas a corto plazo de la materia prima utilizada deben ser independientes de su color. Por eso se toma como umbral la densidad  $> 930 \text{ kg/m}^3$ .

Se ensayó la densidad de 125 muestras. El 100% de las muestras de polietileno dentro de norma tuvo una densidad por encima de los  $0,930 \text{ g/cm}^3$ , y un valor promedio de  $0,952 \text{ g/cm}^3$ . El 27% de las muestras de polietileno fuera de norma tuvo una densidad por debajo de  $0,930 \text{ g/cm}^3$ .

Se observó un amplio rango en los valores obtenidos de densidad (Figura 97) que puede deberse a los diferentes tipos de plásticos que engloba el polietileno fuera de norma. También se observó que las densidades más bajas se dan principalmente en diámetros menores de 25 mm.

**FIGURA 97. DENSIDAD MEDIA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) EN MUESTRAS DE POLIETILENO EN PRIMERA FASE**



En las normas de fabricación no se hace referencia a limitaciones en los resultados de los ensayos de **flexión**. El ensayo se realizó según UNE-EN 178, pero es en la norma UNE 53331 IN donde se indica respecto al “Esfuerzo tangencial de diseño a flexotracción” unos valores a corto plazo de  $30,0 \text{ N}/\text{mm}^2$  y a largo plazo de  $14,4 \text{ N}/\text{mm}^2$ , para unos coeficientes de seguridad de 2,5 y 2,0 respectivamente.

Estos valores orientativos se han utilizado como límites de intervalos para agrupar los resultados obtenidos de las 117 muestras ensayadas, pero no se pueden considerar como limitaciones de normativa por tratarse de un ensayo diferente. En cualquier caso, los resultados fueron muy dispersos, y la desviación promedio obtenida fue grande, lo que puede indicar diferentes comportamientos mecánicos para el mismo material, en diferentes instalaciones.

Se ensayó la rigidez anular de 25 muestras de edad desconocida. En la norma UNE-EN 13476 se indica que las tuberías deben diseñarse en una de las siguientes clases de rigidez anular SN ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) para tuberías con diámetro nominal menor de 500 mm: SN 4, SN 8 o SN 16. Se observó que la mayoría de las muestras se clasificaban como superiores a SN16 y, en ningún caso por debajo de SN8.

En esta primera fase no se identificaron relaciones claras entre los resultados de los ensayos y la causa aparente de fallo, la localización y el modo de fallo.

### Ensayos en segunda fase

El tiempo de inducción a la oxidación es un indicador del estado que mantendrá una tubería de polietileno a lo largo de su vida útil. El TIO remanente resulta un método adecuado para observar el grado de afectación de las conducciones plásticas en redes de abastecimiento por el empleo de agentes desinfectantes.

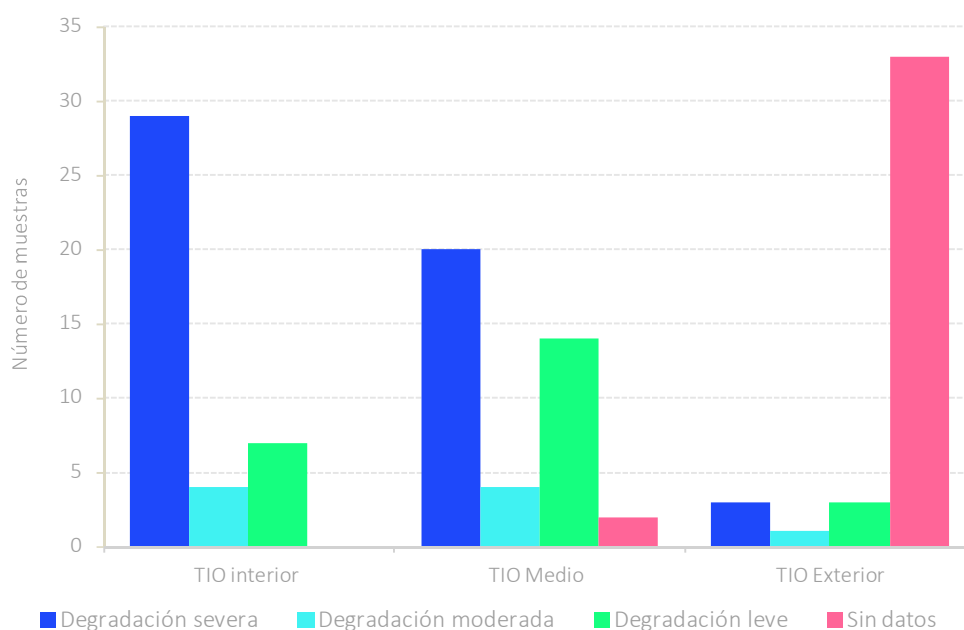
**En primera fase** se evaluó únicamente el estado de degradación de la superficie interna del tubo. En las 129 muestras ensayadas el TIO fue superior al valor de referencia tomado según UNE EN 12201 (TIO  $200^\circ\text{C} \geq 20 \text{ min}$ ).

En segunda fase se realizaron 255 ensayos de TIO procedentes del estudio de 40 muestras. Se llevaron a cabo sobre varias capas de un mismo tubo (capa en contacto con el agua, capa interna y capa superficial en contacto con el terreno), comparando los resultados obtenidos y determinando así el grado de afección del mismo. Si el tubo estaba afectado, la superficie interna de la tubería en contacto con el agente desinfectante presentaría un TIO inferior al que se puede determinar en la capa intermedia o en la superficie exterior del tubo debido al mayor consumo de los aditivos antioxidantes presentes en ella.

El examen visual de las muestras puso en evidencia que en la mayoría de ellas el marcado ya no era visible, figurando incompleto o parcialmente ilegible en un número reducido de las mismas, lo que dificultó la trazabilidad completa del material.

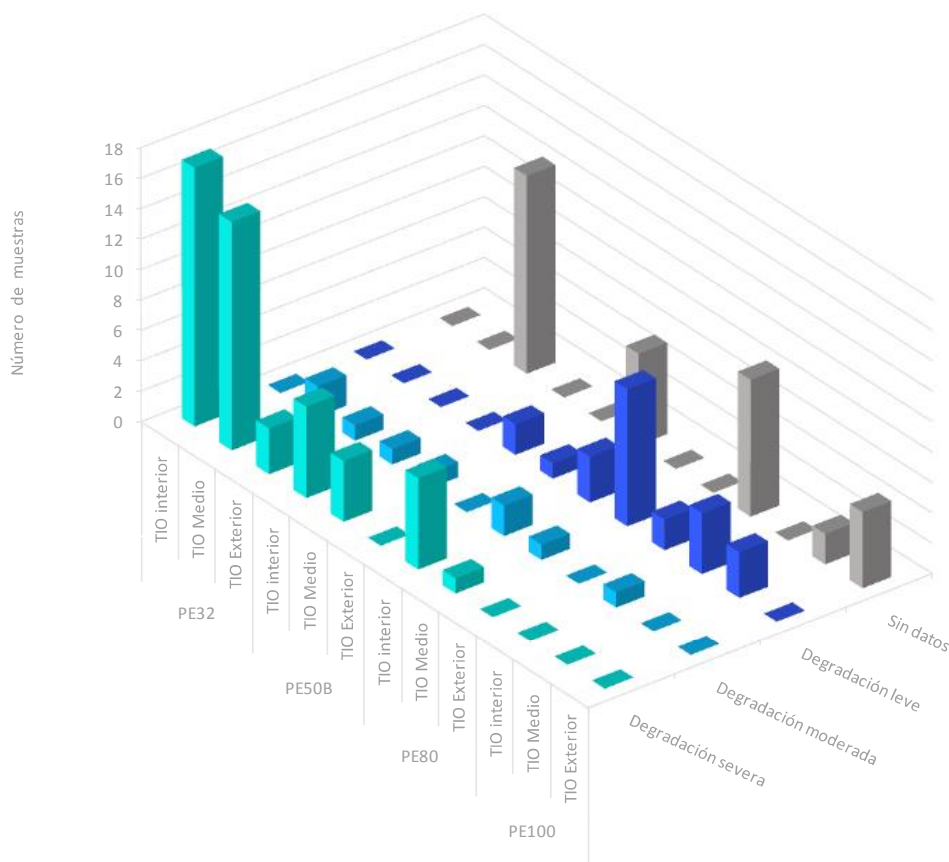
La selección de muestras se procuró realizar de forma homogénea por todo el territorio de la Comunidad de Madrid con el fin de establecer relaciones entre el grado de degradación y las fuentes de suministro o desinfección de Estaciones de Potabilización, Cloradoras y Depósitos.

FIGURA 98. DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA



Como el marcado de la mayoría de las muestras no era visible, previamente se realizó un análisis dimensional de las muestras, determinando para cada una de ellas su espesor promedio. De la comparación de estos valores con las tablas de espesores nominales de las normas UNE EN 12201 y UNE 53131 se estableció una correspondencia aproximada con la clase de material y presión nominal de la tubería; agrupando las muestras en PE32, PE50B, PE80 y PE100; permitiendo realizar así un análisis comparativo de los resultados obtenidos (Figura 99).

**FIGURA 99. DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL**



El primer grupo se corresponde con tubos negros cuyas dimensiones coinciden con el PE32. Los valores de TIO obtenidos son bajos, en la mayoría de los casos inferiores a cinco minutos presentando degradación severa tanto en la superficie interior como en la zona intermedia o exterior. No fue posible establecer la existencia de degradación oxidativa debida a los desinfectantes ya que el material con el que fue elaborada la tubería carecía ya de una cantidad de antioxidantes significativa.

El segundo grupo se corresponde con tubos negros cuyas dimensiones coinciden con la clase de material PE50B. Se observaron dos familias de materiales: la primera, que se corresponde con las muestras que presentan unos valores de TIO extremadamente bajos tanto en la superficie exterior como en la zona intermedia, se corresponde con tubos fabricados con material que de origen, sin añadir aditivo antioxidante; la segunda corresponde a tubos elaborados con material correctamente estabilizado que ha sufrido un intensa degradación oxidativa en la superficie interior fruto del efecto de los antioxidantes.

El tercer grupo de muestras se corresponde con tubos negros, sin banda azul, cuyas dimensiones coinciden con la clase de material PE80. En este grupo encontramos unas pocas muestras para las que el valor del TIO en la superficie interior de la tubería es superior a los 60 minutos y en las que el efecto de la degradación oxidativa es inapreciable. Junto a ellas hay un grupo mayor de muestras para las que existe una pérdida significativa de antioxidantes en la superficie interior respecto de los valores de TIO hallados en la zona intermedia o en la superficie exterior. Tan sólo en una de las muestras se registra un valor del TIO muy bajo, tanto en la superficie interna como en la zona intermedia, lo cual es impropio de este tipo de material (PE80).

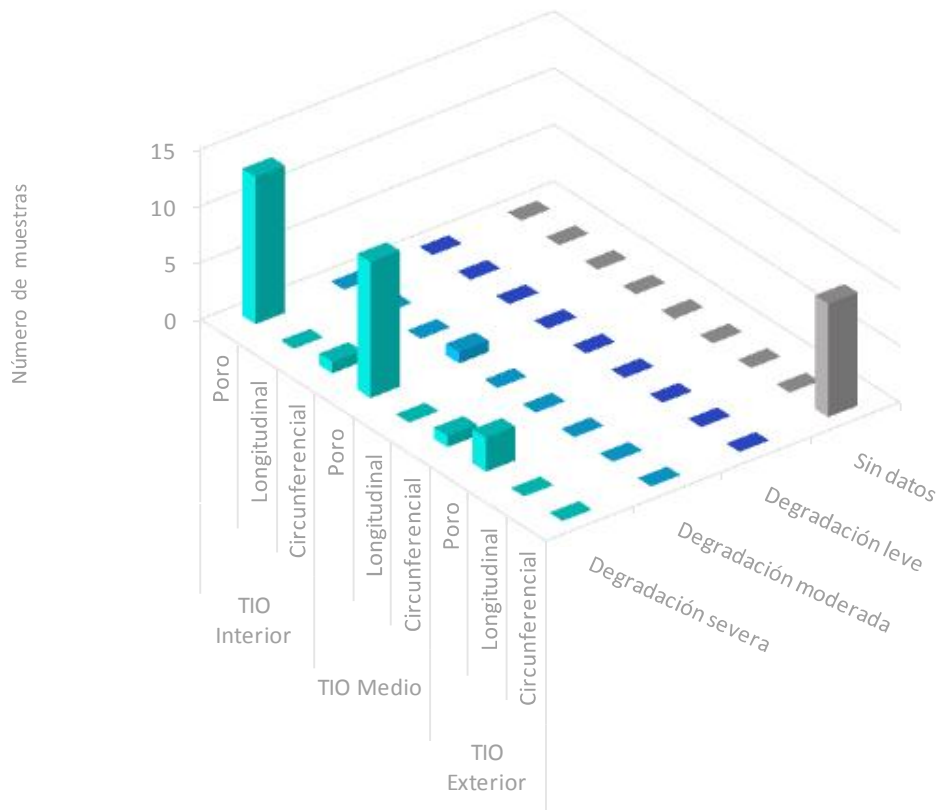
Se observa que el último grupo de muestras, que se corresponde con tubos negros con banda azul cuyas dimensiones coinciden con la clase de material PE100, presentó valores de TIO algo más elevados en la superficie interna que en la externa. Es posible que este bajo estado de degradación pueda deberse a que es un material de reciente instalación, posterior a 2009, lo que implica que además de ser el material que mejores prestaciones tiene frente a la oxidación, ha estado menos tiempo expuesto a los agentes desinfectantes presentes en el agua.

Se realizó la georreferenciación de las muestras mediante herramientas GIS para establecer relaciones entre el nivel de degradación de los tubos y las fuentes de suministro. Se sospecha que la zona noreste presenta mayores evidencias de oxidación; sin embargo la dispersión de resultados obtenidos en cuanto a variabilidad de materiales instalados y la falta de muestras en varias zonas no permitió establecer conclusiones claras que muestren relación directa con el origen del suministro.

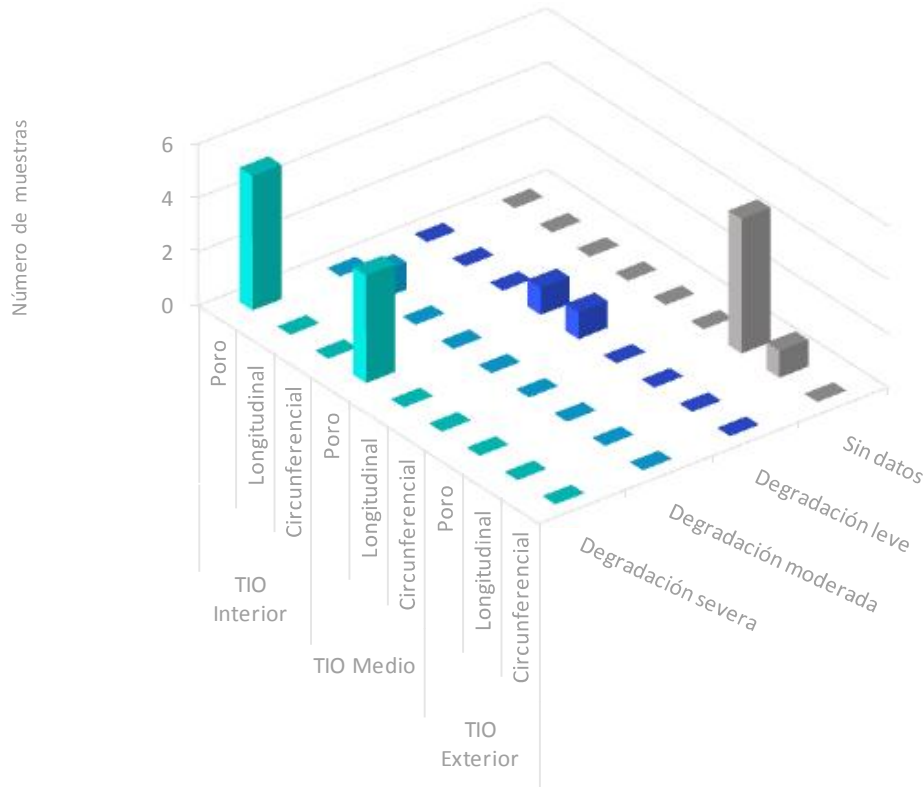
En último lugar se estudió la existencia de relaciones entre los valores medios obtenidos en los ensayos y la causa y el modo de fallo. Eliminando del análisis las roturas provocadas y aquellas donde el fallo no se localizó en pared de tubo, se observó relación entre aquellas muestras que presentan un bajo TIO y el modo de fallo tipo poro, principalmente en tubos clasificados como PE32 (Figura 100) y PE50B (Figura 101).

Agrupando los valores encontrados de TIO en la superficie interior y relacionándolos con el modo de fallo, se observó que el 90% de los casos en los que la rotura es de tipo poro se dan en PE32 y PE50B, obteniendo un TIO menor de 5 minutos. Estos casos se relacionaron con defectos de material o con defectos de instalación de la tubería.

**FIGURA 100. RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ENSAYOS TIO EN PE32 Y MODO DE FALLO**



**FIGURA 101. RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ENSAYOS TIO EN PE50B Y MODO DE FALLO**



### 6.4.3. Ensayos en suelos

La caracterización de suelos se llevó a cabo en dos partes. En la primera fase de los trabajos se ensayó un número de muestras elevado generando gran cantidad de resultados variados, pues no se realizó el mismo número y tipología de ensayos a todas las muestras, mientras que en la segunda fase se mantuvo el número y tipología de ensayos a todas las roturas muestradas. El resultado fue un menor número de muestras pero con un mayor número de aspectos analizados que posibilitan la caracterización completa del material usado en el relleno.

De esta forma, se presentan en primer lugar, los resultados de cada uno de los ensayos realizados para las muestras disponibles de ambas fases ya sean *in situ* o en laboratorio, y en segundo lugar, la clasificación del suelo de relleno, de acuerdo a la normativa vigente de Canal de Isabel II para las muestras de la segunda fase.

#### Ensayos de laboratorio

A continuación se exponen los resultados de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, contenido en sulfatos y sales solubles, contenido en materia orgánica, índice de CBR, pH, expansividad en el aparato de Lambé, humedad y resistividad del suelo.



### Granulometría

Se analizaron 185 muestras (127 en primera fase y 58 en segunda fase), procurando que los suelos estuvieran en contacto con el tubo, o si esto no era posible, que estuvieran sobre la vertical de la generatriz superior del mismo.

Para analizar los resultados de estos ensayos en todas las muestras se emplearon como criterios de referencia los límites aconsejados en la Norma para redes de Abastecimiento de Canal Gestión (versión 2012), acordes con lo establecido en el artículo 330 del PG-3.

Tanto en el caso de los suelos seleccionados como en los adecuados, se establecen parámetros de referencia en cuanto a la granulometría, fijando para ambos el tamaño máximo del árido como no superior a 100 milímetros ( $D_{max} \leq 100 \text{ mm}$ ). En el caso de los suelos seleccionados, el cernido por el tamiz 0,40 UNE debe ser menor o igual que el quince por ciento ( $\# 0,40 \leq 15\%$ ) o, que en caso contrario cumpla todas y cada una de las condiciones siguientes:

- Cernido por el tamiz 2 UNE, menor del ochenta por ciento ( $\# 2 < 80\%$ ).
- Cernido por el tamiz 0,40 UNE, menor del setenta y cinco por ciento ( $\# 0,40 < 75\%$ ).
- Cernido por el tamiz 0,080 UNE inferior al veinticinco por ciento ( $\# 0,080 < 25\%$ ).
- Límite líquido menor de treinta ( $LL < 30$ ), según UNE 103103.
- Índice de plasticidad menor de diez ( $IP < 10$ ), según UNE 103103 y UNE 103104.

En el caso de los suelos adecuados, el cernido por el tamiz 2 UNE debe ser menor del ochenta por ciento ( $\#2 < 80\%$ ) y el cernido por el tamiz 0,080 UNE debe ser inferior al treinta y cinco por ciento ( $\#0,080 < 35\%$ ).

En todas las muestras se ha confirmado que el tamaño máximo del árido era inferior a 100 mm. Además, se ha observado que en el 37% de las muestras, todo su peso pasaba por el tamiz de 20 UNE, en el 10% de las muestras el cernido por el tamiz 0,40 UNE era inferior al 15%, y sólo el 12% de las muestras presentaron un cernido por el tamiz de 0,08 UNE inferior al 35%. No obstante, la clasificación del tipo de relleno, de acuerdo con el PG-3, se efectúa más adelante en el apartado "Resistencia de suelos".

### Limites de Atterberg

Se han realizado 157 ensayos de límites de Atterberg. El Índice de plasticidad está directamente relacionado con el contenido en finos y la proporción de arcillas sobre éstos. Al igual que en la granulometría se consideran los límites de referencia del artículo 330 del PG-3. El 38% de las muestras ensayadas presentaban baja plasticidad ( $IP < 10$ ), un 51% presentaron plasticidad normal, y un 11% fueron muy plásticos ( $IP > 20$ ).

### 💧 Sales solubles

Sólo se ha realizado este ensayo en primera fase, estudiando un total de 17 muestras. De acuerdo con el PG 3, el contenido en sales solubles en agua, incluido el yeso, debe ser inferior al cero con dos por ciento ( $SS < 0,2\%$ ), según NLT 114/99, tanto para suelos seleccionados como para suelos adecuados. En el caso de suelos tolerables el contenido de yeso se limita al 5%, y el de sales solubles al 1%.

De los ensayos ejecutados se desprende que de la mayoría de las sales solubles que forman parte del terreno, sólo una muestra ha presentado una concentración inferior al 2% en sales solubles; un 64% se han presentado en un rango de 0,4% a 0,8% (porcentaje en peso de la muestra); un 30% tenían concentraciones de sales solubles menores de 0,4% en peso; y un 6% mayores de 0,8%. Por último, se ha observado que todas estaban por debajo del 1%.

### 💧 Contenido en Sulfatos

Para clasificar el tipo de agresión del suelo se utiliza la EHE<sup>8</sup>, los límites de 2.000-3.000 mg/kg se consideran ataque débil, 3.000-12.000 mg/kg ataque medio, y 12.000 mg/kg ataque fuerte.

Se realizaron 175 ensayos de determinación de contenido de ion sulfato. El 3% de las muestras ensayadas presentó un contenido muy alto de sulfatos (superior a 12.000 mg/kg) coincidiendo con terrenos clasificados como agresivos, y un 2% como ataque medio. De ellas, la que presentaba mayor contenido, se correspondió con una muestra de fundición dúctil con causa de fallo corrosión; en la que se conjugaba la presencia de yesos en los suelos aledaños, la cercanía a una línea férrea, y su situación en una zona de difícil drenaje.

### 💧 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica también viene limitado por la caracterización del suelo en el PG-3, donde se fija un contenido en materia orgánica inferior al cero con dos por ciento ( $MO < 0,2\%$ ), según UNE 103204 para suelos seleccionados; inferior al 1% para suelos adecuados; inferior al 2% para suelos tolerables; e inferior al 5% para suelos marginales.

Se realizó el ensayo de contenido en materia orgánica con permanganato potásico en 75 muestras, entre ambas fases. Los resultados mostraron valores de materia orgánica inferiores al 0,2% para el 57% de las muestras; el 35% de las muestras presentaron valores entre el 0,2 y el 1% de materia orgánica. No obstante, se cumplieron en todas las muestras las condiciones establecidas en la norma UNE 103204 para cada categoría de suelo.

---

<sup>8</sup> EHE El Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la "Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)" tiene por objeto regular el proyecto, ejecución y control de las estructuras de hormigón, tanto en obras de edificación como de ingeniería civil, al objeto de conseguir la adecuada seguridad de las mismas, preservando la de las construcciones que en ella se sustentan y la de los usuarios que las utilizan. <http://www.fomento.gob.es/>

### 🔹 Índice de CBR<sup>9</sup>

El PG-3 indica en su punto 330.4.1 **Uso por zonas**: “El índice C.B.R. será igual o superior a 5 .... si se trata de suelos utilizados en coronación de terraplenes”, e “igual o superior a 3 ..... si su empleo tiene lugar tanto en cimientos como en núcleo de dichos terraplenes”.

Este tipo de ensayo sólo se realizó en primera fase, analizando 13 muestras. En todos los ensayos realizados se superó la segunda de las condiciones señaladas anteriormente; y en todos, salvo en uno, se cumple la condición de suelos para colocación en coronación.

Finalmente, casi un 70% de las muestras ensayadas superaban el valor de CBR 10, por lo que eran suelos muy competentes para el soporte de cargas.

### 🔹 pH

Se analizó el pH de 73 muestras entre ambas fases. En casi todos los casos se obtuvieron suelos básicos ( $\text{pH} > 7$ ); salvo en dos, que mostraron valores de pH ligeramente ácidos ( $5 < \text{pH} < 7$ ).

### 🔹 Expansividad en el Aparato de Lambé

Una problemática a tener en cuenta en algunas zonas de la Comunidad de Madrid, es la presencia de suelos arcillosos expansivos, dado que pueden comprometer la estabilidad de los terrenos, provocando asentamientos diferenciales, lo que puede provocar que la tubería enterrada tenga que soportar esfuerzos superiores a los previstos en su cálculo, y consecuentemente puede provocar el agrietamiento y/o ruptura de la tubería. En Madrid las arcillas expansivas se encuentran en determinadas zonas, fundamentalmente en los dominios arcillosos consolidados y en las zonas de yesos.

Se analizaron 175 muestras entre las dos fases. El 96% de los suelos no mostró problemas de expansividad.

### 🔹 Determinación de la humedad del suelo, el grado de saturación, y la porosidad

En la determinación de la humedad de los suelos cabe mencionar que en su mayoría las muestras estaban alteradas por la manipulación de las mismas, en las zanjas, durante las reparaciones y por el agua procedente de la rotura de la tubería.

Se analizaron 165 muestras entre ambas fases, tomadas en la zona con menor alteración posible. El 13% de las muestras analizadas en primera fase tenía más del 20% de humedad. No obstante, dado que en la segunda fase las muestras presentaban el 100% de humedad se ha deducido que no se podían obtener resultados concluyentes.

Únicamente, se observó que las muestras con valores de Humedad/Porosidad próximos a 0,5 (23% de las muestras) presentaron mayores efectos de corrosión.

<sup>9</sup> CBR

California Bearing Ratio

### 💧 Resistividad del suelo

Se analizó una única muestra correspondiente a una rotura de fundición dúctil de 500 mm, instalada en 1982, que presentaba una fisura de un metro de largo en forma de arco y de unos 7 mm de ancho, observándose una reducción del material de la superficie del tubo, junto con una evidente corrosión.

La corrosividad, que viene dada por la resistividad de un suelo, afecta a las condiciones de las tuberías y por tanto a sus roturas. Por lo que, junto con la toma de muestra de suelo, se decidió realizar un ensayo de tomografía eléctrica.

El análisis en laboratorio de la muestra indicó que el tipo de suelo ensayado tenía un alto contenido de sulfatos, y que por tanto era muy agresivo (limos de alta plasticidad con elevada expansividad (yesos)).

Los resultados de la tomografía indicaron que el sustrato natural de la zona presentaba abundantes cambios laterales con una marcada variabilidad en su resistividad, llegando a sobrepasar el umbral propuesto en la norma UNE EN 545.

### En sayos *in situ*. Resistencia de suelos

En la segunda fase del estudio, los resultados de los ensayos de las muestras de suelo, fueron complementados con valores obtenidos por penetrómetros de dial para caracterizar el grado de compactación de la cama y del relleno presentes en la zanja de las muestras.

El ensayo se realizó sobre roturas a las que se pudo tener acceso a la zanja, obteniendo 438 lecturas de la resistencia que opone el suelo a la penetración del puntal utilizado. Este parámetro fue medido en la zanja en la zona menos alterada por la rotura.

En la Tabla 15, se presentan los valores medios obtenidos en ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) según las causas y la localización del fallo. En el caso de localización de la rotura en junta, pieza especial o accesorio, los fallos ocasionados por características del material y por asentamientos del terreno presentan valores algo inferiores. Este hecho coincide con la bibliografía consultada en la que se relacionan fallos producidos en los elementos de unión u otros accesorios con una menor compactación del relleno y de la cama, favoreciendo así desplazamientos diferenciales en las tuberías.

El estudio de la resistencia a la penetración del suelo y el modo de fallo (Tabla 16), parece indicar que suelos con menor resistencia presentan roturas en modo poro. No se observó relación alguna del análisis de la resistencia del suelo junto con el material.

**TABLA 15. RESISTENCIA PENETRACIÓN KG/CM<sup>2</sup>. CAUSAS DE FALLO-LOCALIZACIÓN DEL FALLO**

CAUSAS DE FALLO	Localización		
	Junta, Pieza Especial o Accesorios	Pared Tubo	Total
<b>Agentes externos</b> (Raíces, heladas y sobrecargas externas)	5,167	4,191	4,270
<b>Agentes externos</b> (Provocadas)		4,283	4,283
<b>Características del material</b> (Corrosión y defecto de material)	3,740	4,149	4,084
<b>Condiciones de instalación</b> (Asentamientos del terreno y defectos de instalación)	3,873	3,980	3,953
<b>Operación de la red</b> (Variaciones de presión/maniobras y fatiga)	5,000	3,853	3,890
<b>Otras causas</b>	4,550	2,860	3,343
<b>TOTAL</b>	<b>3,971</b>	<b>4,049</b>	<b>4,035</b>

**TABLA 16. RESISTENCIA PENETRACIÓN KG/CM<sup>2</sup>. MODO DE FALLO**

MODOS DE FALLO	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Circunferencial</b>	4,047
<b>Longitudinal</b>	4,063
<b>Explosiva</b>	3,898
<b>Poro</b>	3,064
<b>Agujero &gt; 1 cm</b>	4,363
<b>Fuga</b>	4,028
<b>Otro</b>	4,018
<b>TOTAL</b>	<b>4,035</b>

### **Clasificación del material de relleno**

La normativa de Canal de Isabel II Gestión (2012) es acorde con lo establecido en el artículo 330 del PG-3 en cuanto a la clasificación de los materiales, donde se definen las condiciones a cumplir para cada categoría de suelo.

Para las 56 muestras de segunda fase se ha podido clasificar el material del relleno a partir de los ensayos de contenido en materia orgánica, granulometría, límite líquido y límite plástico. En esta fase se optó por estudiar el contenido en sulfatos, en lugar del contenido en sales solubles, por lo que a excepción de los datos de este ensayo, y de acuerdo con los parámetros y límites establecidos en el PG-3 se han obtenido los siguientes resultados:

- 3 muestras han sido clasificadas como suelo seleccionado y 8 como suelo adecuado. De todas ellas, sólo en tres la causa de fallo está relacionada con defectos de instalación.
- 32 muestras han sido clasificadas como suelo tolerable, presentando como causa de fallo por asentamientos un 50% de las mismas, y un 16% por sobrecargas externas.
- 11 muestras corresponden con suelos marginales y 2 con suelos inadecuados por su elevado contenido en materia orgánica. De todas ellas, un 54% fallaron por corrosión, un 36% por asentamientos, un 31% presentaron rotura por sobrecargas.

## **6.5. ANÁLISIS DETALLADO DE LOS RESULTADOS Y RELACIONES OBSERVADAS**

Una vez estudiada la distribución de los fallos atendiendo de forma independiente a la edad, diámetro y material del elemento de rotura, y tras la tipificación y valoración de las causas, localización y modo de fallo para los registros de la muestra, se pasó a analizar las relaciones entre cada uno de estos factores.

El estudio individualizado de cada uno de ellos ha aportado una primera idea del comportamiento de los elementos y da indicios de que un análisis posterior podría completar los datos observados.

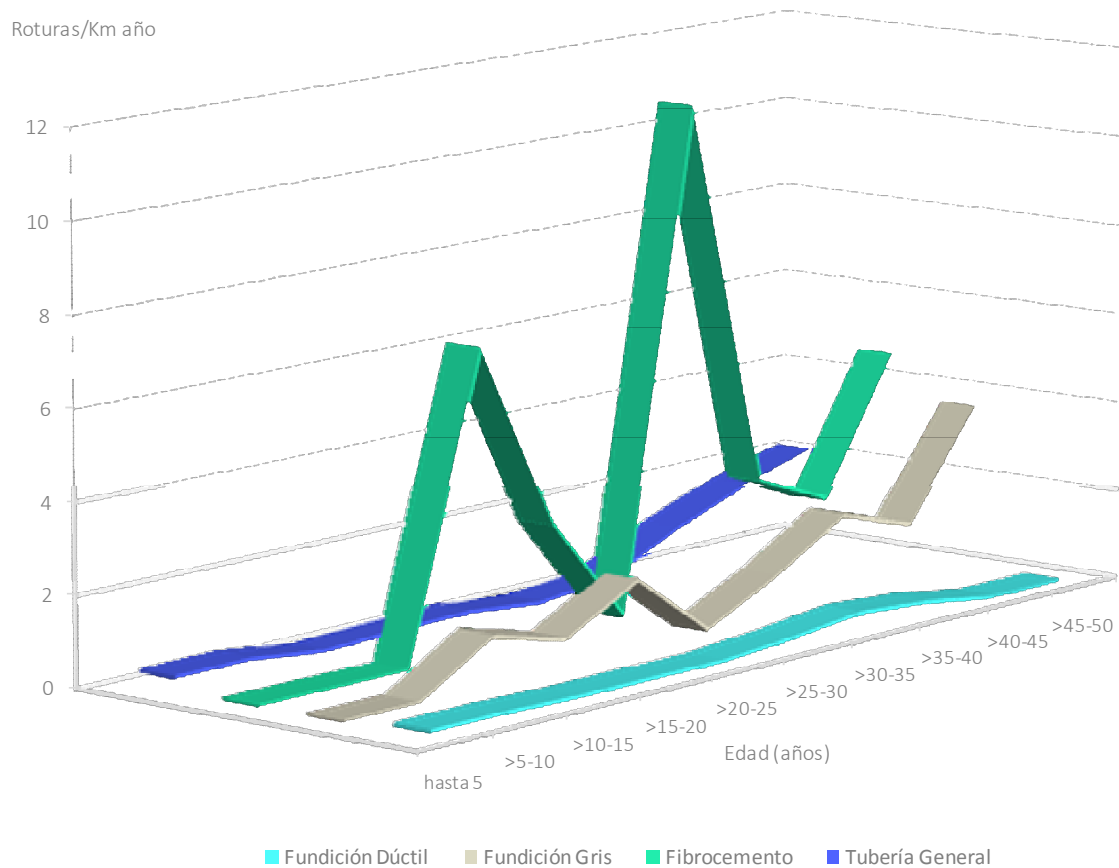
Mediante un análisis conjunto de estos parámetros se podrían extraer conclusiones que aportasen un valor añadido al presente trabajo.

### **6.5.1. Curvas de fallo: relación edad y material**

Se analizaron las curvas de fallo de los tres principales materiales de tubería general presentes en la muestra de roturas, que además coincidían con los mayoritariamente presentes en la red de Canal de Isabel II: fibrocemento, fundición gris y fundición dúctil.

En la Figura 102 se representan las curvas de fallo-edad a partir del ratio de roturas por kilómetro de estos tres materiales y de la tubería general. Se ha aplicado un factor de corrección para cada material que permite ajustar de forma más precisa la curva a la realidad, ya que se obtiene al dividir para cada uno de los materiales el número de roturas totales en el periodo que comprende la muestra por el número de roturas visitadas.

**FIGURA 102. CURVAS COMPARATIVAS DE FALLO-EDAD (ROTURAS/KM)**



Se observó que el fibrocemento es el material con mayor índice de roturas por kilómetro y tiene mayor probabilidad de fallo en el rango de edad de 30 a 35 años. La fundición gris también presentó, aunque en menor medida, un índice elevado de roturas por kilómetro que aumenta con la edad de las tuberías.

La curva de fundición dúctil difiere de las de fibrocemento y fundición gris ya que su índice de rotura es mucho menor. La similitud entre las curvas de fundición dúctil y tubería general se debe a la elevada presencia de este material en la red de abastecimiento desde hace 30-35 años, hasta la actualidad.

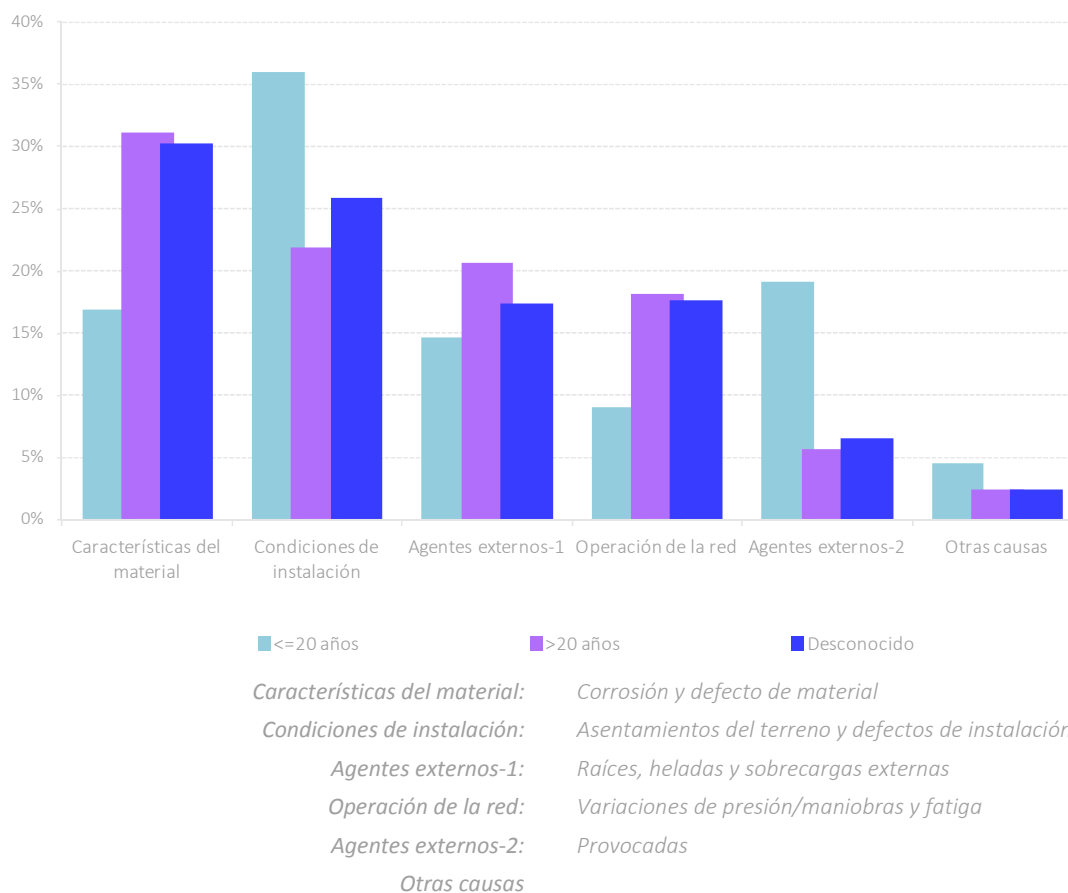
Este gráfico no se ha realizado de forma análoga para el caso de las acometidas por carecer de información suficiente acerca de su edad y de los kilómetros de red de acometida instalada.

### 6.5.2. Relación entre edad y causa de fallo

Si se tiene en cuenta la edad de la instalación para tubería general, cabe destacar la gran incidencia, cerca del 40%, de las condiciones de la instalación en tuberías de antigüedad inferior a 20 años. Se muestra la distribución de las diferentes causas de fallo, según la edad de la tubería general, en la gráfica de la Figura 103. En el caso de las acometidas, no se disponía de información suficiente para relacionar la edad de las mismas con la causa de fallo.



**FIGURA 103. CAUSAS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL, EN FUNCIÓN DE LA EDAD**



En la gráfica de la Figura 103 se puede observar que las tuberías más jóvenes fallaron más frecuentemente por motivos asociados con condiciones en la instalación (36% del total de roturas en tubería general, con antigüedad inferior a 20 años) y por causas provocadas (19%). En paralelo, a partir de edades de 20 años las tuberías rompen, principalmente, por efecto de la corrosión y por defectos del material (31%), que probablemente estén asociados a procedimientos de fabricación que en su momento tenían otros estándares.

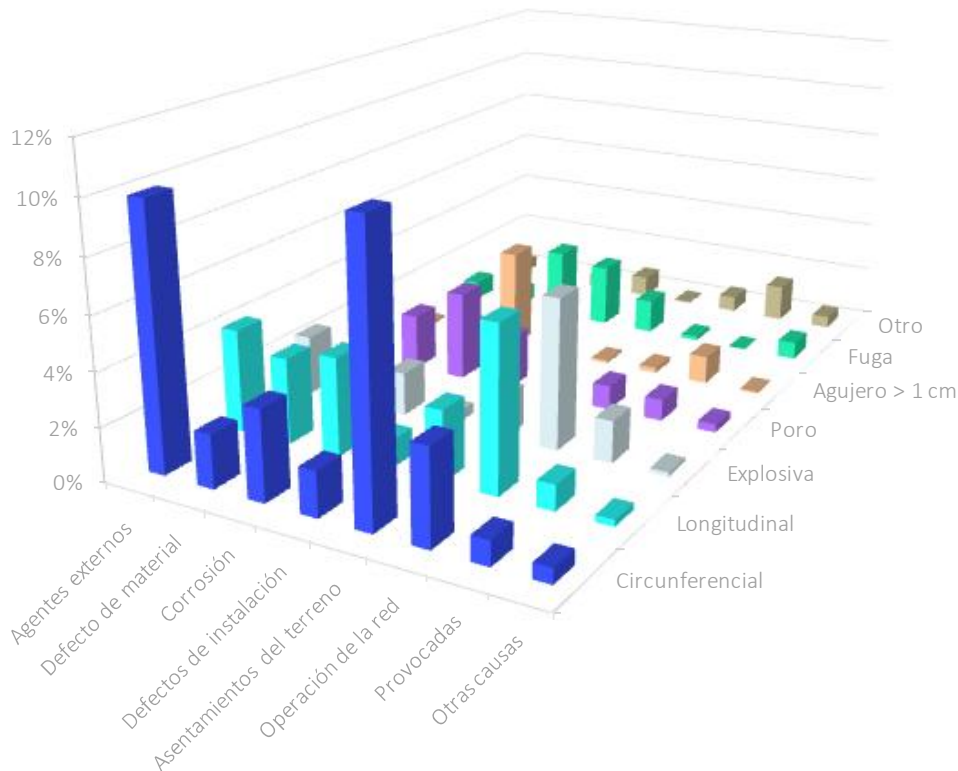
### 6.5.3. Relación entre causa y modo de fallo

A continuación se presentan las relaciones observadas entre las causas y los modos de fallo en los elementos de la muestra. Se analizó, de forma independiente, la muestra relativa a tubería general y la de acometida, a través del valor de la probabilidad de ocurrencia.

Desglosando las causas de fallo se ha observado, en el caso de **tubería general**, que las causas con mayor probabilidad de ocurrencia fueron la corrosión (20%), las presiones o maniobras no habituales (16%) y los asentamientos del terreno (16%).

Se ha llegado a la conclusión de que la corrosión (20% del total de roturas en tubería general) está ligada a varios modos de fallo, pero que predomina la forma de agujero (probabilidad de 3,9%), seguido del modo longitudinal (3,7%), poro (3,5%) y circunferencial (3,4%). Los fallos debidos a la operación de la red están vinculados a las roturas longitudinales (6,2%), así como a las roturas explosivas (5,7%), según refleja gráficamente la Figura 104. La corrosión, por lo general, se asocia al modo de fallo en forma de agujeros, y las variaciones de presión, a los modos de fallo de roturas longitudinales y explosivas. Esto se justificó debido a que probablemente fueron desencadenadas por algún tipo de sobrecarga (externas, golpes de ariete, etc.) que una tubería en buen estado habría podido resistir.

**FIGURA 104. RELACIÓN ENTRE LAS CAUSAS Y LOS MODOS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL DE LA MUESTRA**



*Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Defecto de material*

*Corrosión*

*Defectos de instalación*

*Asentamientos del terreno*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Provocadas*

*Otras causas*

Además, existe un elevado número de roturas correspondiente a fallos por agentes externos (18%). Tanto los fallos registrados por asentamientos del terreno como los correspondientes a sobrecargas externas están unidos a roturas de forma circunferencial (probabilidad de 11% y 10% respectivamente). En cambio, los defectos de instalación se han ligado a las fugas (3%), entre las que se consideran las fugas en las uniones entre tubos.

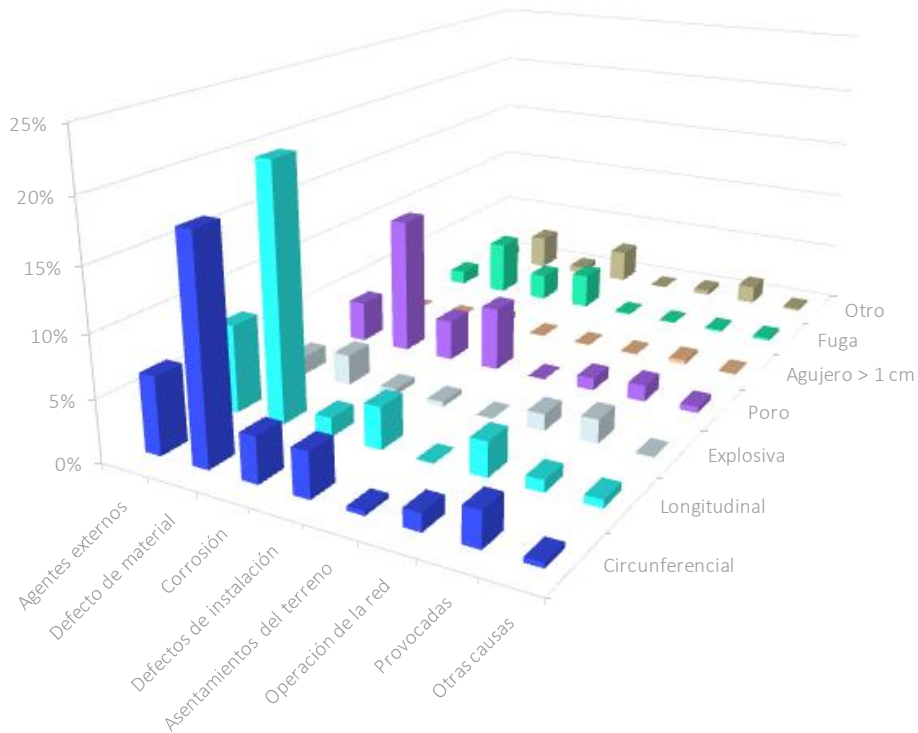
Las causas de fallo se pueden relacionar con las tensiones a las que está sometida la tubería. Las tensiones longitudinales están ligadas a las roturas circunferenciales y las tensiones transversales provocan roturas longitudinales. Se ha visto que la causa de roturas de operación de la red se asocia en su mayor parte al tipo de rotura longitudinal, porque la presión del agua da lugar a tensiones axiales sobre las paredes de la tubería que hacen que se rompa según este modo de fallo. Sin embargo, la causa de asentamiento de terreno podría estar atada al mismo tipo de modo de fallo, porque provoca tensiones radiales en sentido opuesto. Puede que el asentamiento de terreno dé lugar a un momento flector que provoca que las tuberías se rompan de forma circunferencial. Por ello, habría que analizar el tipo de asentamiento de terreno, y diferenciar si provoca fuerzas distribuidas a lo largo de la tubería o fuerzas puntuales. Se observó como aspectos más comunes a la causa de fallo por asentamiento del terreno la fractura circular o cercana a ésta y, en muchos casos, una desalineación entre los tramos formados y la zona central del tubo.

Lo mismo sucede con las sobrecargas externas, que se han relacionado principalmente con la forma de fallo circunferencial. Habría que distinguir entre el tipo de fuerza (puntual o distribuida), porque el tráfico por lo general se ha asociado a roturas longitudinales. La carga de tráfico provoca además de flexión y de un cortante en la tubería, que vendría dado por las condiciones de apoyo de la misma, esfuerzos axiales que son los que generan roturas longitudinales.

Para el caso de **acometidas** (Figura 105), se puede observar que a la causa de defecto de material fue la que tuvo mayor probabilidad de ocurrencia (61%), que se corresponde, en gran parte, con el modo de fallo longitudinal (probabilidad de 21% sobre el total de roturas en acometidas) y circunferencial (18%). También es relevante para este tipo de causa, pero en menor medida, el modo de fallo tipo poro (12%).

Le siguen los agentes externos (20%) y defectos de instalación de la tubería (19%), conectados principalmente al modo de fallo longitudinal (7%) y tipo poro (5%) respectivamente.

FIGURA 105. RELACIÓN ENTRE LAS CAUSAS Y LOS MODOS DE FALLO EN ACOMETIDA DE LA MUESTRA



*Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas*  
*Defecto de material*  
*Corrosión*  
*Defectos de instalación*  
*Asentamientos del terreno*  
*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*  
*Provocadas*  
*Otras causas*

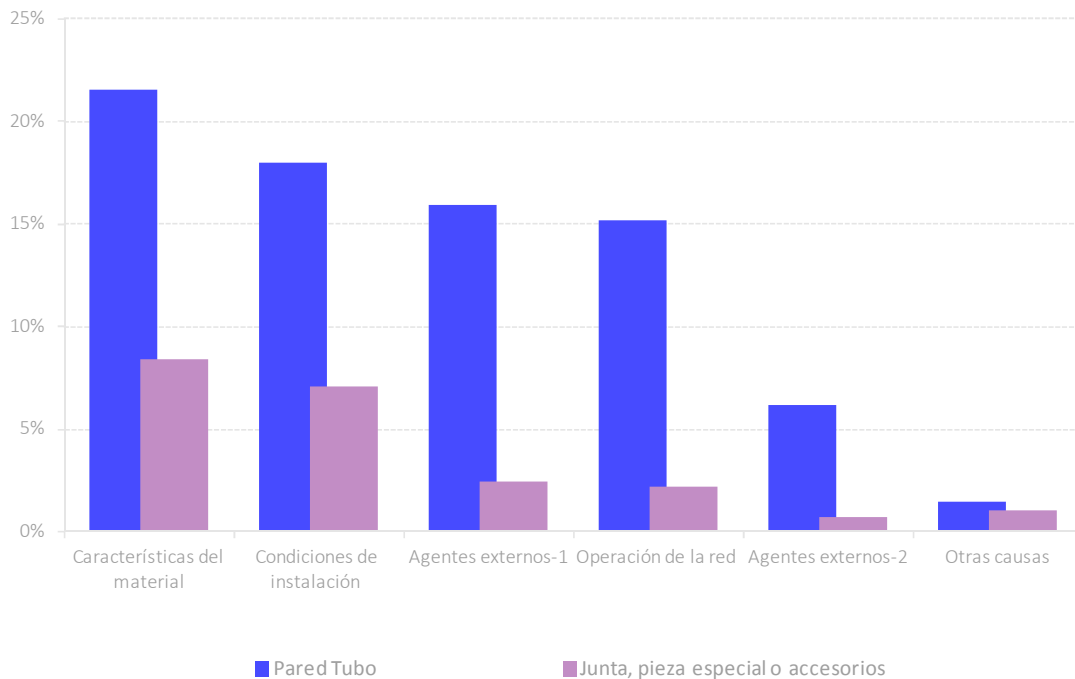
#### 6.5.4. Relación entre causa y localización del fallo

En este apartado se presenta el análisis de las relaciones existentes entre las causas y la localización del fallo. El estudio se realizó por separado para tubería general, acometida y conjunto de medida, a partir de los datos de la muestra de rotura.

En el caso de tubería general y acometidas se han diferenciado, por un lado, las roturas en pared de tubo y por otro, en junta, pieza especial o accesorio, analizando su distribución en función de la causa de fallo.

En **tubería general** (Figura 106) se observó que las roturas en pared de tubo son predominantes en todos los grupos, independientemente de la causa que desencadena la rotura, destacando especialmente en las roturas ocasionadas por corrosión y defectos del material.

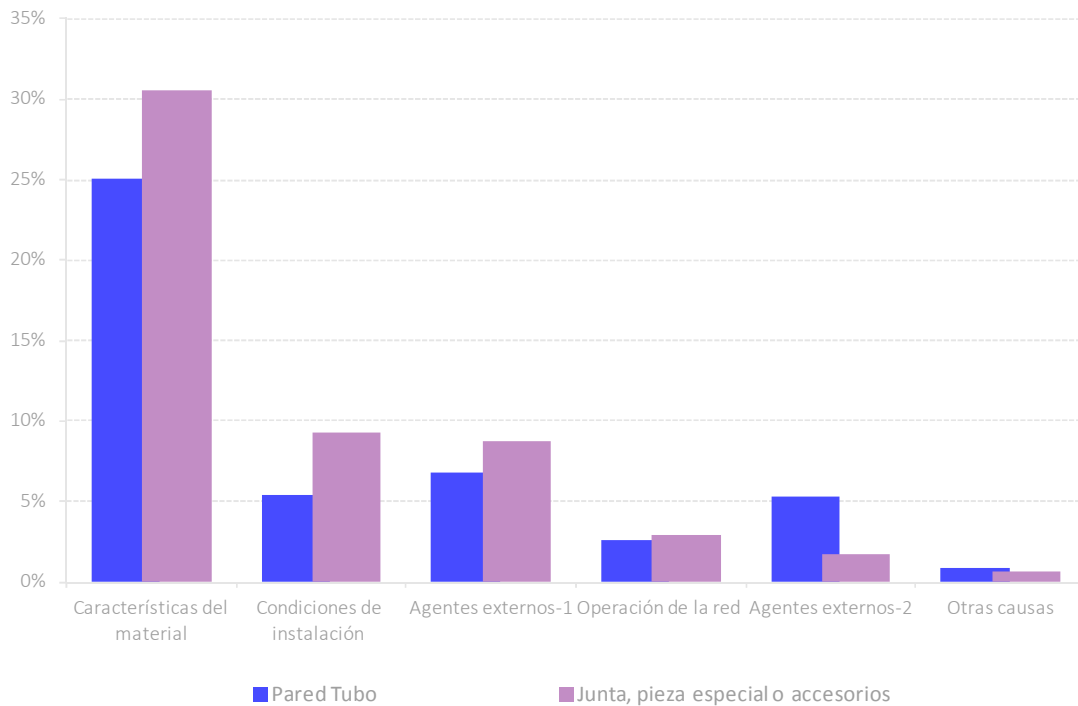
**FIGURA 106. CAUSAS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL - LOCALIZACIÓN ROTURA**



*Características del material: Corrosión y defectos de material*  
*Condiciones de instalación: Asentamientos y defectos de instalación*  
*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*  
*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*  
*Agentes externos-2: Provocadas*  
*Otras causas*

En cuanto a las acometidas, la relación entre las causas de fallo y la localización de las roturas (Figura 107), mostró que los defectos de material, están relacionados con el alto porcentaje de estos fallos en junta, pieza especial o accesorio, tanto para el primer tramo, como para el segundo tramo de acometidas.

**FIGURA 107. CAUSAS DE FALLO EN ACOMETIDAS - LOCALIZACIÓN ROTURA**



*Características del material: Corrosión y defectos de material*

*Condiciones de instalación: Asentamientos y defectos de instalación*

*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Agentes externos-2: Provocadas*

*Otras causas*

Por otra parte, para los **conjuntos de medida** (Figura 108), al comparar el elemento de rotura frente a las causas de fallo se apreció que todos los elementos que fallaron lo hicieron, principalmente, debido a las características del material (76% del total de roturas en conjuntos de medida).

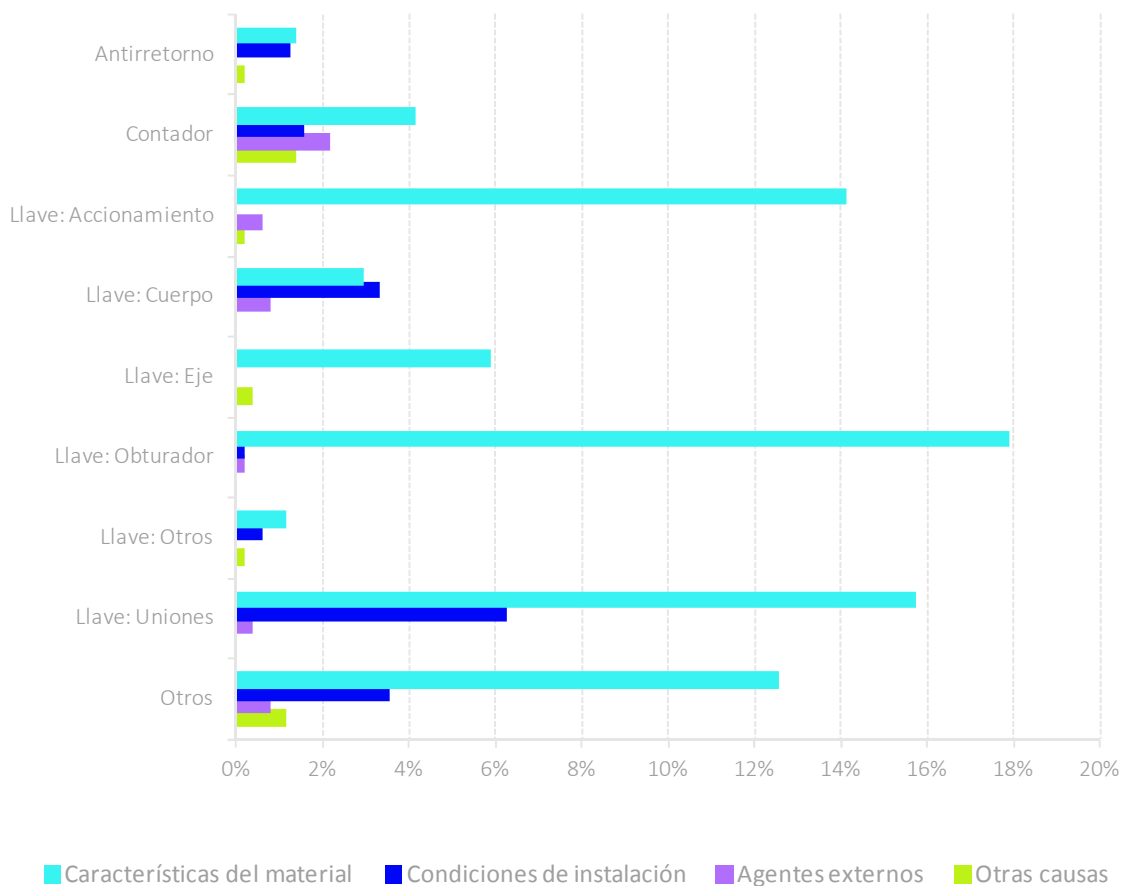
Un porcentaje muy elevado de las roturas registradas se debieron a la corrosión o desgaste en el accionamiento, las uniones y el obturador de las llaves, los cuales están mayoritariamente constituidos por hierro y bronce, o latón, respectivamente.

El 74% de los conjuntos de medida estudiados no cumplían la normativa de acometidas vigente en cuanto a las características del alojamiento, tanto de los armarios prefabricados que carecían de cerradura o incluso puerta en algunos casos, como de las arquetas, que presentaron gran variabilidad en cuanto a formas y dimensiones. Además, se debe tener en cuenta que alrededor del 50% de los conjuntos de medida se encontraron en un estado de conservación defectuoso (suciedad, corrosión, ausencia de elementos...), aunque es preciso mencionar que el criterio empleado para ello fue subjetivo, yendo en función del personal que visitó las roturas que constituyen la muestra.

En los casos en que se consideró que el estado del conjunto de medida era aceptable, lo que más falló fueron las uniones de las llaves.

Cuando el estado del conjunto de medida fue defectuoso, había mayor variabilidad de causas.

**FIGURA 108. DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS SEGÚN ELEMENTO DEL CONJUNTO DE MEDIDA EN FUNCIÓN DE LAS PRINCIPALES CAUSAS DE FALLO**



*Agentes externos: Heladas y robo*

*Características del material: Corrosión y defecto del material*

*Condiciones de instalación: Defecto de instalación*

*Otras causas*



### 6.5.5. Análisis por materiales y edad de la causa, localización y modo de fallo

En este apartado se ha incluido un análisis más completo de las roturas, estudiando la relación entre un conjunto de variables que ya han sido analizadas de forma independiente en apartados anteriores.

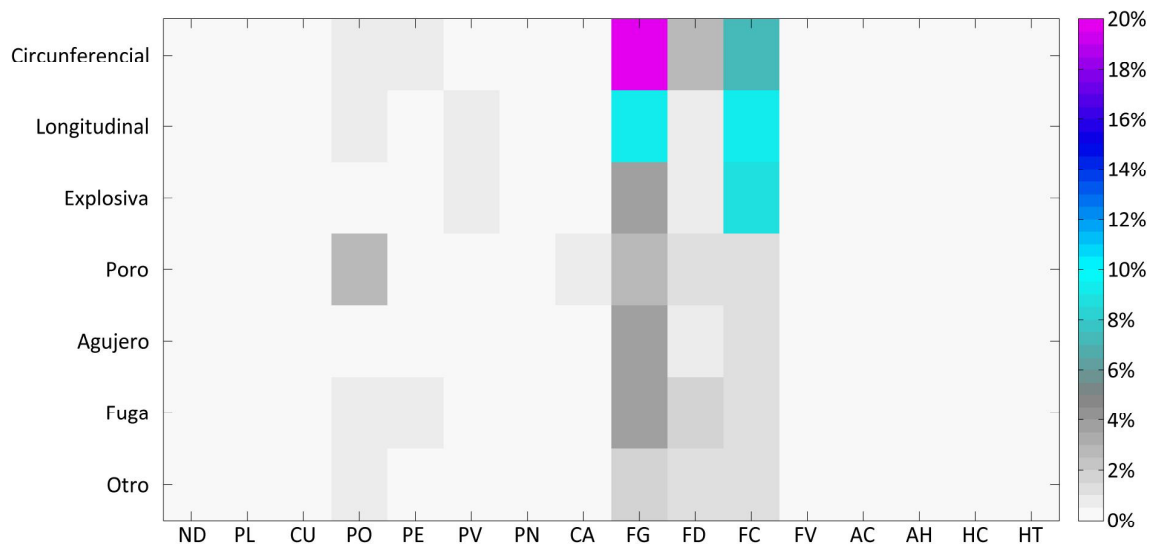
En primer lugar, se incluye el estudio de la vinculación entre materiales presentes en la red con la causa, localización y modo de fallo, y en una segunda parte se analiza el detalle de cada material.

#### Tubería general

En la Figura 109 se visualiza el estudio de la relación entre los modos de fallo y los materiales presentes en la muestra de roturas, correspondiente a tubería general.

Además, se ha estudiado la relación entre causas y modos de fallo para los principales materiales en los que se concentran las roturas de forma individualizada.

FIGURA 109. RELACIÓN ENTRE EL MATERIAL Y LOS MODOS DE FALLO, EN TUBERÍA GENERAL



<b>AC</b>	Acero	<b>AH</b>	Acero helicSoldado	<b>CA</b>	Caña
<b>FV</b>	Fibra vidrio	<b>FC</b>	Fibro cemento	<b>FD</b>	Fundición dúctil
<b>FG</b>	Fundición gris	<b>HC</b>	Hormigón armado con camisa de chapa	<b>HT</b>	Hormigón pretensado con camisa de chapa
<b>ND</b>	No definido	<b>PL</b>	Plomo	<b>PO</b>	Polietileno de normativas anteriores a la vigente
<b>PE</b>	Polietileno de normativa vigente	<b>PV</b>	PVC de normativas anteriores a la vigente	<b>PN</b>	PVC de normativa vigente
<b>CU</b>	Cobre				

A continuación se incluye el estudio detallado de cada material para **tubería general**, centrándolo en aquellos materiales de los que se considera que hay un número de muestras suficiente para obtener resultados concluyentes. Se ha ido analizando el detalle de las muestras de cada material y su vinculación con la edad, causa, localización y modo de fallo. Además se han incorporado las conclusiones obtenidas tras los ensayos de laboratorio.

## FUNDICIÓN GRIS

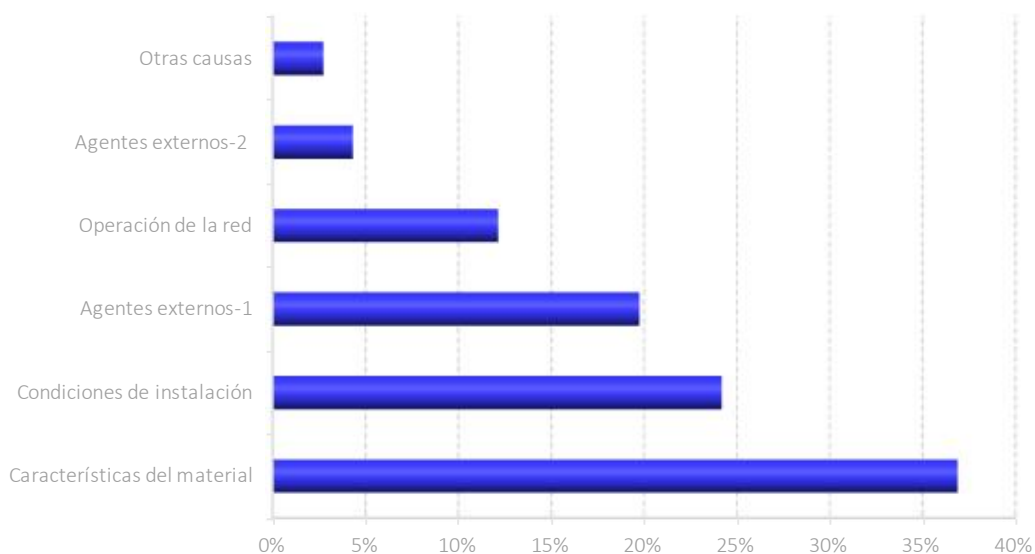
La fundición gris se presentó en un 45% de los fallos de la muestra correspondiente a tubería general.

El 37% de los fallos se produjeron por Corrosión y defectos de material, el 24% por las Condiciones de la instalación, el 20% fueron debidas a Agentes externos, un 12% se atribuyeron a la Operación de la red y un 4% fueron Provocadas, finalmente un 3% se clasificó como Otras causas, según se puede observar en la Figura 110.

Los fallos en fundición gris se dieron mayoritariamente en la pared de tubería (83%). Su estructura laminar de grafito hace que tenga un comportamiento frágil ante cargas exteriores presentando fisuras en las que actúa la corrosión. Los casos de rotura por cargas externas suelen ser muy claros porque aparecen bajo el objeto que produce la sobrecarga, caracterizándose por una fisura circular.

Algunas roturas en fundición gris de estas características se ilustran en la Figura 111. Los resultados de los ensayos mostraron que es un material que ha perdido en parte sus características mecánico-resistentes iniciales dado que su periodo de vida ha sido muy largo, denotando además, un inadecuado proceso de fabricación.

**FIGURA 110. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN GRIS, EN TUBERÍA GENERAL**



*Características del material: Corrosión y defecto del material*

*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Agentes externos-2: Provocadas*

*Otras causas*

**FIGURA 111. ROTURAS EN TUBERÍA DE FUNDICIÓN GRIS, POR CORROSIÓN Y SOBRECARGA**



*Rotura por corrosión en tubería de fundición gris*

*Rotura por sobrecarga en tubería de fundición gris*

Las muestras habían perdido prácticamente los recubrimientos, tanto interiores como exteriores, facilitando así la corrosión.

Más del 90% de las roturas de tuberías de fundición gris presentaron corrosión externa, fuera ese el motivo de la rotura u otro; un 46% presentaron corrosión interna, un 21% ovalación, en torno al 82% fisuras, y un 34% incrustaciones que reducen la sección efectiva del tubo y aumentan su rugosidad.

El espesor de las incrustaciones llegó, en ocasiones, a superar los 35 milímetros (Figura 112). Las tuberías afectadas por corrosión pierden características resistentes, que hacen que se muestren más frágiles ante las variaciones de presión y las sobrecargas, motivo por el cual se cree que al analizar los resultados se observó cierto grado de relación entre las roturas de fundición gris y las oscilaciones de presión.

También se observó que ante la presencia de árboles cercanos (menos de 10 metros) aumentaban, en más del doble, las roturas por asentamientos y sobrecargas externas; y ante la presencia de humedades se triplicaban las roturas por corrosión y destacaban las roturas por asentamientos.

En un elevado número de roturas por asentamientos, corrosión y sobrecargas se detectó la existencia de huecos de lavado.

La gran mayoría de las roturas no disponían de banda señalizadora.

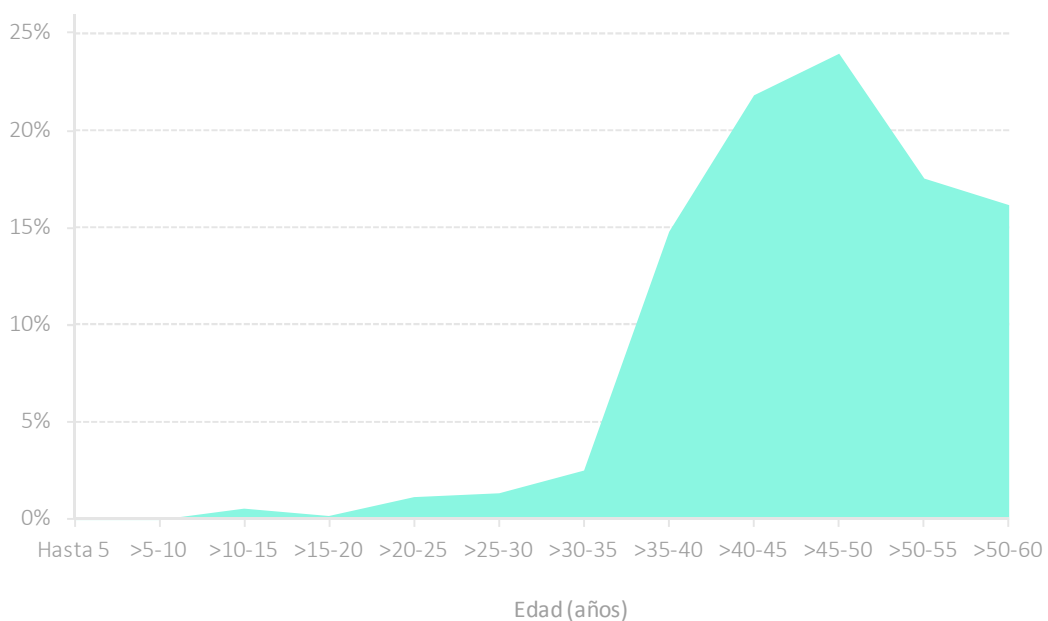
La curva de fallo edad de este material (Figura 113) se ha construido a partir de 514 roturas de la muestras cuya edad es conocida (58% de la muestra de este material). La función de fallos es creciente con la edad, no mostrando apenas roturas de menos de 30 años, y presentando su mayor número de roturas a los 50 años de antigüedad, pues recientemente no se han instalado tuberías de este material.

**FIGURA 112. TUBO DE FUNDICIÓN GRIS SEMIOBSTRUÍDO POR INCRUSTACIONES**

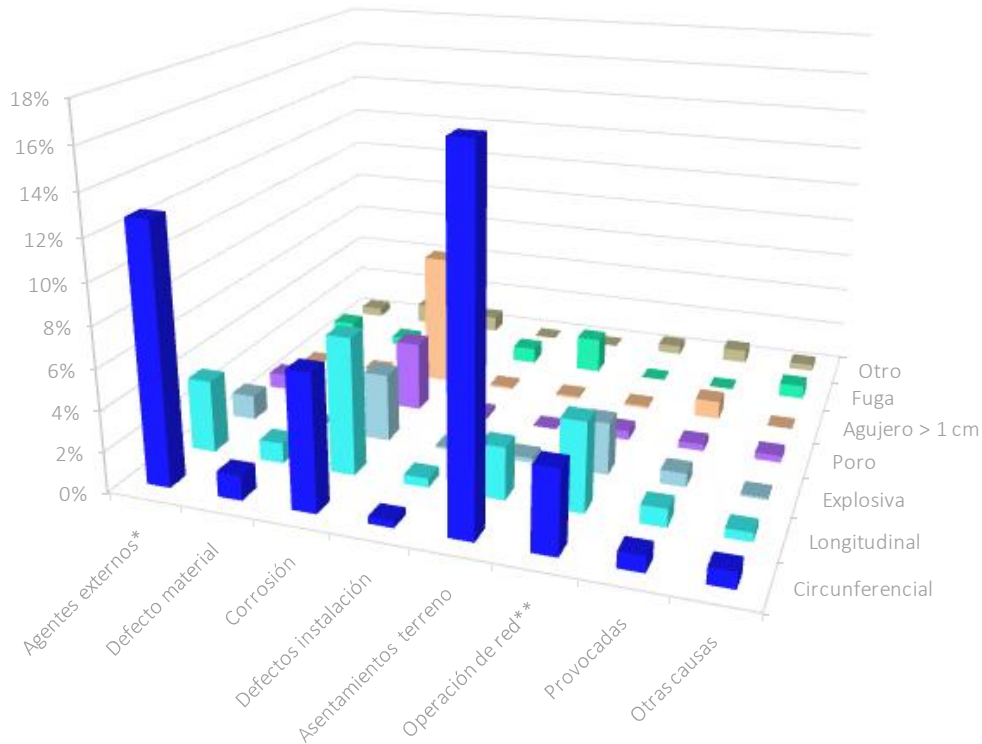


En correspondencia con la literatura mencionada, se observó un predominio del modo de fallo circunferencial en roturas de tuberías de fundición gris, que se visualiza gráficamente en la Figura 114. Este material es el que presentó un mayor número de fallos en la muestra tomada de tubería general, asociándose las roturas debidas a sobrecargas externas (árboles, tráfico pesado, etc.), y los asentamientos del terreno al modo de fallo circunferencial.

**FIGURA 113. FUNCIÓN DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN GRIS DE EDAD CONOCIDA**



**FIGURA 114. RELACIÓN CAUSA DE FALLO - MODO DE FALLO EN ROTURAS DE TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN GRIS**



*Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas*  
*Operación de la red: Variaciones de presión/maniobras y fatiga*

## 🔹 FIBROCEMENTO

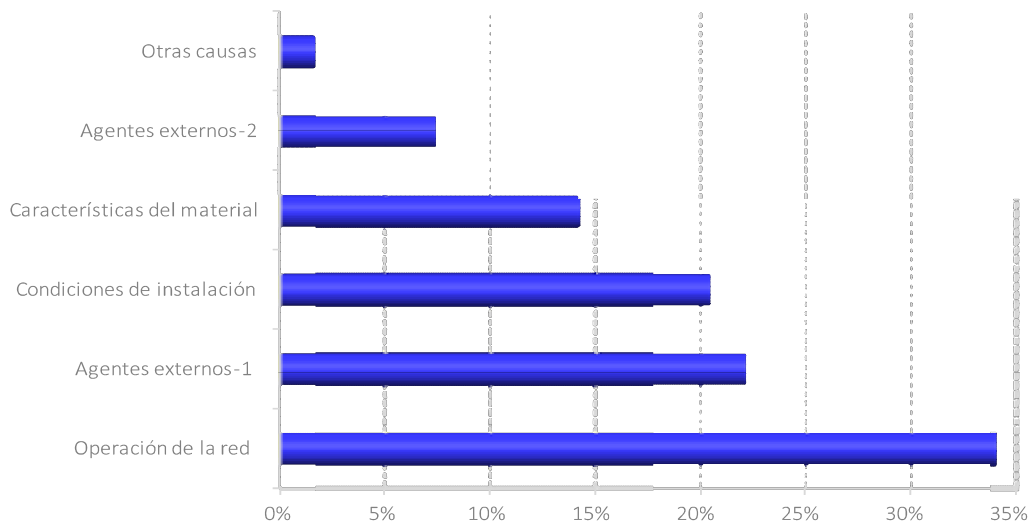
Este material representa el 31% del total de roturas de tubería general.

El 34% de los fallos en este material se produjeron por la operación de la red, el 22% fueron debidos a agentes externos, un 20% se debieron a las condiciones de la instalación, un 14% se atribuyeron a la corrosión y los defectos de material y un 7% fueron provocadas (Figura 115).

Se observó que el fibrocemento fue el material con menor tolerancia a los valores más altos de presión, presentando modo de fallo explosivo y longitudinal para esta causa de fallo (Figura 116). La mayor parte de los fallos se presentaron en pared de tubo, registrando fisuras en torno al 75% de estas roturas. Las causas de fallo están relacionadas con su fragilidad ante cargas exteriores, no soportando sollicitaciones derivadas de impactos ni flexiones longitudinales, además, muchas tuberías tienen una edad elevada lo que supone una influencia importante por la pérdida de aptitudes.

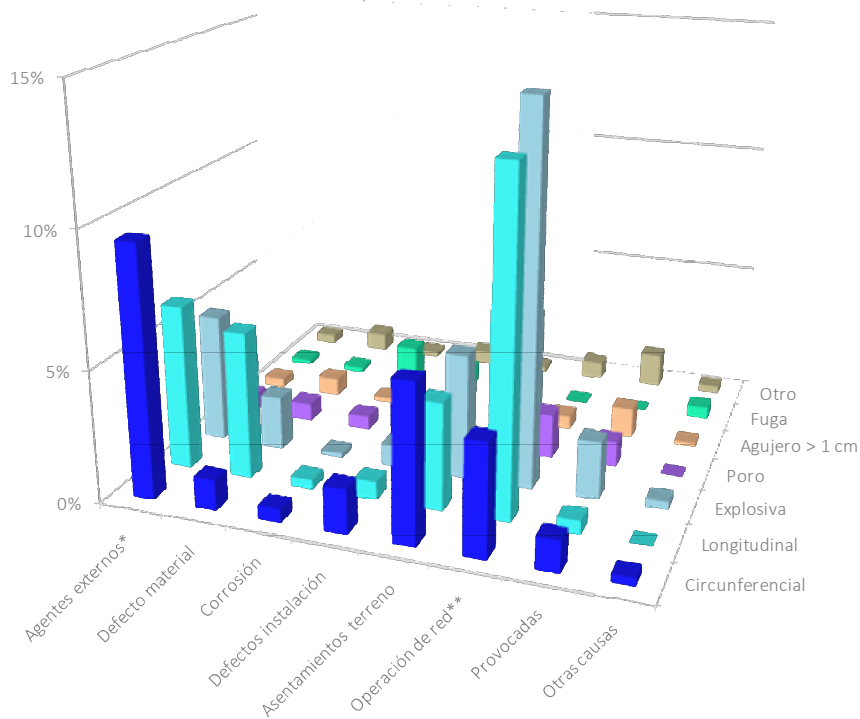
Es habitual constatar que en redes de fibrocemento se producen roturas en cadena. Los índices de roturas producidos los 20 días anteriores al fallo denotaron que se presentaron entre 1 y 10 roturas previas en el mismo sector, en el 87% de los casos, y el 68% para distancias inferiores a 2 kilómetros. Se ha identificado también relación con la presión estática y con las oscilaciones de presión (Figura 117).

**FIGURA 115. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FIBROCEMENTO DE TUBERÍA GENERAL**



*Operación de la red: Variaciones de presión/maniobras y fatiga*  
*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*  
*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*  
*Características del material: Corrosión y defecto de material*  
*Agentes externos-2: Provocadas*  
*Otras causas*

**FIGURA 116. RELACIÓN CAUSA DE FALLO - MODO DE FALLO EN ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL DE FIBROCEMENTO**



\* Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\* Operación de la red: Variaciones de presión/maniobras y fatiga



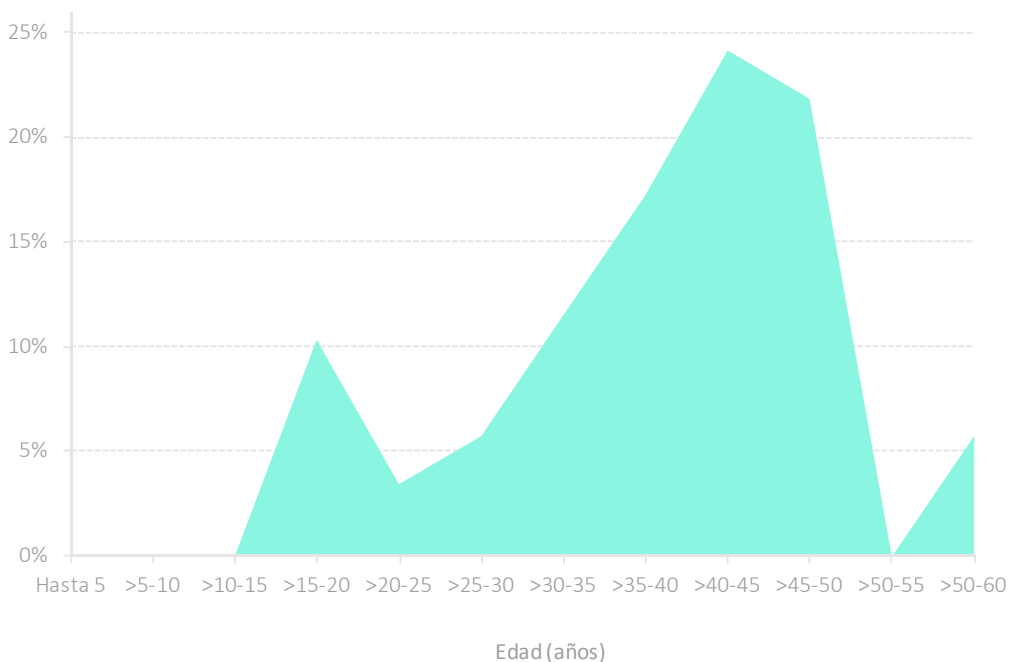
**FIGURA 117. TUBERÍAS DE FIBROCEMENTO CON ROTURA EXPLOSIVA POR VARIACIONES DE PRESIÓN**



En cuanto a su antigüedad, en fibrocemento se han registrado 87 roturas de edad conocida, que representa el 15% de las roturas de la muestra de fibrocemento.

Este material presenta su mayor índice de roturas en torno a los 45 años, junto con un menor pico a edades de 15 a 20 años. No obstante, la muestra registrada es algo reducida para extraer conclusiones claras. Su función de fallo se ilustra en la Figura 118.

**FIGURA 118. FUNCIÓN DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL, MUESTRAS DE FIBROCEMENTO Y EDAD CONOCIDA**

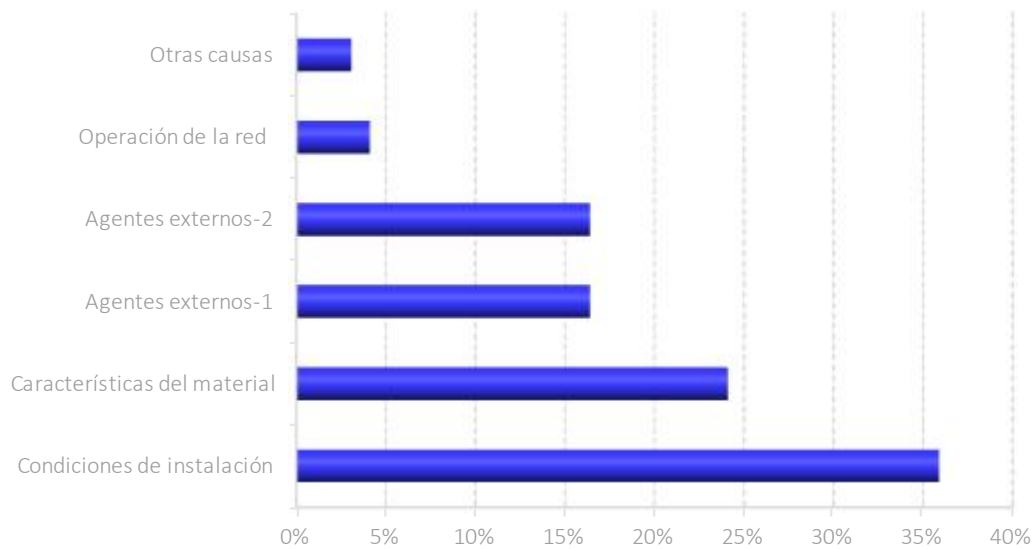


#### **FUNDICIÓN DÚCTIL**

La fundición dúctil representa el 10% del total de las roturas de tubería general de la muestra. Es el material que mejor se comporta teniendo en cuenta que supone un 70% de la red instalada (también es el más joven). El 36% de las roturas se debieron a condiciones de instalación, el 24% a corrosión y defecto de material, el 16% a sobrecargas externas y raíces, y otro 16%, a causas provocadas (Figura 119).



FIGURA 119. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL DE TUBERÍA GENERAL



*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

*Características del material: Corrosión y defecto de material*

*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Agentes externos-2: Provocadas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

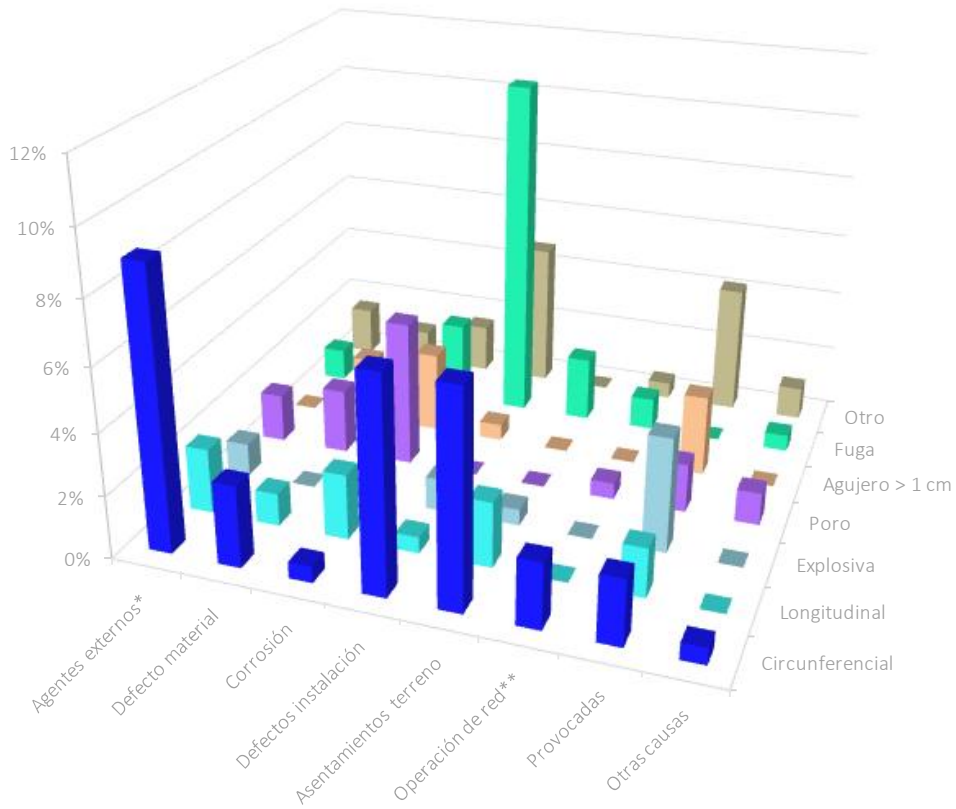
*Otras causas*

El modo de fallo predominante fue el circunferencial (31% del total de roturas en fundición dúctil), exceptuando las causas de fallo por defecto de instalación y corrosión, donde predominaron los fallos tipo fuga (11%), y poro (5%), respectivamente. El fallo por las condiciones de la instalación es más frecuente en tuberías que tienen comportamientos rígidos. En la mayoría de estas averías, el fallo se produce por la parte central del tubo; denotando que las tensiones producidas por la flexión se disipan en las uniones flexibles por las juntas de gomas que actúan a forma de charnelas, menos rígidas que el propio tubo (Figura 120).

Los índices de roturas producidos los 20 días anteriores al fallo denotaron que se presentaron entre 1 y 10 roturas previas, en el mismo sector, en el 92% de los casos, y el 61% para distancias inferiores a 2 kilómetros. Este hecho podría tener relación con fenómenos de contracción de mortero de cemento en los procesos de secado a los que se somete a las tuberías en los cortes y restablecimientos del servicio. La fundición dúctil denotó un punto débil en las juntas, generando la mitad de las roturas. Ya se comentó que las condiciones de la instalación supusieron la causa mayoritaria de fallo, localizándose, en las uniones el 25% de las roturas en este material, debido en algunos casos a la ausencia de codos y macizos de anclaje, motivo por el cual el modo predominante de fallo es de tipo fuga (Figura 121).

El 8% de las roturas en fundición dúctil inspeccionadas presentan incrustaciones, y en torno al 85% de las roturas en pared de tubo presentaron fisuras.

FIGURA 120. RELACIÓN CAUSA-MODO DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN DÚCTIL



Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas  
Operación de la red: Variaciones de presión/maniobras y fatiga

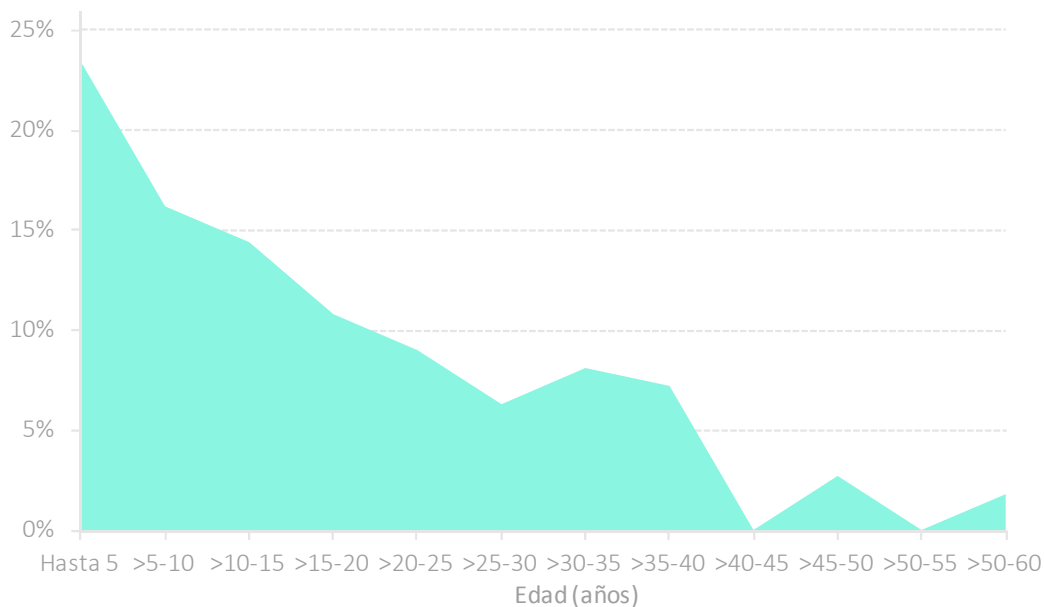
FIGURA 121. INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL



El 27% de las roturas presentaron corrosión externa y un 15% interna aunque hay que advertir que la mayor parte de las roturas se reparan, siempre que sea posible, con abrazadera y sin proceder a la sustitución del tubo, por lo que ha habido ciertos casos en que no se ha tenido acceso a la inspección interna del tubo. Algunas veces la protección anticorrosiva que llevan estos materiales se ve dañada si la instalación de la tubería no se realiza cuidadosamente, produciéndose microfisuras y puntos débiles por donde se facilita la corrosión. El 51% de las muestras de fundición dúctil presentó fisuras.

De la muestra de fundición dúctil se conoce la edad de 111 roturas, que constituye un 58% de la muestra de roturas en este material. Dado que es el material instalado más joven, mayoritariamente en los últimos 35-40 años se observa que sus roturas decrecen con la edad, a diferencia de otros materiales presentes en la red de Canal de Isabel II (Figura 122).

**FIGURA 122. FUNCIÓN DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL DE EDAD CONOCIDA**



#### 🔹 OTROS MATERIALES

Se ha registrado un menor número de roturas en la muestra, relacionadas con materiales que tienen interés por encontrarse dentro de la normativa vigente de Canal de Isabel II, como es el **acero** y el **PVC** caracterizado como “**dentro de norma**”. El número de muestras de estos materiales no se ha estimado suficiente para extraer conclusiones, ya que de **PVC dentro de norma** se recogieron únicamente dos muestra, y de acero 17 muestras.

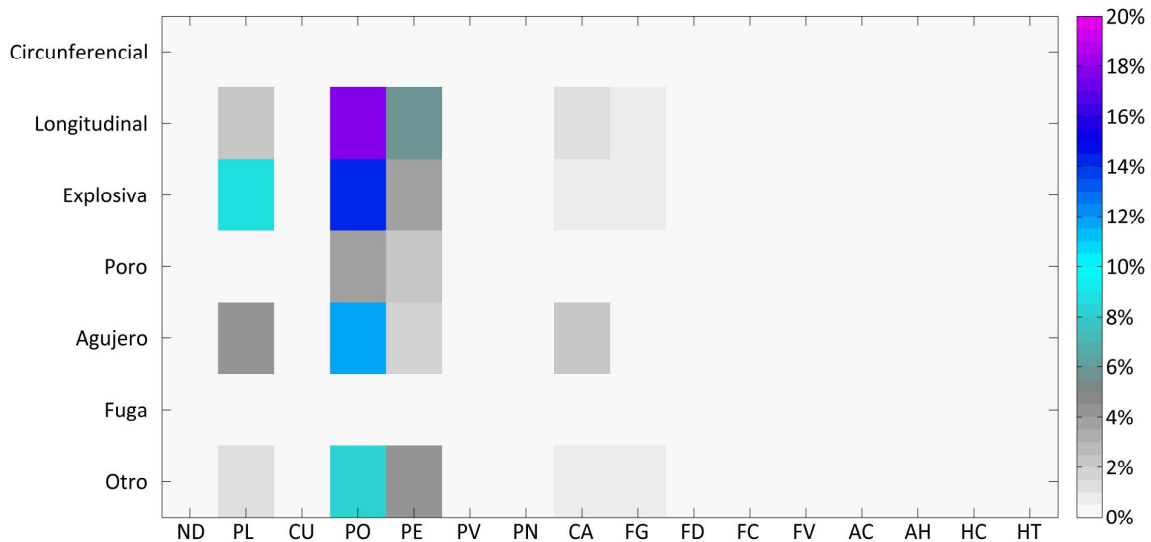
Los fallos detectados en acero se produjeron principalmente por corrosión (82% del total de roturas en acero), y se relacionaron con el modo de fallo de agujero.

Las dos roturas de **PVC dentro de norma** se produjeron por asentamientos del terreno con modo de fallo circunferencial.

### Acometidas

De forma análoga al caso de tubería general, se incluye el estudio detallado de cada material para las acometidas muestreadas y se incorpora el detalle de los tres materiales más frecuentes en las roturas, así como su vinculación con la edad, causas, localización y modo de fallo.

FIGURA 123. RELACIÓN ENTRE MATERIAL Y MODOS DE FALLO EN ACOMETIDA



<b>AC</b> Acero	<b>CA</b> Caña	<b>CU</b> Cobre
<b>FC</b> Fibrocemento	<b>FD</b> Fundición dúctil	<b>FG</b> Fundición gris
<b>ND</b> No definido	<b>PL</b> Plomo	<b>PO</b> Polietileno de normativas anteriores a la vigente
<b>PE</b> Polietileno de normativa vigente	<b>PN</b> PVC de normativa vigente	

Al estudiar los materiales que conforman la muestra de acometidas por separado, el **Polietileno fuera de norma** con causa de defecto de material rompió principalmente con forma circunferencial, longitudinal y tipo poro, mientras que los fallos debidos a defectos de la instalación de la tubería se relacionaron para este material con roturas tipo poro.

En el caso de las acometidas de **Polietileno dentro de norma**, lo hicieron en forma circunferencial con causa de fallo principal defecto de material.

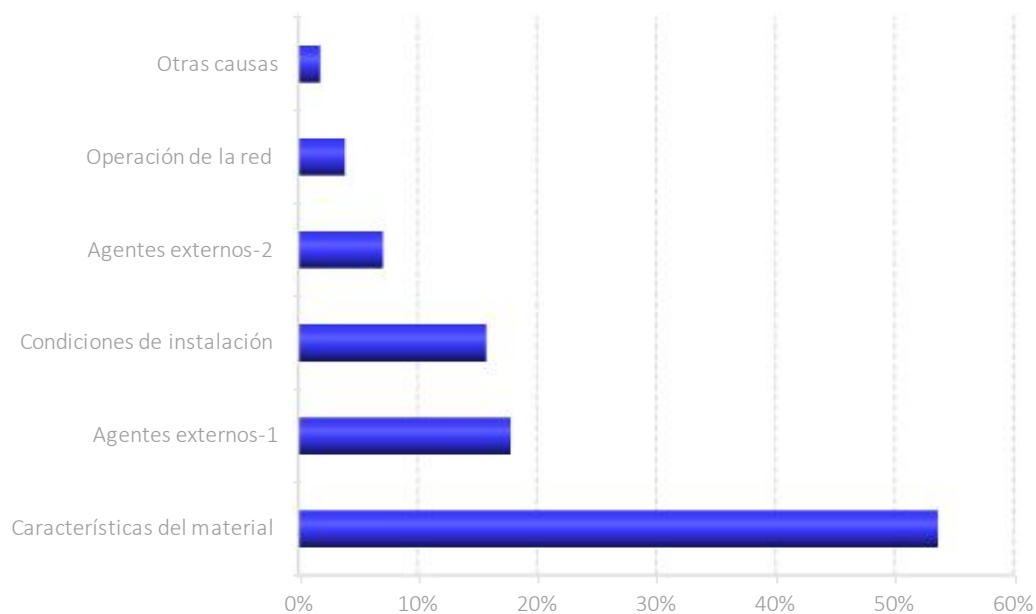
Las roturas de **Plomo** presentaron un mayor número de registros asociados al fallo longitudinal.

Además del estudio de la relación existente entre los valores medios obtenidos en los ensayos y el modo de fallo se puede decir que en el 90% de los casos en los que la rotura fue de tipo poro se obtuvo un TIO inferior a 5 minutos en la superficie interior. Relacionando estos casos con las causas de fallo, se observó que todos estaban ligados a los **defectos de material** o a **defectos de instalación** de la tubería.

### 🔹 POLIETILENO FUERA DE NORMA (PO)

El **Polietileno fuera de norma** representa el 56% del total de las roturas en acometidas de la muestra. El 54% de las roturas se debieron a corrosión y defecto de material, un 18% a agentes externos, un 16% se atribuyeron a condiciones de la instalación, un 7% fueron provocadas y un 4% debieron a la operación de la red (Figura 124).

**FIGURA 124. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA - ACOMETIDAS**



*Características del material: Corrosión y defecto de material*

*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

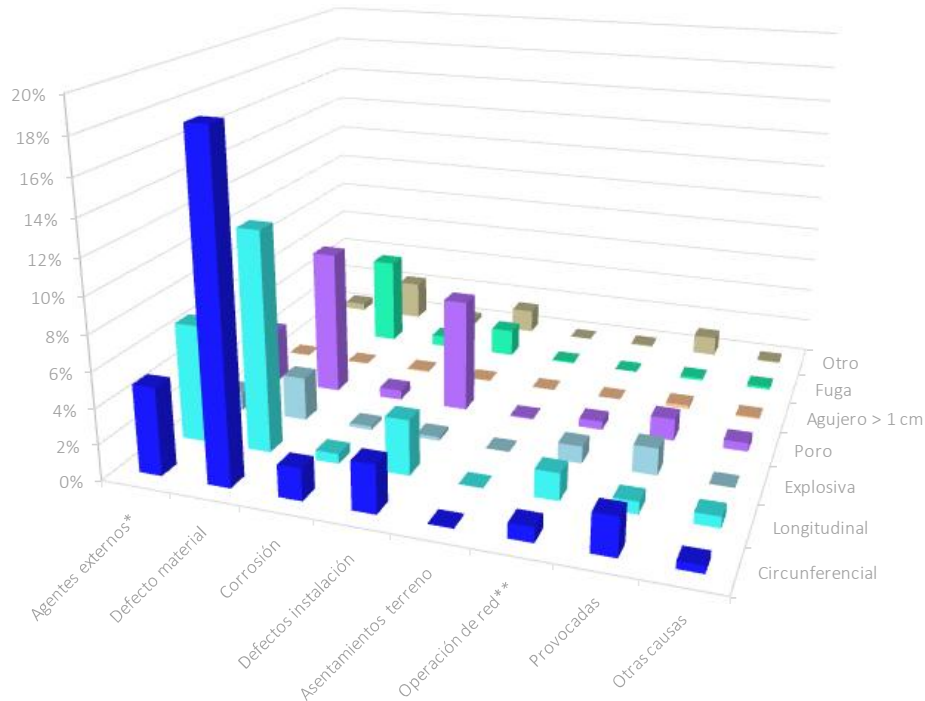
*Agentes externos-2: Provocadas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Otras causas*

La causa de rotura mayoritaria fue el defecto de material; principalmente localizado en las juntas, piezas especiales y accesorios; con predominio del modo de fallo circunferencial y longitudinal (Figura 125). Analizando el detalle de la muestra, una gran parte de las roturas se produce en las uniones, relacionándolo con defectos de diseño del manguito tipo mecánico, corrosión y con defectos de instalación.

**FIGURA 125. RELACIÓN CAUSA DE FALLO - MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA DE NORMA**



\*Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

\*\*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

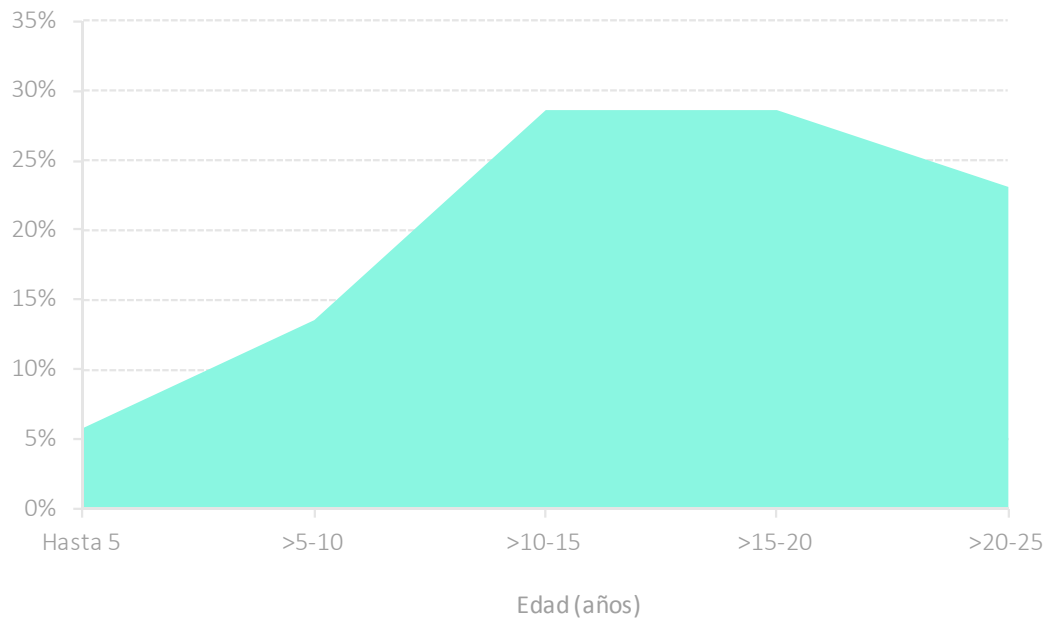
El 39% de las roturas en pared de tubo presentaron ovalaciones y un 27% fisuras. En las roturas de pared de tubo el polietileno fuera de norma aparece como un material muy vulnerable a las condiciones de instalación. La existencia de clastos, escombros y la falta de uniformidad provoca fracturas por la concentración de tensiones en un punto (Figura 126).

**FIGURA 126. ROTURAS EN POLIETILENO FUERA DE NORMA, OCASIONADAS POR DEFECTOS DE INSTALACIÓN**



Estudiando las roturas de **Polietileno fuera de norma** con edad conocida (Figura 127), que suponen un 19% de la muestra correspondiente a este material, se puede observar que la curva de fallo de acometidas es creciente con la edad, con un ligero descenso en el intervalo comprendido entre los 20 y 25 años.

**FIGURA 127. ROTURAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA CON EDAD CONOCIDA EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA**



#### 🔹 POLIETILENO DENTRO DE NORMA (PE)

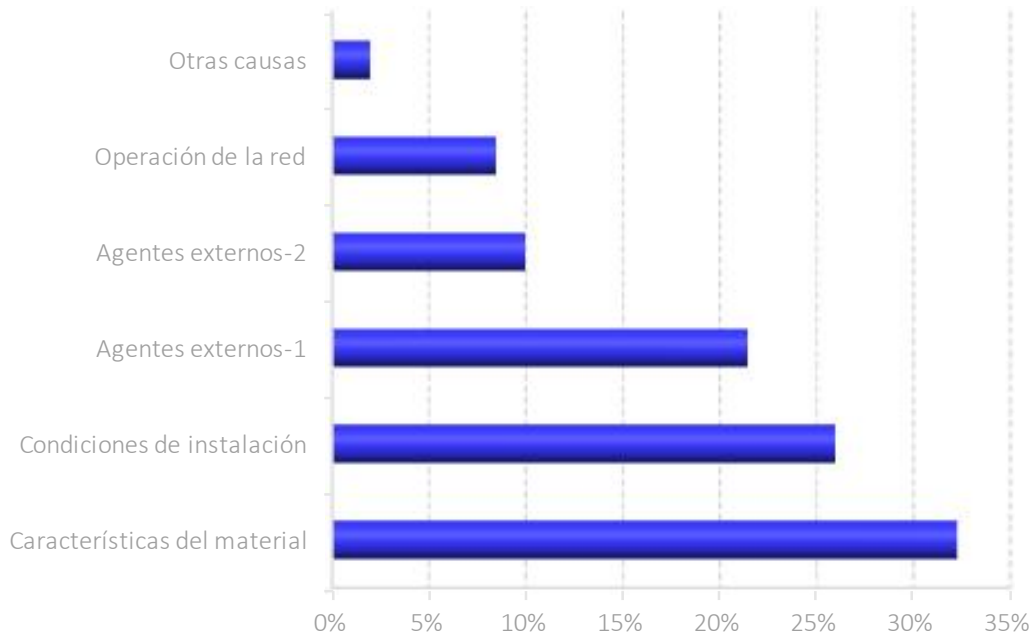
El **Polietileno dentro de norma** representa el 18% del total de roturas en acometidas. El 32% de sus roturas se debieron a corrosión y defecto de material, un 26% se atribuyeron a condiciones de la instalación, un 21% a agentes externos, un 10% fueron provocadas y un 8% debieron a la operación de la red (Figura 128).

La causa más habitual de fallo fue también el defecto de material, aunque en menor proporción que en el polietileno fuera de norma. Los modos de fallo predominantes para esta causa fueron el circunferencial y longitudinal (Figura 129).

El 38% de las roturas en pared de tubo presentaron ovalación y un 67% fisuras. El porcentaje de roturas en pared de tubo que han presentado aplastamiento supera el 15%. Este material es vulnerable a las condiciones de instalación de la tubería por efecto de los clastos y escombros. Una gran parte de las roturas se produce por defectos en las uniones (71% de las roturas en polietileno dentro de norma), relacionados éstos con defectos de instalación y de los manguitos mecánicos; con modo de fallo predominante tipo fuga y circunferencial.



**FIGURA 128. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA DE ACOMETIDAS**



*Características del material: Corrosión y defecto de material*

*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

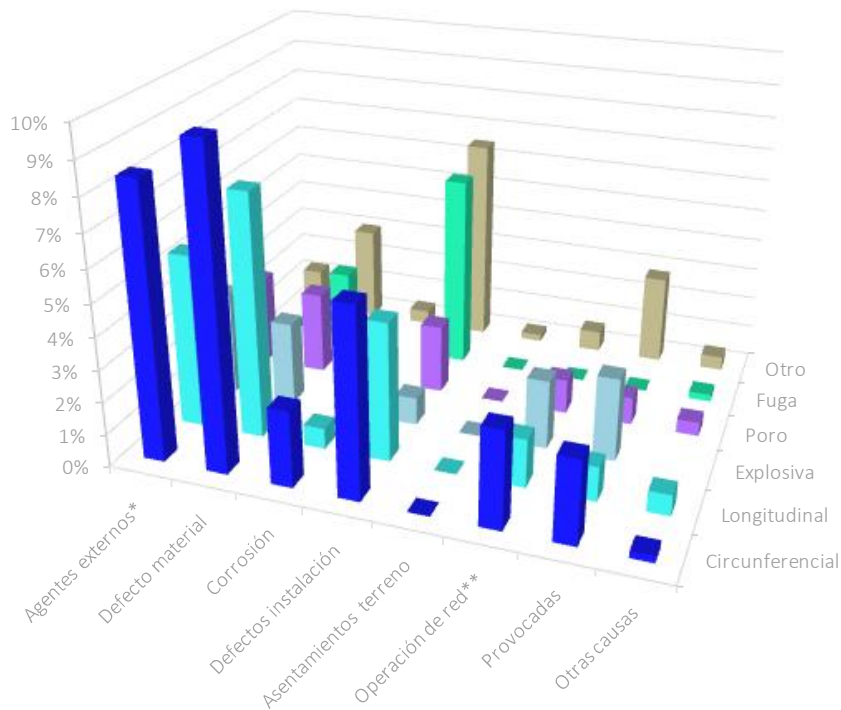
*Agentes externos-2: Provocadas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Otras causas*

A diferencia del polietileno fuera de norma, en el caso del polietileno dentro de norma la mayor probabilidad de rotura se produce a edades de 5-10 años, experimentado una ligera caída en torno a los 20 años. No obstante, la gráfica de la función de fallos (Figura 130) se ha construido a partir de las acometidas de edad conocida que sólo representan un 10% de las roturas registradas en la muestra correspondientes a polietileno dentro de norma, por lo que los resultados son meramente orientativos.

**FIGURA 129. RELACIÓN CAUSA DE FALLO-MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA**

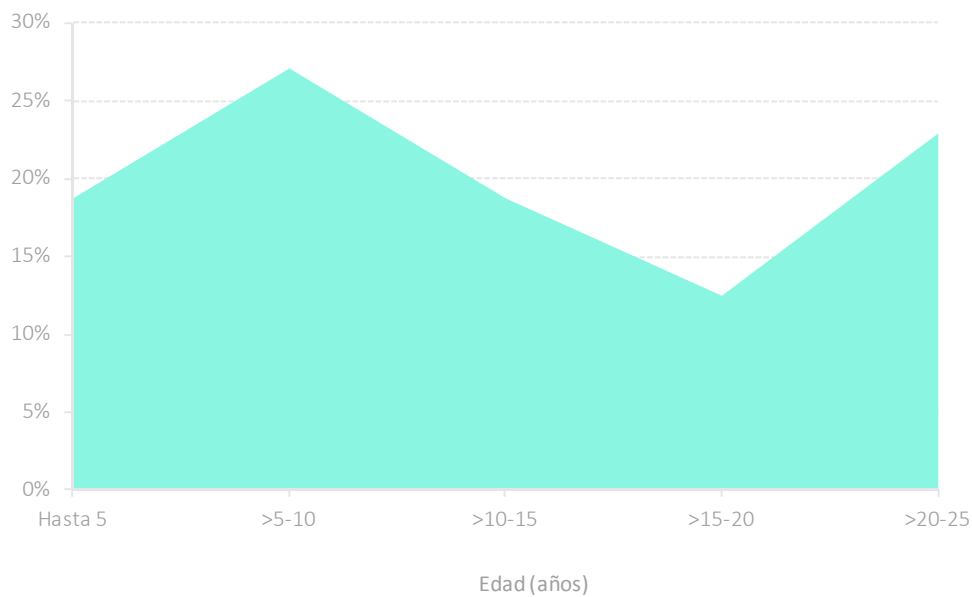


*Agentes externos:* Raíces, heladas y sobrecargas externas

*Operación de la red:* Variaciones de presión/maniobras y fatiga

No se apreció ninguna rotura con Modo de Fallo = agujero > 1 cm en el material Polietileno Dentro de Norma, por ello no aparece en el gráfico

**FIGURA 130. ROTURAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA, CON EDAD CONOCIDA, EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA**



## PLOMO

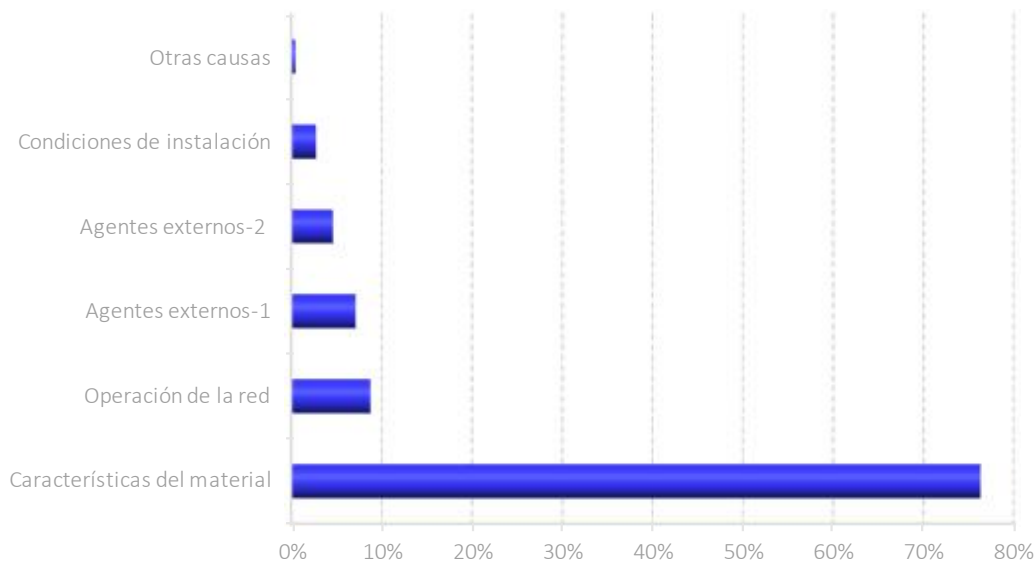
El plomo representa el 17% del total de roturas muestreadas en acometidas.

El 76% de sus roturas se debieron a corrosión y defecto de material, un 9% se atribuyeron a operación de la red, un 7% a agentes externos, un 5% fueron provocadas, y un 3% fueron debidas a las condiciones de instalación (Figura 131).

La causa mayoritaria de rotura fue por defectos de material con rotura longitudinal (figuras 132 y 133). El material se presenta en general deteriorado y con degradación blanquecina, relacionándose con la antigüedad de la acometida. Debido a su edad suele estar deformado y dar fallos de resistencia a las sollicitaciones a las que esté expuesto.

Alrededor del 45% de las roturas presentaron ovalaciones, un 1% incrustaciones, y en más del 90% de las roturas en pared de tubo se observaron fenómenos de fisuras. Los casos de aplastamiento no son muy numerosos, siendo el plomo el que presenta mayor proporción, cercano al 20%. Llama la atención que alrededor del 13% de sus roturas tuvieran entre 50 y 60 roturas próximas (radio inferior a los 2 km) en los 20 y 90 días previos al fallo. Este hecho se achaca a que este material se presenta generalmente en un entramado urbano antiguo y complejo, con alta densidad de red y, en general, con un alto índice de fallos. La función de fallos con la edad no se ha representado, por carecer de información fiable y tratarse de un material menos frecuente que no está contemplado en la normativa actual de Canal de Isabel II.

**FIGURA 131. CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE PLOMO DE ACOMETIDAS**



*Características del material: Corrosión y defecto de material*

*Condiciones de instalación: Asentamientos del terreno y defectos de instalación*

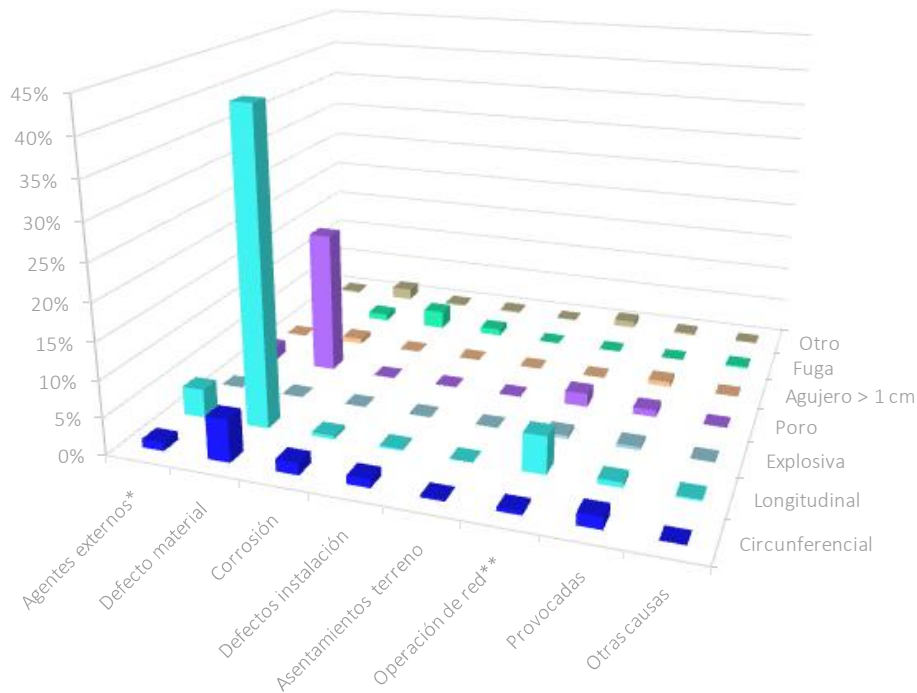
*Agentes externos-1: Raíces, heladas y sobrecargas externas*

*Agentes externos-2: Provocadas*

*Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga*

*Otras causas*

FIGURA 132. RELACIÓN CAUSA DE FALLO-MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE PLOMO



Agentes externos: Raíces, heladas y sobrecargas externas

Operación de la red: Variaciones de presión, maniobras y fatiga

FIGURA 133. ACOMETIDA DE PLOMO CON ROTURA LONGITUDINAL POR DEFECTO DE MATERIAL



#### OTROS MATERIALES

Las roturas en **caña** representan el 5 % del total de las muestreadas en acometida y se encuentra fuera de la normativa vigente de Canal de Isabel II. Por ello se destaca únicamente que la causa mayoritaria de rotura fue la corrosión. Se observó corrosión externa en más del 90% de las roturas de la muestra y cerca del 78% de ellas presentaron también corrosión interna. Además, un 65% presentaron fisuras y aparecieron incrustaciones en el 53% de las mismas.

## 7. Conclusiones





En este proyecto se ha llegado a conclusiones significativas sobre las roturas en tubería, acometidas y conjuntos de medida que, sin duda, aportan conocimiento sobre los procesos de fallo y alientan a continuar los estudios sobre roturas en infraestructuras de abastecimiento de agua potable.

La metodología seguida de toma de muestras y su análisis posterior, constituye definitivamente un método directo para evaluar la condición en la que se encuentran los elementos. En este estudio se han obtenido numerosos gráficos y tablas que muestran las distribuciones de las frecuencias de fallo según las variables analizadas. En general, los datos mostrados son acordes con los obtenidos por otros autores y corroboran la mayor parte de las apreciaciones hechas durante la recogida de datos en campo, y como resultado de los ensayos de laboratorio. Además, se ha llevado a cabo una tipificación de las causas, localización y modos de fallo que permite caracterizar los fallos en la red y analizar en detalle las relaciones que se presentan entre ellas para cada conjunto de estudio, **tubería general, acometida y conjunto de medida**.

A través de este estudio, y con la ayuda de las bases de datos de Canal de Isabel II, se han podido generalizar algunos resultados y extraer conclusiones más sólidas para caracterizar el sistema. Así, se ha logrado avanzar en el conocimiento del comportamiento de los principales materiales presentes en la red instalada de tubería general y acometidas de la empresa, identificando las causas y modos de fallo más frecuentes, la localización habitual de las roturas y su deterioro con la edad.

El estudio se completa con el análisis específico de los mismos aspectos para los conjuntos de medida. De esta forma, se contribuye a mejorar los estudios de fiabilidad de tuberías y a mantener un registro de estados de los aspectos críticos de los distintos elementos que conforman el sistema con el tiempo.

La información obtenida y los resultados a los que se ha llegado pueden ser relevantes a la hora de realizar una evaluación preliminar de un problema estructural y servir de base a modelos físicamente basados de deterioro estructural.

A continuación, se introducen aquellas relaciones observadas que se consideran más destacadas.

## 7.1. RELATIVAS A LA IDENTIFICACIÓN DE LA CAUSA DE FALLO

El análisis de la muestra ha permitido profundizar en el conocimiento de los factores que influyen sobre las causas de rotura e identificar las variables que parecen más influyentes en el proceso de fallo.

Los equipos de campo que han recogido los datos en cada una de las fases han sido diferentes, por lo que cabría esperar distorsiones debidas a diferencias de criterios y elementos de subjetividad, especialmente al determinar la causa de fallo. Distinguir una única causa de fallo es complicado pues el estado de la tubería, de la instalación y ciertas condiciones de explotación sugieren un compendio de circunstancias que hacen que se produzca el fallo de la tubería. Por este motivo, y con el fin de mantener un criterio unificado, se consideró fundamental la revisión de la causa de fallo en gabinete para valorar los criterios de la causa establecida en campo, aprovechando así el conocimiento adquirido durante la reparación del elemento.

Como causas de fallo que sufrieron mayor modificación, en gabinete con respecto al diagnóstico en campo, destacan la variación de presiones o maniobras, los asentamientos del terreno y la corrosión, principalmente achacadas a tubería general (fibrocemento, fundición gris y fundición dúctil).

A modo de ejemplo, en campo se observó a simple vista el fenómeno de la corrosión y, sin embargo, no se tenía conocimiento de las presiones a las que se vio sometida la red. En los casos en los que se estableció la corrosión como causa de fallo se sospechó que el fenómeno desencadenante de la rotura podía haber estado influido por una variación de la presión que unido al estado de la tubería desencadenase el fallo.

Las **características del material** constituyeron la causa mayoritaria de fallo en las roturas visitadas de tubería general. La corrosión fue asignada como causa principal de fallo en el 20% de los casos, observándose un aumento de las roturas con la presencia de tráfico pesado. Los materiales en los que mayoritariamente se presentó corrosión fueron, por orden decreciente: caña, fundición gris, acero y fundición dúctil. Los dos primeros materiales se encuentran actualmente fuera de norma.

Tanto en tuberías como en acometidas, un porcentaje significativo de las roturas se produjo por las **condiciones de la instalación** (ausencia de camas en zanjas, presencia de escombros y clastos, defectos de alineación y ángulos forzados por ausencia de codos, ausencia de macizos de anclaje, defectos de montaje, etc.). Asimismo, se confirmó su importancia en la ocurrencia de las roturas, aunque no se hubiera registrado como causa desencadenante del fallo. Se detectó que el 56% de los casos no cumplían los recubrimientos mínimos en zanja especificados por la norma actual de Canal de Isabel II y que, en el 63% de estos casos, la causa de fallo fue debida a agentes externos que la provocaron.

No obstante, la causa de fallo **provocada**, tuvo un tratamiento independiente del resto, observándose que su frecuencia fue similar en instalaciones recientes y más antiguas. En estos casos se observó que la mayoría de las instalaciones no disponían de banda señalizadora.

Por otra parte, el 37% de los casos de rotura se encontraron ubicados en zonas con rellenos procedentes de escombros que podían provocar tensiones puntuales en la tubería o contener sustancias que favorecieran la corrosión.

El 21% de los casos disponían al menos de una canalización de otros servicios que no cumplía la distancia mínima establecida en la normativa vigente, observándose relación entre la existencia de cableado eléctrico y la presencia de corrosión externa en elementos de caña y fundición gris.

También se apreció una relación de la causa de fallo de **asentamientos del terreno** con roturas en las que se había producido lavado de finos (huecos), provocando asientos diferenciales en el terreno que ocasiona el fallo de los materiales más rígidos. Los asentamientos por la presencia de arquetas cercanas constituyeron un porcentaje considerable de las roturas por esta causa, comprobándose que estos fallos apenas estaban influidos por la edad.

Las sobrecargas y la variación de presiones o maniobras fueron las causas más relacionadas con roturas en cadena, mostrando una cierta relación entre las roturas próximas.

## 7.2. RELATIVAS A LA CAUSA, LOCALIZACIÓN Y MODO DE FALLO

Se puede afirmar que se han detectado en la muestra patrones fundamentados en la literatura que pueden servir para estudios posteriores que traten de analizar el fenómeno de las roturas y que facilitan el análisis de fiabilidad de las tuberías.



Analizando la relación entre la causa y la localización del fallo, casi el 80% de los fallos en tubería general de la muestra se produjeron en pared de **tubo**, siendo la localización predominante en casi todos los grupos, independientemente de la causa que desencadena la rotura, aunque destaca especialmente para las causas de corrosión y operación de la red. En cambio, para las roturas muestreadas de acometidas, el 54% se concentraron en **junta, pieza especial o accesorio** con predominio de la causa defectos de material dando indicios de ser un punto débil en este tipo de instalaciones.

Además, la agrupación en categorías de las causas de fallo consideradas en tuberías y acometidas, ha permitido establecer una vinculación clara entre éstas y los principales modos de fallo identificados, constituyendo un punto de partida para el desarrollo de futuros modelos predictivos de roturas y favoreciendo la comprensión de este fenómeno.

En **tubería general**, la corrosión se ligó al modo de fallo en forma de agujero, al modo longitudinal, tipo poro y circunferencial. Las roturas ocasionadas por presiones o maniobras no habituales se asociaron con fallos longitudinales y roturas explosivas. Estos resultados concuerdan con estudios anteriores que vinculan la corrosión con el modo de fallo de agujero, y relacionan las roturas longitudinales con los fallos originados por tensiones axiales provocadas por la oscilación de presiones. Además, destacaron las roturas por agentes externos donde predominó el modo de fallo longitudinal y circunferencial. Se relacionaron roturas circunferenciales con fallos ocasionados por asentamientos y sobrecargas externas, pues las cargas derivadas de estas causas de fallo generan fuerzas sobre las tuberías. La literatura existente asocia el modo de fallo circunferencial con fuerzas de flexión y el modo longitudinal con esfuerzos radiales.

En cuanto a las **acometidas**, las observaciones mostraron que los defectos de material se asociaron en gran medida con roturas longitudinales, destacando también el modo de fallo circunferencial y el tipo poro. Por último, se ligaron las roturas por defectos de instalación, con el modo de fallo de poro. Un estudio más profundo de las causas de fallo y los patrones de rotura en uniones, piezas especiales y accesorios permitiría confirmar estos resultados e ilustrar las condiciones particulares de la instalación que desencadenan la rotura.

A partir de los ensayos en laboratorio de las muestras de terreno se buscó la relación de las características del material de relleno con la causa y localización del fallo, confirmando que en el caso de roturas en junta, pieza especial o accesorio, los fallos ocasionados por características del material y por asentamientos del terreno coincidían con valores de resistencia del terreno algo inferiores. De esto se deduce la importancia de la compactación del relleno y de la cama para evitar fallos en los elementos de unión u otros accesorios, que son puntos especialmente vulnerables ante desplazamientos diferenciales en las tuberías. Además, del estudio de la resistencia a la penetración del suelo y el modo de fallo, se dedujo que los suelos con menor resistencia presentan roturas en pared de tubería en modo poro.

Por último, tras la clasificación del suelo de acuerdo con los parámetros y límites establecidos en el PG-3, se confirmó que el 50% de las muestras con relleno clasificado como **suelo tolerable** presentaron causa de fallo por asentamientos, y que en el 54% de las muestras con material de relleno clasificado como **marginal o inadecuado** por su elevado contenido en materia orgánica, el fallo se ocasionó por corrosión.

### 7.3. RELATIVAS A LOS MATERIALES MÁS FRECUENTES EN LAS ROTURAS

Para establecer unas conclusiones más precisas se ha considerado adecuado estudiar cada material y relacionarlo con las distintas variables influyentes en las roturas.

Del análisis se confirmó la necesidad de estudiar las curvas de fallo-edad a través del índice de rotura por kilómetro de red instalada. Dado que hay materiales más presentes en la red que otros, es lógico que su número de roturas sea mayor. Por ello, se analizaron estos índices para los materiales más presentes de los que se conoce la longitud de red instalada. Se constató que los índices de rotura eran más elevados para fibrocemento (0,82 - 0,72 roturas/km), y fundición gris (0,69 - 0,52 roturas/km), con una reducción paulatina en el tiempo de las roturas, así como el buen comportamiento de la fundición dúctil con sólo 0,04 - 0,02 roturas/km de red instalada.

Asimismo, en cuanto a la agrupación espacial y temporal de las roturas, se confirmó que en más del 70% de las roturas de fibrocemento, fundición gris y fundición dúctil se produjeron roturas en los 20 días anteriores en el sector.

El análisis independiente de cada material se efectuó para aquellos más presentes en las roturas de la red instalada. Por ello se centró el estudio en **fundición gris**, **fibrocemento** y **fundición dúctil** para tubería general, en **polietileno fuera/dentro de norma** y **plomo** para las acometidas.

De otros materiales como acero, caña o PVC no se tuvo un número de muestras suficientes para extraer conclusiones, pero se han incluido algunas observaciones de campo.

La **fundición gris** presentó una incidencia de rotura del 45% de la muestra de tubería general y su función de fallos es creciente con la edad. Una de las causas más importantes que provocaron el fallo fue la corrosión. Los fallos se localizaron principalmente en pared de tubería (83%). Los ensayos de laboratorio demostraron que la mayor parte de las roturas de este material presentaron óxidos negros en su interior, lo que hace sospechar un aumento de su fragilidad ante sobrecargas y variaciones de presión.

El **fibrocemento** representó el 31% del total de roturas en tubería general de la muestra y el porcentaje de la muestra registrada con edad conocida es algo reducida para extraer conclusiones claras, pero aparentemente su función de fallos aumenta con la edad. La causa más frecuente de fallo son las variaciones de presiones o maniobras y fatiga (34%), presentándose la mayor parte de los fallos en pared de tubo con rotura de tipo longitudinal y explosivo. Este material presentó mayor vulnerabilidad a presiones estáticas más altas. Analizando los índices de roturas, se constataron roturas en cadena.

La **fundición dúctil** es el material presente en el 10% de las roturas de tubería general de la muestra. Es el material que mejor se comportó, teniendo en cuenta que supone un 70% de la red instalada (también es el más joven). La causa mayoritaria de fallo fue condiciones de instalación (36%) con modo de fallo circunferencial. Este material es robusto en relación a la cantidad de kilómetros instalados, pero parece mostrar un punto débil en las juntas representando la mitad de sus roturas, siendo este porcentaje en tubería general del 22%, debido a defectos de instalación, como ausencia de codos y macizos de anclaje.

El **polietileno fuera de norma** representa el 56% del total de las roturas en acometidas de la muestra y su curva de fallo es creciente con la edad, especialmente en las condiciones de la instalación que provocan fracturas por la concentración de tensiones en un punto (presencia de clastos, escombros...).

Se observó que una gran parte de las roturas se producen por defectos en las uniones, relacionadas éstas con las condiciones de instalación y de los elementos de unión. No obstante, la causa mayoritaria de rotura en este caso fueron las características del material, incluyendo el defecto y deterioro del mismo. Del ensayo de inducción a la oxidación se confirmó que las características del polietileno variaban entre las diferentes clases identificadas (PE32, PE50B y PE80), siendo el PE32 el más vulnerable a la degradación oxidativa, posiblemente por ser el de mayor antigüedad. No obstante, en el PE80 se observaron ciertas muestras en las que existía una pérdida significativa de antioxidantes en la superficie interior respecto de los valores de TIO hallados en la zona intermedia o en la superficie exterior.

El **polietileno dentro de norma** constituye el 18% del total de roturas de acometidas muestreadas y su curva de fallos decrece ligeramente con la edad. La causa más habitual de fallo es también el defecto de material (28%), aunque en menor proporción que en el polietileno fuera de norma, seguida de defectos de instalación (26%), con modos de fallo predominantes circunferencial y longitudinal. Es un material vulnerable a las condiciones de instalación presentando un porcentaje alto de roturas asociadas a fallos en uniones relacionadas con la instalación y los manguitos mecánicos. De los ensayos de degradación oxidativa se dedujo que los tubos negros con banda azul cuyas dimensiones coinciden con la clase de material PE100, presentaron bajo grado de degradación, con valores de TIO algo más elevados en la superficie interna que en la externa. Esto se justifica por ser el material plástico que mejores prestaciones tiene frente a la oxidación y que ha estado menos tiempo expuesto a los agentes desinfectantes presentes en el agua, ya que es el de más reciente instalación.

El **plomo**, con un 17% del total de roturas en acometidas de la muestra, falló mayoritariamente por la edad de la tubería y los defectos de material con rotura longitudinal. El análisis del índice de roturas para este material mostró un elevado número de roturas cercanas en los días previos al fallo, lo cual se explica en la alta densidad de la red y en la instalación de este material en un entramado urbano antiguo y complejo.

El **acero**, del cual solo se recogieron 17 muestras, presentó como causa mayoritaria de fallo corrosión con modo de fallo tipo agujero, detectándose fallos en las pinturas de recubrimiento.

De **PVC dentro de norma** se recogieron dos muestras de rotura en tubería general, cuya causa de fallo fue asentamientos del terreno con modo de fallo circunferencial.

En **caña** (5% de las roturas de acometida de la muestra) la causa mayoritaria de rotura fue la corrosión, con modo de fallo de tipo poro en cerca de la mitad de las roturas por esta causa.

#### 7.4. CAUSAS Y ELEMENTOS MÁS PRESENTES EN EL FALLO DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA

Por sus características específicas, se resumen a continuación las conclusiones derivadas del estudio para los conjuntos de medida.

En cuanto a las causas de fallo, la **corrosión** o **desgaste** es la causa principal y a ella se achacó aproximadamente el 75% de las roturas de la muestra. Constituyó la causa de fallo de más del 90% de los casos de roturas en accionamiento, obturador y eje de las llaves.

La siguiente causa de fallo más presente fue el **defecto de instalación**, con un 16% de ocurrencia en la muestra. El 40% de los defectos de instalación se produjeron en las uniones de las llaves, donde habitualmente se originan muchos fallos por un ajuste inadecuado de las uniones roscadas.

Se observó que las llaves eran un elemento mucho más débil que el elemento antirretorno y los contadores. Dentro de las roturas en las llaves prevaleció la rotura de los elementos de unión. Es llamativo, además, ver que este elemento rompió con mayor frecuencia en las válvulas de bola que en las de compuerta, siendo estas últimas, la mayoría de las veces, más antiguas. Cerca del 10% de las roturas de la muestra se produjeron en contadores, siendo mayoritariamente de tipo mecánico.

Se observó cierta relación entre la rotura de los elementos y su tipología de instalación. En armarios, el elemento que presentó mayores porcentajes de roturas fueron las uniones de las llaves; en arquetas, el accionamiento de las llaves; y en el cuarto de contadores, los obturadores de las llaves.

De la inspección visual se estimó que el 74% de los conjuntos de medida no cumplían la Especificación Técnica de Acometidas de Agua para Consumo Humano (Versión 2011).

En cuanto al estado de conservación, casi el 50% de los conjuntos de medida de la muestra se calificó como **defectuoso** debido a la corrosión, suciedad, ausencia de elementos, etc. El 47% restante tuvo una calificación de aceptable, y cerca del 5% se calificó como óptimo. No obstante, esta calificación se realizó por el personal que visitó las roturas y responde a criterios subjetivos.

ANEXOS



## **ANEXO 1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**AENOR** (1993). Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa. UNE EN 103300:1993. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1993). Determinación del contenido de carbonatos en los suelos. UNE 103200:1993. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1993). Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico. UNE 103204:1993. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1993). Determinación del límite plástico de un suelo. UNE 103104:1993. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1994). Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática. UNE 103301:1994. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1994). Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo. UNE 103302:1994. Madrid: AENOR

**AENOR** (1994). Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande. UNE EN 103103:1994. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1995). Análisis granulométrico de suelos por tamizado. UNE 103101:1995. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1995). Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo. UNE 103502:1995. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1996). Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo. UNE 103201:1996 Madrid: AENOR.

**AENOR** (1996). Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe. UNE 103600:1996. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1996). Tubos de materiales termoplásticos. Determinación de la rigidez anular. UNE-EN ISO 9969:1996. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1997). Plásticos. Tuberías de policloruro de vinilo (PVC) no plastificado y polietileno (PE) de alta y media densidad. Criterio para la comprobación de los tubos a utilizar en conducciones con y sin presión sometidos a cargas externas. UNE 53331:1997 IN. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1997). Sistemas de canalización y conducción en materiales plásticos. Tubos y accesorios de poliolefina. Determinación del tiempo de inducción a la oxidación. UNE-EN 728:1997. Madrid: AENOR.

**AENOR** (1999). Calidad del suelo. Determinación del pH. UNE 77305:1999. Madrid: AENOR.

**AENOR** (2001). Metal duro. Determinación metalográfica de la microestructura. UNE-EN 24499:2001. Madrid: AENOR.

**AENOR** (2002). Tubos termoplásticos. Determinación de las propiedades en tracción. UNE-EN ISO 6259:2002. Madrid: AENOR.

**AENOR** (2003). Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. UNE-EN ISO 178:2003. Madrid: AENOR.

**AENOR** (2003). Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua. Polietileno (PE). UNE-EN 12201-2:2003. Madrid: AENOR.

**AENOR** (2004). Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. UNE-EN ISO 1183-1:2004. Madrid: AENOR.



- AENOR (2007).** Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinell. UNE-EN ISO 6506-4:2007. Madrid: AENOR.
- AENOR (2007).** Sistemas de canalización en materiales plásticos para evacuación y saneamiento enterrado sin presión. Sistemas de canalización de pared estructurada de poli(cloruro de vinilo) no plastificado (PVC-U), polipropileno (PP) y polietileno (PE). Parte 2: Especificaciones para tubos y accesorios con superficie interna y externa lisa y el sistema, de Tipo A. UNE-EN 13476-2:2007. Madrid: AENOR.
- AENOR (2007).** Tubos, racores y accesorios de fundición dúctil y sus uniones para canalizaciones de agua. Requisitos y métodos de ensayo. UNE-EN 545:2007. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008).** Aceros y fundiciones. Toma de muestras y preparación de las mismas para la determinación de la composición química. UNE-EN ISO 14284:2008. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008).** Durabilidad del hormigón. Suelos agresivos. Determinación del contenido en ión sulfato. UNE 83963:2008. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008).** Tuberías, accesorios y piezas especiales de fundición dúctil y sus uniones para aplicaciones de saneamiento. Requisitos y métodos de ensayo. UNE-EN 598:2008. Madrid: AENOR
- AENOR (2010).** Materiales metálicos. Ensayo de tracción. UNE-EN ISO 6892-1:2010. Madrid: AENOR
- AENOR (2012).** Calidad del suelo. Determinación del pH. UNE-ISO 10390:2012. Madrid: AENOR
- AENOR (2012).** Ensayos no destructivos. Método de radiación. Tomografía digital. UNE-EN 16016:2012. Madrid: AENOR
- Almandoz, J. (2002).** Tesis: Directrices y herramientas de mejora del rendimiento hídrico en redes de agua urbanas. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Andreou, S. (1986).** Thesis: Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems. MIT, Cambridge, MA.
- Andreou, S., Marks, D.H. and Clark, R.M. (1987).** A New Methodology for modeling Break failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Applications. Journal of Advances in Water Resources, 10(1), pp. 11-20.
- ASTM (2000).** Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM-D2487:2000. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Bardet, J.P., Ballantyne, D., Bell et al. (2009).** Expert Review of Water System Pipeline Breaks in the City of Los Angeles during summer. Report to the Steering Committee on Water Pipeline Breaks of the City of Los Angeles.
- Blaha, F.J. (2011).** Pipe breaks as key data for active asset management of pipeline inventories. Water Asset Management International, 7, pp. 3-7.
- Boxall, J.B. O'Hagan, A., Pooladsaz, S., and Saul, A.J. (2007).** Estimation of burst rates in water distribution mains. Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Water Management, 160(2), pp.73-82.
- Canal de Isabel II (2004).** Normas para redes de abastecimiento. Madrid: Canal de Isabel II.
- Canal de Isabel II (2011).** Especificación Técnica de Acometidas de Agua para Consumo Humano. Madrid: Canal de Isabel II.
- Canal de Isabel II Gestión (Versión 2012).** Normas para redes de abastecimiento. Madrid: Canal de Isabel II Gestión.
- Clark, R.M., Stafford, C.L., Goodrich, J.A. (1982).** Water Distribution systems: A spatial and Cost Evaluation. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, 108, pp. 243-256.



- Construction innovation (1999).** IRC researchers investigate cast-iron pipe failure. Volume 4 (3).
- Cromwell, J., Speranza, L. (2007).** Asset management, too complicated? Just think about your car. American Water Works Association. Journal, 99(1), pp. 46-51.
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Whiter, J.T., Cunningham, R.J. (2001).** Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. Urban Water, 3(1-2), pp.73-89.
- Díaz-Parralejo, A., Sánchez-González, J., Gallego-Núñez, A., Guiberteau, F. (2009).** Estudio técnico sobre la rotura de tubos de presión de PVC. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.
- Eisenbeis, P. (1994).** Tesis: Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Eisenbeis, P., Røstum, J., Le Gat, Y. (1999).** Statistical Models for Assessing the Technical State of Water Networks - Some European Experiences. Proceedings of annual conference of AWWA, Chicago, USA: AWWA.
- Federation of Canadian Municipalities and National Research Council (2003).** Deterioration and inspection of water distribution systems. A best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure. Canada.
- Folkman, S. (2012).** Water Main Break Rates for the United States and Canada. : A Comprehensive Study. Utah State University. Buried Structures Laboratory.
- Friedman, M., G. Kirmeyer, J. Lemieux, M. LeChevallier, S. Seidl, and J. Routt. (2010).** Criteria for Optimized Distribution Systems. Denver, Colo.: Water Research Foundation.
- González Fernández, J.A. (1984).** Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. CSIC.
- Goulter, I., Kanzemi, A. (1988).** Spatial and Temporal Groupings of Water Mains Pipe Breakage in Winnipeg. Canadian Journal of Civil Engineering, 5, pp. 91-97.
- Hirner, W. (1997).** Technical, operational and economic performance indicators of water utilities. IWSA workshop on performance indicators for transmission and distribution systems. Lisboa. Portugal.
- Hu, Y., y Hubble, D.W. (2007).** Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains. NRC Research Press. Canadian Journal of Civil Engineering, 34, 5, pp. 608-621.
- ISO (2008).** Plásticos. Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Parte 6: Determinación del tiempo de inducción a la oxidación (OIT isotérmico) y de la temperatura de inducción a la oxidación (OIT dinámica). ISO 11.357-6:2008. Ginebra: International Standards Organization.
- ISO (2009).** Ductile iron pipes, fittings, accessories and their joints for water applications. ISO 2.531:2009. Ginebra: International Standards Organization.
- Jana Laboratories (2012).** Impact of Potable Water Disinfectants on PE Pipe. Technical Report. June 30.
- Jesson, D.A., Mohebbi, H., Farrox, J., Smith, P.A. (2013).** On the condition assessment of cast iron trunk mains: The effect of microstructure and in-service graphitisation on mechanical properties in flexure. Materials Science and Engineering, 576, pp. 192-201.
- Johnston, D. (2012).** Condition Assessment: Accurate Non-Invasive Measurement of Pipe Wall Thickness. OHAWWA Water Distribution Seminar.
- Kaara, A.F. (1984).** Thesis: A decision support model for the investment planning of the reconstruction and rehabilitation of mature water distribution systems. MIT, Cambridge, MA.

**Kelly, D., O'Day, D. (1982).** Organizing and analyzing leak and break data for making replacement decisions. Journal AWWA, November, 74(11), pp. 589-594.

**Kleiner, Y., Rajani, B. (2009).** The analysis of influential factors on the frequency of pipeline failures. Water Science & Technology: Water Supply—WSTWS, 9(6), pp. 689–698.

**Lackington, D.W., Large, J.M. (1980).** The integrity of existing distribution systems. Journal of the Institute of Water Engineers and Scientists, 34: 15-32.

**Lei, J. (1997).** Statistical Approach for Describing Lifetimes of water Mains – Case Trondheim Municipality. SINTEF Civil and Environmental Engineering, Report n. 22F007.28, Trondheim, Norway.

**Liu, Z., Kleiner, Y. (2013).** State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. Measurement, 46 (1), pp.1-15.

**Luong, H. T., Fujiwara, O. (2002).** Fund allocation model for pipe repair maintenance in water distribution networks. European Journal of Operational Research, 136, pp. 403-421.

**Mackellar, S., Pearson, S. (2003).** Nationally Agreed Failure Data and Analysis Methodology for Water Mains. Volume 1: Overview and Findings. Reference 03/RG/05/7, UK Water. Industry Research, London, UK.

**Makar, J.M, Rajani, B. (2000).** Gray cast-iron water pipe metallurgy. Journal of Materials in Civil Engineering, 12(3), pp. 245-253.

**Malandain, J., Le Gauffre, P. and Miramond, M. (1998).** Organising a Decision Support System for Infrastructure Maintenance: Application to Water Supply Systems. In: Proceedings of 1st International Conference on new information technologies for decision making in Civil Engineering, Oct 11-1998, Montreal, pp. 1013-1025.

**Martínez-Codina, Á. (2015).** Tesis: Metodología de análisis estadístico de roturas en redes de distribución de agua. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

**Morris, R.E. (1967).** Principal Causes and Remedies of Water Main Breaks. Journal AWWA, pp. 782-798.

**Mosevoll, G. (1994).** Vedlikehold og fornyelse av VA- ledninger: Modeller for tilstands-prognose / Funksjonskrav til informasjonssystemer. Dr.ing avhandling, Institutt for Vassbygging, Norges Tekniske Høgskole, Universitetet i Trondheim.

**National Research Council Canada (NRC) (1993).** Water Mains Break Data on Different Pipe Materials for 1992 and 1993. Ottawa. Canada.

**NTL 144/99.** Determinación del contenido en sales solubles de los suelos.

**O'Day (1989), D.K.** External Corrosion in Distribution Systems. American Water Works Association (AWWA) Journal, 81(10), pp 45-52.

**Pardo, M.A. (2010).** Tesis: Influencia de los costes del Agua y la Energía en la renovación de tuberías. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**Parra, J.C. (2013).** Tesis: Desarrollo de un conjunto de herramientas de soporte a la decisión y su implementación en un plan de gestión técnica para la renovación de redes de abastecimiento y saneamiento de agua. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**Pelletier, G., Mailhot, A., Villeneuve, J.P. (2003).** Modelling Water Pipe Breaks-Three Case Studies. Journal of Water Resources Planning and Management, 129 (2), pp.115-23.

**Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). 2002.**

**Pliego de prescripciones técnicas generales para tuberías de abastecimiento. 1974.**

- Rajani, B., Kleiner, Y. (2001).** Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban Water* 3, pp.151-64
- Rajani, B., Kleiner, Y. (2003).** Protection of ductile iron water mains against external corrosion: review of methods and case stories. *Journal American Water Works Association*, 95(11), pp. 110-125.
- Rajani, B. (2009).** Tuberías de Polietileno y PVC. Rehabilitación y Renovación de tuberías de Agua. Instituto Tecnológico del Agua. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rajani, B., Abdel-Akher, A. (2012).** Re-assessment of resistance of cast iron pipes subjected to vertical loads and internal pressure. *Journal Engineering structures*, 45, pp. 192-212.
- Rostum, J. (2000).** Thesis: Statistical modelling of pipe failures in water networks. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Rozental, M. (2009).** The life cycle of polyethylene. Presentation at the ASTEE meeting. Nice, France.
- Sægrov, S. et al. (1999).** Rehabilitation of water networks: Survey of research needs and on-going efforts. *Journal of Urban Water*, 1(1), pp. 15-22.
- Shamir, U., Howard, D.D. (1979).** An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement, *Journal AWWA*, May, 71, pp. 248-258.
- Seica, M.V., Packer, J.A., Grabinsky, M.W.F., Adams, B.J. (2002).** Evaluation of the properties of Toronto iron water mains and surrounding soil. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29, pp. 22-237.
- Seica, M.V., Packer, J.A. (2004).** Mechanical Properties and Strength of Aged Cast Iron Water Pipes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), pp. 69-77.
- Sundahl, A.C. (1996).** Diagnos av vattenledningars kondition. Report 3200, Institutionen för teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola, Lunds Universitet.
- Sundahl, A.C. (1997).** Geographical analysis of water main breaks in the city of Malmö, Sweden. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 46(1), pp. 40-47.
- Tullis, B., Barfuss, S., Christensen, R. (2006).** Changes in hydraulic roughness coefficients for circumferentially strained M294 pipe. Transportation Research Board (TRB).
- UtilNets (1997).** Reliability-Based decision support system for the maintenance management of the underground network of utilities. (Final technical report), Computer Technology Institute.
- Walski, T.M., Pelliccia, A. (1982).** Economic Analysis of Water Main Breaks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 74, pp. 140-147.
- Walski, T.M. et al. (1986).** Conducting a pipe break analysis for a large city. In *American Water Works Association Conference*. Denver.
- Wang, Y. (2006).** Thesis: Deterioration and condition rating analysis of water mains. Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
- Watson, T.G. et al. (2004).** Bayesian-based pipe failure model. *Journal of Hydroinformatics*, pp. 259-64.
- Wengström, T.R. (1993).** A comparative analysis of pipe breaks rates. A literature review. Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Chalmers University of Technology, Department of Sanitary Engineering.
- Wengström, T.R. (1993).** Drinking water pipe breakage records: a tool for evaluating pipe and system reliability. Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Yamijala, S. (2007).** Thesis: Statistical Estimation of Water Distribution System Pipe Break Risk. A&M University, Texas.

## ANEXO 2. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	METODOLOGÍA DE TRABAJO	13
2	DISTRIBUCIÓN DE LOS REGISTROS DE LA MUESTRA DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA SOBRE LA RED DE ABASTECIMIENTO Y SOBRE LOS PUNTOS DE ACOMETIDA	14
3	COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	16
4	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN LA MUESTRA Y EN CANAL DE ISABEL II, SEGÚN LA TIPOLOGIA DEL ELEMENTO	17
5	CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN TUBERÍAS, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA	19
6	LOCALIZACIÓN DEL FALLO EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS	20
7	LOCALIZACIÓN DEL FALLO EN CONJUNTOS DE MEDIDA	20
8	CLASIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO PARA TUBERÍA Y ACOMETIDA	21
9	DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA DE POLIETILENO, SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	24
10	CURVAS COMPARATIVAS DE FALLO-EDAD (ROTURAS/KM)	25
11	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN GRIS	26
12	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FIBROCEMENTO	27
13	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN DÚCTIL	28
14	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA	29
15	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA	30
16	RELACIÓN CAUSA Y MODO DE FALLO PARA ACOMETIDAS DE PLOMO	31
17	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA, SEGÚN ELEMENTO DE FALLO	32
18	MODOS DE FALLO EN TUBERÍAS (FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2003)	39
19	FALLO FRÁGIL EN UNA TUBERÍA PLÁSTICA	40
20	DISTRIBUCIÓN DE LOS REGISTROS DE LA MUESTRA DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, ACOMETIDAS Y CONJUNTOS DE MEDIDA	44
21	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 1 DE 8)	49
22	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 2 DE 8)	50
23	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 3 DE 8)	51
24	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 4 DE 8)	52

Estudio de casuística y modos de fallo en tuberías, acometidas y conjuntos de medida de la Comunidad de Madrid

Anexos

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
25	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 5 DE 8)	53
26	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 6 DE 8)	54
27	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 7 DE 8)	55
28	FICHA DE CAMPO. TUBERÍA GENERAL (PARTE 8 DE 8)	56
29	COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	64
30	ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	64
31	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS VISITADAS, SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL ELEMENTO	65
32	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CANAL DE ISABEL II, SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL ELEMENTO	65
33	PORCENTAJES DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL Y ACOMETIDAS, SEGÚN MATERIAL	67
34	PORCENTAJES DE ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL, SEGÚN MATERIAL	67
35	ROTURAS DE EDAD CONOCIDA-REPARTO POR EDADES (AÑOS)	68
36	MATERIAL DE ROTURAS VISITADAS EN ACOMETIDAS	69
37	CONJUNTO EN ESCUADRA CON LOS COMPONENTES PRINCIPALES	70
38	DIÁMETRO NOMINAL DE LOS CONTADORES DE LA MUESTRA Y DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS DE CANAL DE ISABEL II	71
39	EDAD DE LOS CONTADORES DE LA MUESTRA Y DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS DE CANAL DE ISABEL II	71
40	CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA DEL CONJUNTO DE MEDIDA, A) Y B)	72
41	ROTURAS DE EDAD CONOCIDA EN TUBERÍA GENERAL DE LA MUESTRA	75
42	ROTURAS DE EDAD CONOCIDA EN TUBERÍA GENERAL REGISTRADAS EN LAS BASES DE DATOS	76
43	FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA SEGÚN LA EDAD DE LA TUBERÍA	77
44	FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA SEGÚN DIÁMETRO, PARA TUBERÍA GENERAL Y ACOMETIDAS	79
45	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ROTURAS EN LA MUESTRA DE TUBERÍA GENERAL, SEGÚN EL MATERIAL	80
46	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ROTURAS EN LA MUESTRA DE ACOMETIDAS	81
47	FDA GENÉRICA Y DE LA MUESTRA SEGÚN MATERIAL	83
48	FUNCIÓN DE FALLO EN CONTADORES DE CON JUNTOS DE MEDIDA DE EDAD CONOCIDA	85
49	FDA DE LA EDAD DE LOS CONTADORES DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	86
50	FDA DEL DIÁMETRO NOMINAL DE LOS CONTADORES DE LAS ROTURAS REGISTRADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	87

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
51	DISTRIBUCIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	88
52	DISTRIBUCIÓN DEL ALOJAMIENTO DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	88
53	DISTRIBUCIÓN DEL MONTAJE DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	89
54	RELACIÓN DE LOS FALLOS SEGÚN ALOJAMIENTO Y EL MONTAJE DE LOS CONJUNTOS DE MEDIDA DE LA MUESTRA	89
55	CAUSA DE ROTURA POR PRESENCIA DE RAÍCES	92
56	ROTURAS PROVOCADAS	92
57	ROTURAS POR SOBRECARGA EXTERNA	93
58	ROTURAS POR CORROSIÓN	93
59	PRESENCIA DE ÓXIDO NEGRO EN TUBERÍAS DE FUNDICIÓN GRIS	95
60	ROTURAS EN TUBERÍA DE PLOMO Y FUNDICIÓN GRIS	95
61	ROTURAS EN TUBERÍAS DE FUNDICIÓN GRIS	96
62	EVIDENCIAS DE ROTURAS POR DEFECTO DE INSTALACIÓN	97
63	ROTURAS POR MANIOBRAS O VARIACIONES DE PRESIÓN	98
64	ROTURAS POR OTRAS CAUSAS	99
65	CAUSA DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL	100
66	CAUSA DE FALLO EN ACOMETIDAS	101
67	PROBABILIDAD ACUMULADA SEGÚN LAS CAUSAS DE FALLO	102
68	PORCENTAJES DE ROTURAS RELATIVOS A CADA CAUSA DE FALLO, SEGÚN CUMPLIMIENTO DE RECUBRIMIENTO MÍNIMO EN ZANJA	104
69	INCIDENCIAS EN JUNTAS ELECTROSOLDABLES	105
70	ROTURAS DEBIDAS A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS	106
71	ROBO DE CONTADOR, SE COLOCÓ UN PUENTE DE POLIETILENO PROVISIONAL	107
72	PÉRDIDA DE FUNCIONALIDAD EN UNA VÁLVULA DE COMPUERTA, POR CORROSIÓN E INCRUSTACIONES DE HIERRO	107
73	FALLO POR DEFECTO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN. ESFERA DE UNA VÁLVULA DE BOLA A ESCUADRA EN LA CUAL NO SE PRACTICÓ EL ORIFICIO DE SALIDA DE LA ESFERA	108
74	CAUSAS DE FALLO EN CONJUNTOS DE MEDIDA	110
75	ROTURAS EN TUBO Y JUNTA	111
76	EJEMPLOS DE VÁLVULAS AFECTADAS	112

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
77	LOCALIZACIÓN DE LAS ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL	113
78	LOCALIZACIÓN DE LAS ROTURAS EN ACOMETIDA	113
79	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS SEGÚN ELEMENTO DEL CONJUNTO DE MEDIDA	114
80	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONTADORES SEGÚN EL TIPO DEL MEDIDOR	114
81	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE MEDIDOR	115
82	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN MATERIAL DEL OBTURADOR	116
83	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE ACCIONAMIENTO A LA ENTRADA	117
84	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA SEGÚN ELEMENTO DE FALLO Y TIPO DE ACCIONAMIENTO A LA SALIDA	118
85	MODO DE FALLO CIRCUNFERENCIAL	119
86	MODO DE FALLO LONGITUDINAL	120
87	MODO DE FALLO EXPLOSIVA	120
88	MODO DE FALLO PORO	120
89	MODO DE FALLO AGUJERO > 1 CM	121
90	MODO DE FALLO FUGA	121
91	FDA DE LA MUESTRA SEGÚN LOS MODOS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL Y EN ACOMETIDA	123
92	RELACIÓN CONTENIDO EN FÓSFORO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE LAS MUESTRAS DE FUNDICIÓN	126
93	RELACIÓN CAUSAS DE FALLO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE MUESTRAS DE FUNDICIÓN	127
94	RELACIÓN MODO DE FALLO-PRESENCIA DE ESTEADITA EN LA ESTRUCTURA DE MUESTRAS DE FUNDICIÓN	127
95	RELACIÓN CONTENIDO DE FÓSFORO/CONTENIDO EN SILICIO, EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL	128
96	RELACIÓN MODO DE FALLO-CONTENIDO DE AZUFRE EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN	128
97	DENSIDAD MEDIA (G/CM <sup>3</sup> ) EN MUESTRAS DE POLIETILENO EN PRIMERA FASE	130
98	DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA	131
99	DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE TIO EN TRES CAPAS DE LA TUBERÍA, SEGÚN CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	132
100	RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ENSAYOS TIO EN PE32 Y MODOS DE FALLO	133



<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
101	RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ENSAYOS TIO EN PE50B Y MODOS DE FALLO	134
102	CURVAS COMPARATIVAS DE FALLO-EDAD (ROTURAS / KM)	141
103	CAUSAS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN FUNCIÓN DE LA EDAD	142
104	RELACIÓN ENTRE LAS CAUSAS Y LOS MODOS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL DE LA MUESTRA	143
105	RELACIÓN ENTRE LAS CAUSAS Y LOS MODOS DE FALLO EN ACOMETIDA DE LA MUESTRA	145
106	CAUSAS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL - LOCALIZACIÓN DE LA ROTURA	146
107	CAUSAS DE FALLO EN ACOMETIDAS - LOCALIZACIÓN DE LA ROTURA	147
108	DISTRIBUCIÓN DE ROTURAS SEGÚN ELEMENTO DEL CONJUNTO DE MEDIDA EN FUNCIÓN DE LAS PRINCIPALES CAUSAS DE FALLO	148
109	RELACIÓN ENTRE EL MATERIAL Y LOS MODOS DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL	149
110	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN GRIS, EN TUBERÍA GENERAL	150
111	ROTURAS EN TUBERÍA DE FUNDICIÓN GRIS, POR CORROSIÓN Y SOBRECARGA	151
112	TUBO DE FUNDICIÓN GRIS SEMIOBSTRUIDO POR INCRUSTACIONES	152
113	FUNCION DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN GRIS DE EDAD CONOCIDA	152
114	RELACIÓN CAUSA DE FALLO – MODO DE FALLO EN ROTURAS DE TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN GRIS	153
115	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FIBROCEMENTO DE TUBERÍA GENERAL	154
116	RELACIÓN CAUSA DE FALLO – MODO DE FALLO EN ROTURAS EN TUBERÍA GENERAL DE FIBROCEMENTO	154
117	TUBERÍAS DE FIBROCEMENTO CON ROTURA EXPLOSIVA POR VARIACIONES DE PRESIÓN	155
118	FUNCION DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN MUESTRAS DE FIBROCEMENTO Y EDAD CONOCIDA	155
119	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL DE TUBERÍA GENERAL	156
120	RELACIÓN CAUSA DE FALLO–MODO DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL DE FUNDICIÓN DÚCTIL	157
121	INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL	157
122	FUNCION DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL EN MUESTRAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL Y EDAD CONOCIDA	158
123	RELACIÓN ENTRE MATERIAL Y MODOS DE FALLO EN ACOMETIDA	159
124	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA - ACOMETIDAS	160
125	RELACIÓN CAUSA DE FALLO–MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA	161
126	ROTURAS EN POLIETILENO FUERA DE NORMA, OCASIONADAS POR DEFECTO INSTALACIÓN	161

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
127	ROTURAS DE POLIETILENO FUERA DE NORMA, CON EDAD CONOCIDA, EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA	162
128	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA DE ACOMETIDAS	163
129	RELACIÓN CAUSA DE FALLO–MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA	164
130	ROTURAS DE POLIETILENO DENTRO DE NORMA, CON EDAD CONOCIDA, EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA	164
131	CAUSAS DE ROTURAS EN MUESTRAS DE PLOMO DE ACOMETIDAS	165
132	RELACIÓN CAUSA DE FALLO–MODO DE FALLO EN ACOMETIDAS DE PLOMO	166
133	ACOMETIDA DE PLOMO CON ROTURA LONGITUDINAL POR DEFECTO DE MATERIAL	166

### ANEXO 3. ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1	ÍNDICES DE ROTURA POR KM INSTALADO, SEGÚN MATERIAL	18
2	TIPOLOGÍA DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	22
3	TIPOLOGÍA DE LOS ENSAYOS EN LABORATORIO	57
4	VARIABLES REGISTRADAS EN LA BASE DE DATOS DE LA MUESTRA DE ROTURAS	61
5	ROTURAS DE ACOMETIDAS Y TUBERÍAS VISITADAS SEGÚN MATERIAL	66
6	DESVIACIÓN OBSERVADA ENTRE LAS ROTURAS MUESTREADAS Y LA BASE DE DATOS DE ROTURAS DE CANAL DE ISABEL II	68
7	ÍNDICES DE ROTURA POR KILÓMETRO INSTALADO, SEGÚN MATERIAL	82
8	CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN TUBERÍAS Y ACOMETIDAS	91
9	RESUMEN DE LA CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS CAUSAS DE FALLO	100
10	CAUSAS DE FALLO CONSIDERADAS EN CONJUNTOS DE MEDIDA	106
11	DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA SEGÚN TIPOLOGÍA DE INSTALACIÓN	112
12	CLASIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO	119
13	DISTRIBUCIÓN DE LA INCIDENCIA DEL MODO DE FALLO EN TUBERÍA GENERAL Y EN ACOMETIDAS DE LA MUESTRA	122
14	PORCENTAJES DE CAUSA DE FALLO EN MUESTRAS DE TUBERÍA DE FUNDICIÓN, SEGÚN EL CONTENIDO EN FÓSFORO	125
15	RESISTENCIA PENETRACIÓN KG/CM <sup>2</sup> . CAUSAS DE FALLO-LOCALIZACIÓN DEL FALLO	139
16	RESISTENCIA PENETRACIÓN KG/CM <sup>2</sup> . MODO DE FALLO	139

# Canal de Isabel II



Santa Engracia, 125. 28003 Madrid

[www.canaldeisabelsegunda.es](http://www.canaldeisabelsegunda.es)