

TUBERIAS DE FUNDICION PARA LA CONDUCCION DE AGUA POTABLE

JOSE CLIMENT BELTRAN (*)
ANGEL MARTINEZ DEL OLMO (**)

RESUMEN. En base a muestras de tuberías rotas en servicio y las nuevas recepcionadas con objeto de sustituirlas, el laboratorio las clasificó mediante ensayos específicos de: fractura, propiedades mecánicas, ensayos químicos y metalográficos, al objeto de valorar las propiedades de las fundiciones de la red de abastecimiento de Madrid.

Como resultado de esta clasificación y de la observación de las posibles causas de rotura fue evaluada su incidencia en los diferentes tipos y, comparativamente, la idoneidad de la nueva fundición que las sustituya, indicando los ensayos complementarios que serían necesarios para una mejor adecuación en el uso e instalación.

ABSTRACT. *On the basis of samples of broken pipes in service and new ones to replace them, the laboratory classified them, through specific tests, into the following categories: fracture, mechanical properties, chemical and metalographic tests, in order to evaluate the properties of the casting pipes of Madrid's water-supply network.*

As a result of this classification and of the observation of possible causes of breakage, a comparative evaluation of the different incidences was made, together with the suitability of the new casting pipes that replaced them, indicating the additional tests that would be necessary in order to improve their use and installation.

ANTECEDENTES

El Canal de Isabel II y el L.C.E. y M. suscribieron un convenio de colaboración científica para que éste determinase las causas de rotura de las tuberías de la red de distribución de agua de Madrid, el estado de las tuberías aún en servicio y controlase, a partir de tal momento, la calidad del material de la tubería que sustituya a la dañada. La duración total del convenio fue de tres años.

INTRODUCCION

La aplicación de las tuberías de fundición de hierro a la conducción de aguas para el abastecimiento de núcleos habitados data de 1455 en Alemania, y de 1664 a 1688 en Francia para abastecer de agua a la ciudad de Versalles. Desde entonces hasta nuestros días el uso de este tipo de materiales se ha incrementado notablemente al responder a las exigencias de integridad y continuidad que eran necesarias en las conducciones; exigencias que han cumplido satisfactoriamente estos materiales, probado por su rendimiento desde esas primeras fechas.

Hasta 1902 no existió norma de diseño de tuberías de fundición y los espesores de las mismas eran únicamente función de la presión. Es en 1926 cuando la Asociación Americana de Normas realiza investigaciones sobre tuberías con cargas combinadas de presión interna y carga externa que permitió dar a conocer un método de determinación de espesores en tuberías de fundi-

ción gris. Las consideraciones de carga que una estructura de este tipo puede presentar son: a) una presión de trabajo; b) sobrepresiones del agua sobre la tubería; c) cargas del terreno circundante y d) cargas motivadas por tráfico de vehículos. Se supone que las sobrepresiones y la carga de tráfico no ocurren al mismo tiempo, y por tanto el cálculo se realiza en base a dos tipos de combinación de cargas, primero: la presión de trabajo, la sobrepresión y la carga de la zanja; y segundo: la presión de trabajo, la carga de zanja y una carga de tráfico. Siendo elegido el mayor espesor resultante de acuerdo con las formas de diseño y los coeficientes de seguridad. Además de esto, se permite una pérdida de sección causada por corrosión y una tolerancia dimensional en la fabricación.

La evolución técnica permitió la fabricación de fundiciones férreas cada vez con mejores cualidades pasando por la fundición blanca, la atruchada, la gris, la maleable, hasta la dúctil. Por su técnica de moldeo, desde la colada en molde de arena vertical, la centrifugada en molde de arena, a la centrifugada en coquilla metálica. Todas ellas tienen en común ser aleaciones de hierro, carbono y silicio fundamentalmente, en las que la cantidad de carbono es mayor de la que puede ser retenida en solución sólida en la austenita a la temperatura eutéctica, por lo que el carbono excedente precipita en forma de grafito; que puede adoptar formas muy variadas que influyen notablemente en las características mecánicas, dando lugar a la necesaria clasificación por forma, distribución y tamaño del mismo, tomando el nombre general de fundiciones grises, y el complemento, por la forma del grafito variable de laminares a nodulares. La fundición dúctil o nodular es obtenida a partir de

(*) Dr. en Ciencias Químicas y licenciado en Ciencias Físicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX IMOPUI.

(**) Ingeniero Técnico Industrial, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX IMOPUI.

los mismos elementos básicos de las fundiciones férreas en las que la precipitación de grafito de forma esférica se consigue por aportaciones e inoculaciones de magnesio o cerio en el caldo de la colada.

La utilidad de estas fundiciones en la fabricación de tubos se caracteriza por su buena maquinabilidad, alta capacidad de amortiguamiento y fácil fabricación que las hace muy competitivas en relación al empleo de otros materiales.

Los diámetros de los tubos en una fabricación normal pueden ser de 75 a 600 mm y exteriormente estar recubiertos contra la corrosión con capas bituminosas, pvc, zinc. Interiormente se les protege por capas bituminosas o lechadas de cemento. Debido a la inferior tenacidad de las fundiciones grises con respecto a las nodulares, éstas tienden a sustituirse, por lo que la fabricación de la gris ha disminuido notablemente y se espera que cese totalmente en poco tiempo para este tipo de aplicaciones.

ENSAYOS

Los ensayos de laboratorio se realizaron en muestras adecuadas y en relación con el «Pliego de prescripciones técnicas generales para tuberías de abastecimiento de agua». Las exigencias de estas prescripciones para tuberías de fundición limita la forma de grafito a la laminar o esferoidal con una superficie de fractura regular y homogénea, exenta de defectos de colada que perjudiquen la resistencia, continuidad o el buen aspecto de la superficie del producto. Una resistencia mecánica garantizada por:

- Ensayo de rotura a tracción o flexo-tracción
- Ensayo de resistencia al impacto o resiliencia
- Dureza Brinell

para cada uno de los tipos de fundición en que pueden haberse fabricado los tubos. El laboratorio estableció los siguientes ensayos complementarios a los ya especificados:

Ensayos químicos:

- Determinación de pH y sales solubles totales del agua en contacto con la muestra de tierra que rodeaba al tubo, con el contenido en cloruros y sulfatos.
- Composición química de las incrustaciones depositadas por el agua de conducción, con determinación de silicio, alúmina, óxido férrico y ferroso, cal, magnesio, trióxido de azufre, cloruros, pérdida al fuego y agua total.
- Composición química de las fundiciones con determinación de carbono, azufre, manganeso, silicio y fósforo.

Ensayos metalográficos:

- Observación general del fragmento de tubería con descripción de la corrosión por situación, forma y profundidad y defectos de colada.
- Clasificación de la fundición por su fractura en laboratorio.
- Análisis y clasificación del grafito por su forma, distribución y tamaño.

- Determinación de la estructura base de la fundición.
- Reconsideración de las causas que condujeron al fallo en servicio de los diversos tipos de fundición encontrados en las tuberías.

RESULTADOS EN LA FUNDICIÓN GRIS DE GRAFITO LAMINAR

El volumen total de muestras recibidas durante la vigencia del Convenio ha sido de 830 correspondientes a tuberías rotas en servicio y 19 muestras para la valoración del estado de conservación de los tramos de conducción.

Los ensayos químicos de las incrustaciones en siete muestras sólo revelan productos normales de corrosión formados por óxidos, hidróxidos y carbonatos de hierro; los altos contenidos en sílice fue interpretado como depósitos de naturaleza arcillosa que portaba el agua de conducción. El análisis de las tierras no permitió establecer conclusiones definitivas de causa a efecto, al no ser posible realizar ensayos físico-químicos complementarios tales como conductividad eléctrica, grado de aireación, retención de agua, pH y potencial redox del lugar.

CLASIFICACIÓN DE LA FUNDICIÓN GRIS

El aspecto de la superficie de fractura de las muestras permitió una clasificación en cinco grandes grupos (I, II, III, IV y V) de acuerdo al tamaño de grano, color y brillo, y su distribución en el espesor del tubo. El cuadro 1 refleja el número de muestras encontradas de cada tipo; el cuadro 2 muestra la variabilidad en composición química y las propiedades mecánicas están resumidas en el cuadro 3 y son valores característicos medios del tipo de fundición de que se trata.

La clasificación de la fundición gris en los cinco tipos establecidos está condicionada por la composición química, fabricación y tratamiento térmico de cada tubo, lo que da lugar a estructuras metalográficas y resistencias mecánicas variables aún dentro de cada tipo de fundición. Dado el grado de deterioro por corrosión y a defectos notables por excentricidad y huecos, la extracción de probetas para realizar los ensayos mecánicos resultó a veces imposible y en otras produjo notables variaciones de comportamiento dentro de cada tipo.

Por su modo de fabricación fue diferenciado claramente las coladas en vertical con molde de arena (tipo I), en que observaban grandes excentricidades entre la cara externa e interna del tubo y notables defectos de fabricación tales como sopladuras, gotas frías y defectos de solidificación. En las coladas por centrifugación, no se observa excentricidad apreciable ni graves defectos, y

FUNDICIÓN GRIS GRUPO	I	II	III	IV	V
N.º DE MUESTRAS	377	170	195	65	23

CUADRO RESUMEN 1.

GRUPO Y COMPOSICION	I	II	III	IV	V
CARBONO (%)	3,7+4,3	3,7+4,3	3,7+4,1	3,5+4,0	3,8+4,1
AZUFRE (%)	0,05+0,10	0,02+0,05	0,02+0,08	0,04+0,08	0,05+0,06
MANGANESO (%)	0,5+1,0	0,5+0,8	0,4+0,7	0,25+0,75	0,70+0,77
SILICIO (%)	1,9+2,5	2,0+3,0	1,7+2,5	1,5+2,0	2,3
FOSFORO (%)	0,25+0,9	0,3+0,7	0,3+0,6	0,3+0,7	0,46+0,53

CUADRO RESUMEN 2.

GRUPO Y ENSAYO	I	II	III	IV	V
TENSION DE ROTURA A TRACCION (kg/mm ²)	15	25	22	25	26
TENSION DE ROTURA A FLEJO-TRACCION (kg/mm ²)	23	32,1	38	51	—
DUREZA BRINELL	181	—	170	190	260

CUADRO RESUMEN 3.

sí, en cambio, segregaciones de estructura (II, III y IV); las coladas en molde metálico tienen estructuras de tipo intermedio entre la blanca y gris en su cara externa (V). Esta segregación estructural pudo ser evitada por adecuados tratamientos térmicos de homogeneización de estructura.

Los ensayos metalográficos establecieron la estructura básica, la forma, distribución y tamaño del grafito para cada uno de los tipos, de acuerdo con la norma UNE 36.117 en:

Tipo I

Fundición gris de matriz perlítica con grafito laminar de forma I y distribución A en el centro, y distribución B en el borde exterior e interior del tubo.

Tipo II

Fundición gris de matriz ferrítica con grafito de forma III y distribución D en el exterior y forma I, y distribución A en el interior.

Tipo III

Fundición gris de matriz ferrítica con grafito de forma II y distribución D en el exterior y distribución A en el interior.

Tipo IV

Fundición atruchada de matriz cementítica por el exterior y ferrítica en el interior con grafito de forma II y distribución A en el exterior y distribución D en el interior.

Tipo V

Fundición semejante a la tipo III con la variante de que en su cara exterior presenta una matriz de cementita y grafito de distribución tal como la presentada por el tipo

IV, ambas causadas por una velocidad de enfriamiento más elevada en su cara externa.

CAUSAS DE ROTURA EN LOS TUBOS DE FUNDICION GRIS CON GRAFITO LAMINAR

Entre las causas posibles que pudieron dar lugar al fallo de los tubos en servicio se consideró las cinco siguientes como más representativas: corrosión, mecánicas, entalla, defectos de fabricación y tensiones. Las tres primeras causas motivadas por acciones ajenas al tubo y las dos últimas causas motivadas por el proceso de fabricación. Cada una de ellas por separado pudo conducir al fallo de la tubería, pero en general la causa es múltiple y en su clasificación se han tenido en cuenta las varias que pudieron afectar de modo notable a la integridad del tubo.

CAUSA DE ROTURA	INCIDENCIA DE LA CAUSA DE ROTURA SEGUN GRUPOS(%)					
	I	II	III	IV	V	% MEDIO
CORROSION	72	44	33	20	23	38,4
MECANICAS	34	49	67	57	39	53,2
ENTALLA	1	8	6	7	—	4,4
DEFECTOS DE FABRICACION	40	3	1	2	—	9,2
TENSIONES	9	35	23	35	36	27,6

La causa de mayor incidencia en el probable fallo de tuberías ha sido motivada por causas mecánicas fundamentalmente centradas en las de tipo III, V y IV, fundiciones todas ellas de características resistentes elevadas frente a los otros dos tipos restantes, pero con una baja resistencia al impacto y baja tenacidad.

El segundo factor en importancia ha sido la corrosión de las tuberías, afectando de modo notable a las de tipo I, II y III. Destacando considerablemente la I, fundición de colada en molde vertical, frente a las fundiciones centrifugadas. La falta de datos en cuanto a las agresividades del terreno y tiempo en servicio no permitió la comparación entre los diferentes tipos, siendo sin duda la de tipo I la más antigua de las fundiciones y por tanto el tiempo en servicio debió ser mucho mayor para este

tipo que para las restantes, y su incidencia en el fallo aumenta por esta causa.

La tercera causa está motivada por las tensiones creadas en el material debido a la segregación de estructuras y que tienen su origen en el proceso de fabricación, al no ser eliminadas en los posteriores tratamientos térmicos. La presencia de cementita en la superficie externa del tubo impide la maquinabilidad y favorece la rotura en su manipulación.

Los defectos de fabricación se refieren mayoritariamente a poros, huecos, sopladuras, gotas frías y excentricidad entre cara externa e interna, encontradas en el 40 % de los tubos de fundición de colada vertical que reducen la sección del tubo en algún caso hasta el 80 %; la aparición de estos defectos es insignificante en las fundiciones centrifugadas.

La última causa es la motivada por la toma secundaria de agua con perforación y roscado de tubería, al producir concentraciones de tensiones por entalla, acentuándose en las fundiciones de menor tenacidad a la fractura.

FUNDICION DE GRAFITO NODULAR O DUCTIL

El pliego de prescripciones técnicas admite la utilización de esta fundición cuando se garantiza una resistencia a tracción mínima de 43 kg/mm², un alargamiento del

8 % y una dureza Brinell máxima de 230 para los tubos centrifugados.

La norma UNE 36.118 tipifica la fundición dúctil en función de su resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento mínimos; variaciones de dureza a título orientativo y componente estructural predominante. La composición química se deja a criterio del fundidor con tal de que se obtengan las características mecánicas prescritas.

CLASIFICACION METALOGRAFICA

Por el aspecto de la superficie de fractura, la fundición dúctil se clasificó en:

Grupo I

Se aprecian tres zonas en la pared del tubo, una zona externa de grano fino y color gris claro de hasta 1,5 mm de espesor, una zona media de grano fino y color gris oscuro mate que ocupa el 75 % del espesor, y la más interna de color negro y porosa correspondiente a una zona de baja densidad con productos finales de solidificación.

Grupo II

Se aprecian dos zonas en la pared del tubo, la zona externa de grano grueso y color gris blanquecino brillante que ocupa hasta el 80 % de la sección y la zona interna



Muestras de tuberías rotas en servicio en su recepción en el laboratorio.

de color negro y porosa correspondiente a una zona de baja densidad formada con productos finales de solidificación.

Los valores característicos medios de resistencia a tracción, dureza y composición química se ofrecen en el cuadro siguiente:

GRUPO	RESISTENCIA A TRACCIÓN (kg/mm ²)	DUREZA BRINELL	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)				
			C	S	Mn	Si	P
I	47	159	3,80	0,011	0,42	2,52	0,12
II	53,5	186	4,0	0,015	0,43	3,55	0,17

La estructura básica de ambos tipos de fundición es ferrítica y sólo en tres tubos aparece perlita dispersa en los bordes de grano en cantidad ligeramente mayor al 10 % que la norma UNE 36.118 fija como límite máximo.

El grafito es en todas ellas de forma nodular al menos en un 90 %, con formas más o menos redondeadas y agrupaciones de nódulos en la cara externa del tubo y acumulación de productos finales de solidificación de baja densidad y pequeños huecos en su cara interna. Su tamaño oscila del 6 al 8 (UNE 36.117).

Las ventajas aportadas por la fundición dúctil para su empleo en tuberías de conducción de aguas se pueden resumir en:

- Propiedades mecánicas más uniformes al ser necesaria una composición en elementos químicos más cuidadosa para conseguir la nodulización del grafito.
- Superiores resistencias con alargamientos a rotura similares a los aceros, a igualdad de composición química que la fundición gris.

- Tenacidad a la fractura muy alta, como resultado de una deformación localizada de la ferrita alrededor de los nódulos de grafito. (La fragilidad de la ferrita sólo se produce a muy bajas temperaturas.)
- Muy buena maquinabilidad, pudiéndose trabajar perfectamente con herramientas con desprendimiento de viruta que las hace muy adecuadas para su manipulación y arreglo en el campo.
- Una resistencia a la corrosión sensiblemente parecida a la de fundición gris aún en suelos fuertemente agresivos. La protección exterior e interior de la tubería contribuirá notablemente a evitar la pérdida de sección por esta causa. Su valoración exigirá ensayos específicos de materiales de protección, en la adecuada protección de la tubería.
- Las propiedades al impacto de estas fundiciones con matriz ferrítica son muy altas, disminuyendo con cantidades de perlita creciente y mayores contenidos de fósforo y silicio, resultando poco afectadas por otros elementos prescritos dentro de las composiciones normales.

CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA EN EL CONTROL DE TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE FUNDICIÓN PARA UNA MEJOR ADECUACIÓN EN EL USO E INSTALACIÓN

La evolución en las técnicas de fundición ha mejorado notablemente las propiedades de estos materiales, fundamentalmente en sus características mecánicas, al conseguir dosificaciones más precisas con estructuras más dúctiles; por otra parte, la técnica de moldeo ha conseguido espesores más uniformes. Toda esta evolución ha reducido el necesario espesor de tubo bajo el punto de vista de comportamiento mecánico. Sin embargo, no se considera el factor corrosivo sino como un espesor inerte.



Tubos de fundición dúctil empleados en el abastecimiento y distribución de aguas, protegidos exteriormente con un producto bituminoso e interiormente con lechada de cemento, del tipo recepcionado en el laboratorio.



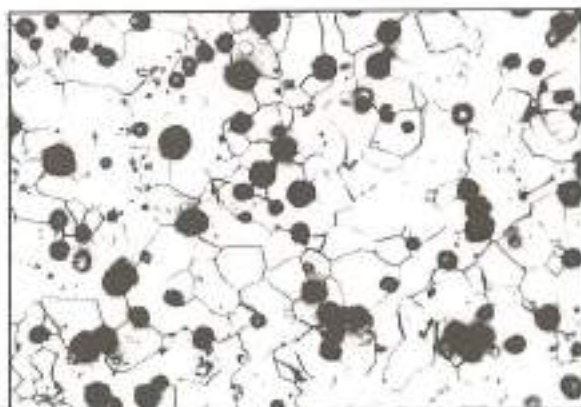
Estructura básica de las fundiciones de colada vertical con las láminas de grafito sobre un fondo de perlita. Aumentos $\times 500$.



Estructura básica de una de las fundiciones centrífugas con las láminas de grafito sobre un fondo de perlita y núcleos de estanho. Aumentos $\times 500$.



Estructura de la cora externa de una de las fundiciones centrífugas en molde metálico con observación de agrupaciones de grafito sobre un fondo de perlita y cemento libre. Aumentos $\times 500$.



Estructura básica de las fundiciones dúctiles con observación de los nódulos de grafito sobre un fondo de granos de ferrita. Aumentos $\times 500$.

mental a dar al tubo en el proyecto de espesor sin tener en cuenta el medio más o menos agresivo que lo envuelve, por lo que en algunas situaciones, esta reducción de espesor y un ataque corrosivo importante pueden conducir al fallo por esta causa.

La valoración y seguimiento de esta corrosión en las tuberías ya instaladas podría servir de punto de partida para un conocimiento más profundo de la incidencia de este fenómeno y a partir de estos datos aportar otras consideraciones complementarias para la elección del espesor de tubería de un determinado diámetro que las puramente mecánicas. La experiencia de otros países en este campo evalúa las siguientes causas como potencialmente peligrosas para las tuberías de fundición:

- La resistividad del suelo, valorándose por suelos muy peligrosos aquellos que presentan las resistividades más bajas.
- Los suelos fuertemente ácidos, caracterizados por su bajo valor en pH.
- Potencial redox del suelo, con valores inferiores a +100 mv, al considerar la posibilidad de la existencia de bacterias anaerobias en estas condiciones.
- Indicación de sulfuros en el suelo determinado por un ensayo cualitativo de reacción.
- Baja capacidad de drenaje de las tierras, permitiendo gran cantidad de humedad en contacto con la tubería por largos espacios de tiempo.

Como datos complementarios sería necesario la tipología de la tierra que envuelve a los tubos y descripción física en cuanto a color, tamaño de partículas, plasticidad, compacidad y uniformidad, así como la presencia de conducciones eléctricas próximas que pudieran originar corrientes vagabundas que favorecieran la corrosión.