

MODELIZACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS DE FRACTURA EN TUBERÍAS DE AMIANTO-CEMENTO AFECTADAS POR ATAQUE POR SULFATOS

Esperanza Menéndez^a, Cristina Márquez^{a,b}, Javier Sanchez^a, José M. Chillón^a

^a*Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC), Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid, España, emm@csic.es*

^b*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación – UPM, Avda. Complutense, 30, 28040 Madrid, España*

Keywords: Parámetros de fractura, tuberías amianto-cemento, ataque por sulfatos

Abstract. Las tuberías de fibrocemento se utilizan habitualmente para la conducción de agua. Generalmente este tipo de materiales son estables en contacto con el agua, una vez que se produce el equilibrio en lo que se refiere a migración de álcalis, debido al elevado pH de la matriz cementante. Si bien la presencia de sulfatos en el agua, como en el agua regenerada utilizada debido a escasez de agua natural, puede producir la alteración del material por la formación de productos expansivos. Estos productos expansivos, generalmente ettringita, fisuran el material a nivel microscópico introduciendo un daño en el amianto-cemento que produce una acumulación de tensiones, las cuales a su vez debilitan el comportamiento mecánico. Las microfisuras se forman anularmente, en dirección axial y siguiendo la dirección del flujo. La evolución de la microfisuración produce roturas en las tuberías de amianto-cemento, siendo la frecuencia de rotura cada vez mayor. El análisis, por un lado, del número y tamaño medio de fisuras en tuberías con diferentes grados de afección, y, por otro lado, de las características mecánicas del amianto-cemento permite generar modelos de predicción de tiempo y evolución de roturas en la red. El análisis de estos parámetros en tuberías que han sufrido roturas permite obtener el valor de la carga de rotura y generar un ábaco de comportamiento para distintos estados de deterioro del material, de acuerdo con el modelo de elementos finitos generado.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución de fluidos a presión se realiza utilizando diferentes tipos de tuberías, fabricadas con diferentes materiales como son los plásticos (PVC, PE, PRFV o polipropileno), hierro galvanizado, fundición gris, acero, hormigón (armado convencional, con camisa de chapa, pretensado, postensado, etc.), así como tuberías de amianto-cemento, a las que tradicionalmente se denominaba fibro-cemento. Las principales propiedades a considerar en el comportamiento de las tuberías son aspectos mecánicos, como la fragilidad y la resistencia a cargas externas e internas, características del material, como la rugosidad, el peso unitario o la necesidad de protección, así como otros aspectos entre los que se pueden considerar la facilidad de transporte y montaje, el mantenimiento o el envejecimiento. El uso de tuberías de amianto-cemento, principalmente en el transporte de agua, está ampliamente extendido debido a su fácil manipulación y mecanización, su buena resistencia a terrenos agresivos (salvo ácidos o sulfatos), baja rugosidad, buena capacidad hidráulica, bajo coste y gran fiabilidad. La utilización de fibras permite mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, especialmente en lo que se refiere a su comportamiento a tracción. Los compuestos de amianto-cemento han sido los más ampliamente más utilizados para diferentes aplicaciones en edificación debido a la disponibilidad y bajo coste; utilizándose entre un 5 y un 20% de fibras en la mezcla, mejorando en 2 a 4 veces la resistencia a flexión del material (Shah, 1981). La utilización del amianto-cemento comenzó en el año 1900, utilizándose ampliamente en diversas aplicaciones, de las que cabe destacar la conducción de agua (Studinkat, 1989). Sin embargo, a partir de los años 1980 se sustituyó el amianto por otras fibras, debido a la prohibición de uso del amianto, por sus consecuencias para la salud durante la fabricación de los productos. Las tuberías de amianto-cemento se comercializan en función de su diámetro interior y de su clase característica. Los diámetros interiores para la conducción de agua a presión varían entre 75mm y 2.000mm, siendo habitual el uso para abastecimiento de diámetros 250, 350 y 500mm. Con relación a las clases, éstas se establecen en función de la presión máxima de trabajo, que se expresa como kg/cm^2 , siendo las clases habituales en el mercado las correspondientes a 5, 7, 10, 14 y 20kg/cm^2 . Así mismo, se establece una resistencia mínima al aplastamiento en función de la clase resistente y del diámetro del tubo (ISO 2785, 1986 y UNE 88211, 1986).

Los amianto-cementos son materiales compuestos y, dependiendo del proceso de fabricación, las fibras pueden sufrir una cierta orientación, dependiendo de factores como la centrifugación del material durante la fabricación o el factor de forma de las fibras. En este sentido se considera que las fibras orientadas en la dirección de extrusión son de entre 1,5 y 2 veces a las fibras orientadas en la dirección transversal (Zevin y Zevin, 1979). Se comprueba la anisotropía de la distribución de las fibras cuando se ensayan muestras fabricadas con distinto grado de orientación, viendo que estos valores se sitúan entre los teóricos que consideran una deformación simultánea de matriz y fibra o diferencial (Zevin y Zevin, 1982). Ferrer y Benet (1986) consideran que el comportamiento del amianto-cemento es isótropo. El comportamiento mecánico del material amianto-cemento tiene unas características especiales, ya que su resistencia a compresión es muy elevada, mientras que la resistencia a flexión y a tracción son menores, especialmente cuando se analiza su comportamiento en secciones de tuberías. Como valores estándar del amianto-cemento se establece que la resistencia a compresión (sobre probetas $4\text{x}4\text{x}4\text{cm}$) es de 1.000kg/cm^2 , mientras que la resistencia a flexión transversal es de 450kg/cm^2 y la resistencia a flexión longitudinal es de 250kg/cm^2 . Por su parte, la resistencia a tracción pura se sitúa en torno a 225kg/cm^2 mientras que el módulo elástico medio es de 25GPa. Por su parte, en los ensayos de resistencia a tracción se observa que las fibras sufren principalmente arrancamientos (Hu y Hybble, 2007 y Mai, 1979).

Generalmente la rotura de tuberías de amianto-cemento se produce por fragilidad o debido a la rigidez del tubo que tienen una gran longitud durante la manipulación o instalación, y por problemas en las juntas, que al ser puntos sensibles producen desajustes que generan fugas o roturas cuando la tubería está en carga. Otros fallos pueden producirse como consecuencia de defectos de fabricación, movimientos del terreno, efectos de la temperatura (contracción o dilatación), fallos de resistencia a tracción o compresión y características del material; además se considera la potencial alteración

debido a acciones químicas internas y externas. Estas acciones pueden producir diferentes tipos de roturas como son grietas circunferenciales, desprendimientos, fisuras en la cabeza, fisuras espirales y grietas longitudinales (Hu y Hubble, 2007). En muchos casos los fallos están asociados con la pérdida de confinamiento lateral de las tuberías debido a la saturación de agua de los terrenos, en estos casos la aplicación de modelos de elementos finitos son una herramienta válida para predecir el comportamiento y los potenciales fallos de las tuberías para determinadas características de suelos (Francisca, Redolfi y Prato, 2002). Por su parte, el análisis de la microfisuración progresiva del amianto-cemento, en condiciones de no linealidad, permite elaborar un modelo teórico para predecir las curvas de tensión-deformación que se comprueba que concuerda con los resultados reales, lo que pone de manifiesto la influencia de las variables micromecánicas en las propiedades mecánicas macroscópicas (Valiente, 1986).

Además de cumplir unas propiedades mecánicas establecidas, las tuberías de amianto-cemento tienen que tener unas características que permitan resistir la potencial agresión externa a la que son sensibles los cementos. Las agresiones al cemento pueden venir desde el exterior (suelo o agua) o desde el interior a través del agua de la conducción. Las principales agresiones están relacionadas con los procesos de lixiviado de calcio, con la descalcificación de la pasta cementante, o bien por un ataque por sulfatos, generalmente asociados con un suelo o agua selenitosa. En el caso del lixiviado lo que se produce es un ataque ácido, mientras que en el ataque por sulfatos se producen la formación de productos expansivos que inducen la formación de fisuras. Teniendo en cuenta estas acciones se puede definir un índice de agresividad en función del pH del agua y de su dureza, si bien no tiene en cuenta la potencial presencia de sulfatos en el agua potable (Hu, Wang y Chowdhury, 2010; Hu, Wang y Chowdhury, 2010 y Menéndez, 2009),

Puesto que uno de los daños que se considera en estas tuberías es la descalcificación, uno de los parámetros de análisis es la carbonatación del material, analizando mediante fenoftaleína la sección transversal de amianto cemento, además de la composición elemental en esta sección (Stark, 2009). Por otra parte, existen diferentes trabajos relativos a la evaluación y cuantificación del lixiviado y descalcificación del amianto-cemento debido a su permanente contacto con el agua, modelizando la progresión de esta pérdida de cohesión del material con relación a la potencial aparición de roturas en la línea (Al-Adeeb y Matti, 1984 y Ping Hong, 1999). Así mismo, se han realizado trabajos analizando la susceptibilidad del amianto-cemento en contacto con los sulfatos, si bien en eso es cierto en algunos casos los ensayos se han realizado mediante ciclos de inmersión en disolución agresiva y secado, pero esto induce un proceso de cristalización de sales más que un ataque químico al cemento en si mismo. No obstante, es interesante observar que la formación de fisuras se produce en la dirección axial, paralelamente a la dirección de flujo, y no de forma transversal (Matti y Al-Adeeb, 1985). Pero como se indicado anteriormente los mecanismos de reacción del cemento portland en contacto con sulfatos llevan consigo una formación de productos expansivos como la ettringita o el yeso (Menéndez, 2009 y Menéndez 2010). En otros experimentos se observó la sensibilidad del amianto-cemento a la acción de los sulfatos cuando diferentes muestras de estos materiales se ponen en contacto con una disolución de sulfatos, de forma discontinua, observándose la formación de yeso en la pasta y en la interfase con las fibras de amianto, si bien en este caso existiría también un efecto de cristalización de sales (Sarkar, 1987).

Con relación específicamente a la presencia de sulfatos, diversas reglamentaciones establecen grados de agresividad potencial, en función del contenido de sulfatos presentes en el suelo o en el agua que puedan estar en contacto con las tuberías de amianto-cemento. Así, la American Water Works Association (AWWA) de Estados Unidos establece limita el contenido total de sulfatos (SO_4^{2-}) en el agua que circula por tuberías de amianto-cemento, estableciendo clases de agresividad, que corresponden a: < 150mg/L (no agresiva), entre 150 y 1500mg/L (agresividad media) y > 1500mg/L (agresividad elevada). Por otra parte, se establece la agresividad del suelo en función de los sulfatos totales presentes (SO_4^{2-}), de tal manera que se consideran los siguientes valores: <1000mg/l (no agresivos), entre 1000mg/l y 2.000mg/l (moderadamente agresivo y >2.000mg/L (suelos

medianamente agresivos). Adicionalmente se considera que elevados valores de sulfatos solubles en ácidos para los suelos aumentan la agresividad frente a los sulfatos en las tuberías (AWWA, 2003; AWWa, 2004 y Hu y Hubble, 2007). De forma más general, la Instrucción para el hormigón estructural EHE-08, establece límites de agresividad en cuanto al contenido en sulfatos (SO_4^{2-}), tanto de los suelos como de las aguas que puedan estar en contacto con el hormigón. La agresividad potencial del agua se establece en base al siguiente criterio: 200-600mg/l (agresividad baja), 600-3.000mg/l (agresividad media) y >3.000mg/l (agresividad elevada); mientras que el nivel de agresividad de los suelos es el siguiente: 2.000-3.000mg/l (agresividad baja), 3.000-12.000 mg/l (agresividad media) y >12.000 mg/l (agresividad elevada) (EH-E, 2008).

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS Y DEL AGUA

En el presente trabajo se modela el comportamiento mecánico de tuberías de amianto-cemento estableciendo su carga de rotura y estableciendo el modelo de secuencia de roturas en función del nivel de daño de las tuberías para un determinado momento de tiempo.

2.1. Características de las tuberías

Las tuberías afectadas corresponden a un sistema de distribución de agua potable regenerada. Esta agua tratada sale del centro de tratamiento y se distribuye a través de una red de tuberías de amianto-cemento de diámetros 350mm y 500mm.

En la Tabla 1 se recogen las características generales de la red, los parámetros mecánicos de las tuberías y las condiciones de uso.

Tabla 1. Características de las tuberías y de la red de distribución.

Instalación tuberías	Año de fabricación	1994
	Año de instalación	1995
Condiciones de carga y periodo de rotura	Periodo de uso a mediacarga	5 años
	Periodo de uso a carga completa	10 años
	Tiempo hasta primera rotura	6 años
Características mecánicas del amianto-cemento	Resistencia nominal ^(*)	7 kg/cm ²
	Presión en carga	6,3kg/cm ²
	Resistencia a flexión transversal ^(**)	450kg/cm ²
	Resistencia a flexión longitudinal ^(**)	250kg/cm ²
	Resistencia a tracción pura ^(**)	225kg/cm ²
Tubos en red	Módulo dinámico ^(**)	25GPa
	Número de tubos en la red	350
	Longitud de los tubos	6 m

^(*) Estimada en función de la presión de carga prevista en proyecto
^(**) Parámetros característicos de tuberías de amianto-cemento

Las tuberías de la red de agua regenerada comenzaron a sufrir roturas a partir de los 6 años de su instalación y un año después de trabajar a plena carga. Estas roturas fueron incrementándose progresivamente con el tiempo de uso. En la Figura 1 aparece recogida la frecuencia acumulada de roturas de tuberías durante los siete primeros años de uso en carga. Y, en la Figura 2 aparece una imagen del tipo de rotura que se produce, longitudinalmente.

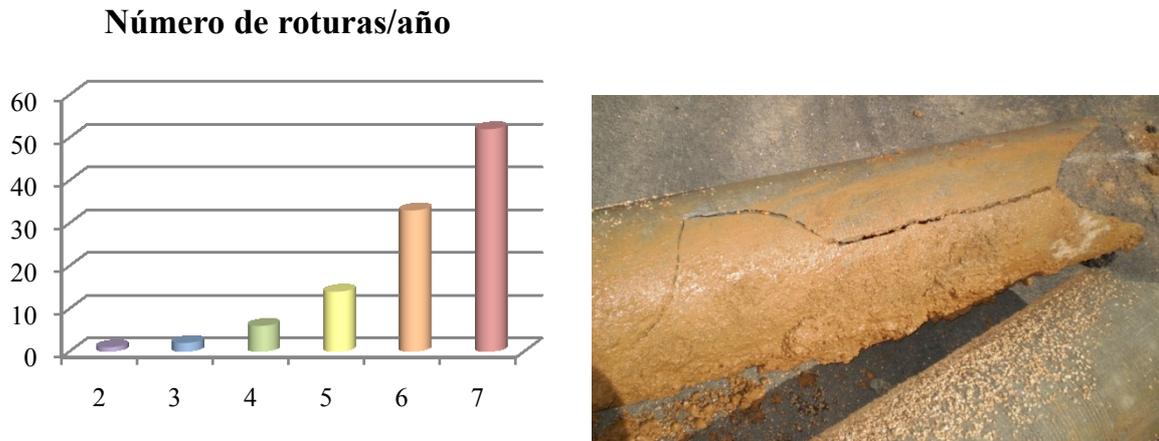


Figura 1. Número de roturas/año acumuladas durante los primeros siete años de uso de la red en carga. Figura 2. Tipo de rotura en las tuberías de amianto-cemento.

2.2. Características del agua regenerada

El agua que circula por la tubería procede de una planta de tratamiento que suministra agua regenerada. Para su control se determinan varios parámetros característicos de la calidad del agua como son el pH y el contenido en sulfatos, fosfatos, nitratos y nitritos. Además de estos parámetros químicos se determinan componentes orgánicos que, en ningún caso, superan los límites establecidos para la potabilidad. En la Tabla 2 se recogen las características químicas del agua regenerada con el valor promedio de cada uno, así como los valores máximos y mínimos.

Tabla 2. Parámetros químicos del agua regenerada.

Parámetros químicos	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
pH	7,12	7,20	7,05
Fosfatos(mg/l PO_4^{3-})	9,22	18	4
Sulfatos(mg/l SO_4^{2-})	197,67	376	149
Nitratos(mg/l NO_3^-)	188,89	375	151
Nitritos(mg/l NO_2^-)	<0,10	0,05	<0,10

De acuerdo con los resultados del análisis del agua regenerada, el contenido en sulfatos indicaría que ésta no es potencialmente agresiva, de acuerdo con los límites establecidos por la AWWA [21,22]; mientras que según la EHE-08 el valor medio estaría muy cerca de ser considerado como agresividad baja por sulfatos, con valores máximos que no llegan a ser considerados como agresividad media [23]. No obstante, la presencia permanente de sulfatos en el agua regenerada tiene un efecto muy negativo sobre la durabilidad de amianto-cemento.

3. ANÁLISIS DE LAS TUBERÍAS

Después de 10 años de trabajo en carga de la red de distribución de agua regenerada, se tomaron diferentes secciones de tuberías para ser analizadas y evaluar la causa de las roturas observadas. Las porciones de tubería fueron extraídas de distintas zonas de la red, parte de zonas afectadas por roturas y parte de zonas no afectadas hasta ese momento por roturas y que podrían considerarse sanas. Así mismo, se extrajo una porción de tubería que había sufrido rotura justo antes de la extracción. Hay que señalar que las roturas en la red siempre se han producido en los segmentos de 350mm de diámetro, no viéndose afectadas en ningún caso las de diámetro 500mm. Las tuberías de diámetro 350mm tienen un

espesor de pared de 25mm, mientras que las tuberías de mayor diámetro (500mm) muestran un mayor espesor de pared, de 35mm. En la Tabla 3 se recogen las características dimensionales y la zona de extracción de los tramos de tuberías.

Tabla 3. Características geométricas de las tuberías de ensayo y zona de extracción.

Denominación	Tramo afectado	Rotura tubería	Φ Interior (mm)	Longitud (m)	Espesor pared (mm)
AP350(1)	x	---	350	3	25
AP350(2)	x	---	350	3	25
AG500(1)	x	---	500	3	35
AM350(1)	x	x	350	2,57	25
NAF350(1)	---	---	350	3	25
NAF350(2)	---	---	350	3	25
NAM350(1)	---	---	350	3	25
NAM350(2)	---	---	350	3	25
NAM500(1)	---	---	500	3	35

3.1. Análisis microestructural del amianto-cemento

Se analizaron microestructuralmente muestras de cada una de las tuberías objeto de ensayo, mediante microscopía electrónica de retrodispersados combinada con microanálisis por energías dispersivas de rayos X, con el fin de identificar posibles alteraciones del material por efecto de la acción continuada del agua o bien del terreno. Para ello se prepararon muestras de la sección transversal de cada tubería, observándose y analizando los perfiles, desde la superficie de contacto con el terreno hasta la parte interna del material, en contacto con el agua regenerada.

En la parte interna de los tubos se observa una cierta carbonatación y descalcificación de la pasta, debido a la lixiviación producida por el contacto con el agua regenerada, sin que se aprecien alteraciones significativas.

Sin embargo, a lo largo de todo el espesor de las probetas se observó la presencia de numerosas microfisuras, paralelas a la dirección del flujo, formadas como consecuencia de la formación de ettringita. Esta ettringita es un producto expansivo, cuando se forma con el material endurecido, que se ha formado como consecuencia de la acción de los sulfatos procedentes del agua regenerada con cemento. A pesar de la calificación del agua como débilmente agresiva o no agresiva, según la reglamentación consultada [21-23], se comprueba que la acción continuada del agua con sulfatos puede generar un ataque por sulfatos severo en este tipo de materiales. Se observa que aparecen fisuras en todas las tuberías, independientemente de que éstas procediesen de zonas afectadas o no afectadas por roturas. En las Figuras 3 y 4 se pueden observar el aspecto de las microfisuras paralelas a la dirección del flujo y un detalle de las cristalizaciones de ettringita.

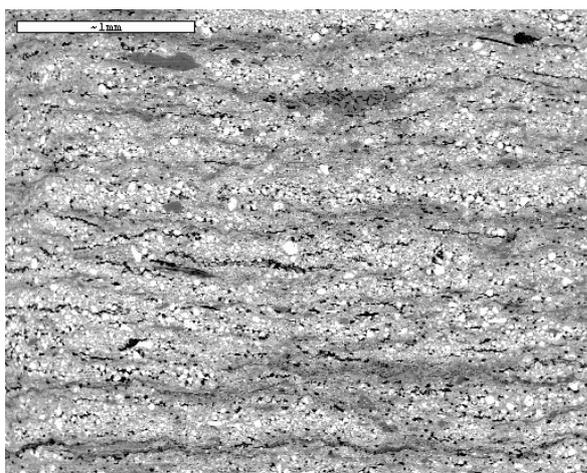


Figura 3. Fisuración generalizada paralela a la dirección de flujo.

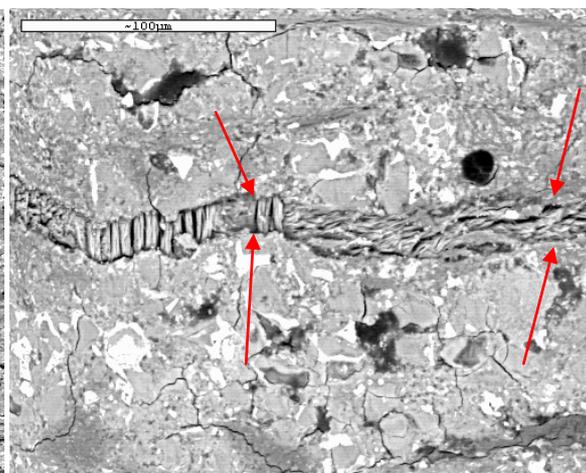


Figura 4. Detalle de cristalizaciones de ettringita en el interior de las fisuras.

El espesor de pared de los tubos de amianto-cemento es de 25mm, para los de diámetro 350mm, y de 35mm, para los de diámetro 500mm. Se ha cuantificado el número de fisuras a lo largo de varias líneas transversales a la sección de las tuberías, calculándose el número promedio de fisuras en la pared de cada tubería, tanto en las zonas próximas al terreno como en las zonas próximas al agua regenerada. También, se ha medido el espesor de las fisuras, donde se ha observado que existe una diferencia en el ancho de las fisuras entre la parte externa (en contacto con el terreno) e interna (en contacto con el agua regenerada) del tubo, determinándose un espesor promedio de fisura en cada zona. A partir del número de fisuras y del espesor promedio, se determina el espesor de fisuras equivalente promedio, que indica el ancho de fisura total en cada sección del tubería; calculándose a partir de este dato el porcentaje de espesor de pared fisurado en función del ancho total de la sección. Los valores resultantes para cada tubería aparecen en la Tabla 4. Se observa que el mayor número de fisuras a la vez que el mayor espesor promedio de fisura corresponde a la muestra de tubería que había sufrido rotura (AM350(1)). Por otra parte, se observa que el menor número de fisuras y el menor porcentaje relativo de ancho de fisuras lo tienen las tuberías de 500mm de diámetro, cuyo espesor de pared es mayor (35mm). Esto concuerda con la experiencia en la red, en la que no se han producido roturas en los tubos de 500mm de diámetro. Si bien se ha observado alteración por cristalización de ettringita y formación de fisuras todos los tubos, el grado de afección del material es diferente. En el caso de los tubos de 500mm, si bien la superficie expuesta es mayor que para los tubos de 350mm de diámetro, el mayor espesor de la pared permite asumir la formación de productos por reacción con los sulfatos con una fisuración limitada, lo que se traduce en menor pérdida de propiedades mecánicas de material. No obstante, el análisis mediante modelos de elementos finitos permite establecer el comportamiento futuro de estas tuberías que, después de diez años en carga expuestas a sulfatos, no han sufrido roturas.

Tabla 4. Características geométricas de las tuberías de ensayo y zona de extracción.

Esquema de medidas	Tubo	Nº de fisuras promedio	Espesor de fisuras(μm)			% fisuración en función del espesor de pared
			Interior	Exterior	equiv. prom.	
	AP350(1)	35	17,5	22,2	870	3,48
	AP350(2)	34	23,5	25	910	3,64
	AG500(1)	24	15	30	540	1,54
	AM350(1)	46	37,5	27,8	1.500	6
	NAF350(1)	36	20	20	720	2,88
	NAF350(2)	38	15	27	800	3,20
	NAM350(1)	41	35	17.5	1.080	4,32
	NAM350(2)	25	33	24	710	2,84
	NAM500(1)	23	35	22.5	660	1,88

4. MODELIZACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE LA APERTURA DE FISURAS Y DE LA EVOLUCIÓN DE ROTURAS EN LA RED

Con el fin de obtener el tiempo de rotura equivalente, para cada tubería en función de los parámetros de micro-fisuración debido al ataque por sulfatos y la estimación de la evolución de roturas en el tiempo, se ha realizado un modelización mediante elementos finitos.

Los cálculos se han realizado con el programa de elementos finitos COMSOLMULTIPHYSICS. Debido a la geometría del problema las simulaciones se han realizado en 2D axis-simétrica (Figura 7a). Las condiciones de contorno son de simetría en los extremos y se ha aplicado la presión en la cara interna de 630 kPa, presión correspondiente a las condiciones de trabajo. Debido a la falta de datos experimentales sobre el material sin daño y al comportamiento frágil de este tipo de materiales se ha considerado un comportamiento elástico lineal con un módulo elástico de 25 GPa [7,11].

Las fisuras se han introducido como lámina elástica en la que se ha impuesto una elevada rigidez ($k \sim 1e20 \text{ N/m}^3$) y se ha introducido una apertura de la misma controlada. De esta forma, la apertura de fisura introducida coincidirá con la medida experimentalmente en las probetas. Para cada uno de los casos se ha realizado un análisis paramétrico en el que se aumenta de forma lineal la apertura de las fisuras, tratando de reproducir el fenómeno de expansión de las fisuras con el tiempo. El caso inicial es el material sin fisuras y el caso final es el material con el estado de fisuras actual. Este análisis permite introducir la cinética de la reacción expansiva que produce la apertura de las fisuras suponiendo un crecimiento lineal desde el estado del material sano a tiempo 0 años hasta la apertura de fisuras medida para el tiempo de 10 años. Por otra parte, según los resultados experimentales obtenidos, se comprueba que la apertura de la fisura no es constante en todo el espesor del tubo. Por tanto, se ha propuesto un variación lineal entre la apertura de las fisuras en la parte interior (a partir de los datos de micro-fisuración de las tuberías en la zona próxima a agua regenerada) y la parte exterior de la tubería (a partir de los datos de micro-fisuración de las tuberías en la zona próxima al terreno).

Por último, la malla utilizada son elementos de cuatro lados de segundo orden (Figura 7b), resolviendo ~ 300.000 grados de libertad, lo que supone un tiempo de cálculo de ~ 3 min.

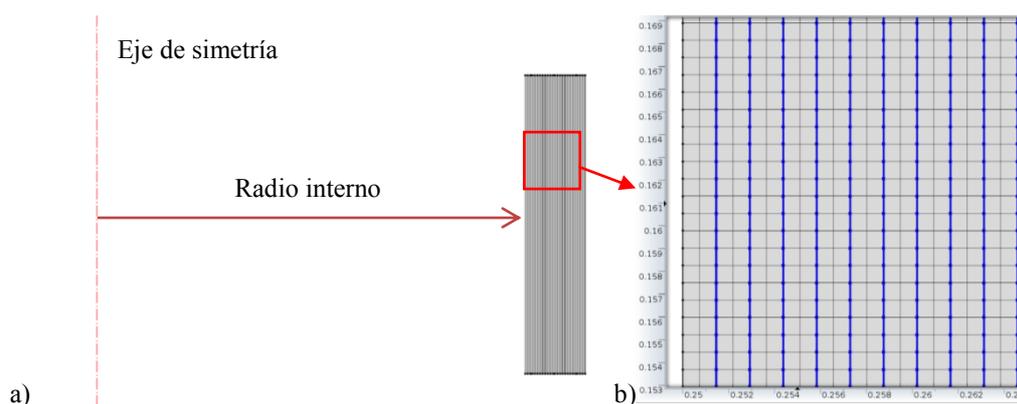


Figura 7. a) Esquema de la geometría empleada en el cálculo FEM y b) detalle de la malla empleada.

En la Figura 8 se muestra el resultado de la simulación de la tubería teniendo como parámetros de entrada los medidos en el tubo denominado AM350 (1). Este tramo de la tubería había sufrido rotura en servicio para $t = 10$ años y mostraba una parte fracturada. Debido a la falta de datos experimentales del material sin daño, se ha tomado como referencia para establecer las condiciones críticas de rotura. Tomando como criterio de rotura la tensión de von Mises, es posible obtener la tensión crítica para las condiciones de rotura: $\sigma_{mises,crit} = 103.7 \text{ MPa}$. Se aplicó el modelo de Von Mises debido a que se toma

una simetría axial y sobre la base que las cargas involucran solo la dirección radial. Además, el proceso de fisuración que se trata de simular el proceso de apertura de fisura, una vez que se ha superado la descohesión del material, no modelándose el proceso de fisuración.

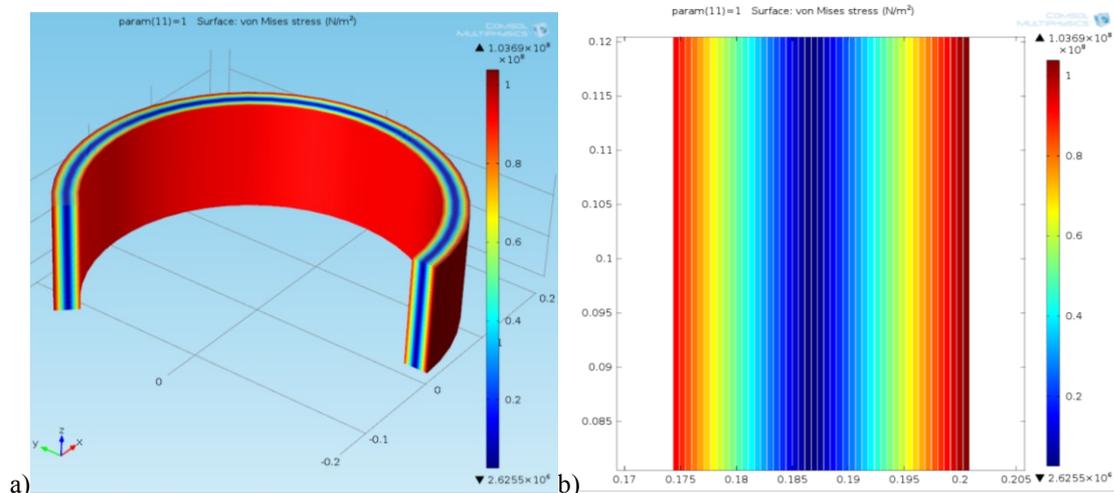


Figura 8. a) Tensión de von Mises para el tubo AM350(1) y b) detalle de la sección con $\sigma_{mises,max} = 103.7$ MPa.

En la Figura 9 se muestra la tensión máxima alcanzada en las diferentes tuberías objeto de estudio, en función del tiempo, donde $t = 10$ años es el tiempo al que se han realizado los ensayos experimentales. Todas las tuberías muestran daño, como se ha visto en el análisis micro-estructural, pero cada una de ellas tiene diferente estado de degradación. Según el criterio de rotura establecido, es posible obtener el periodo de vida útil para cada uno de los casos al cortar la tensión máxima con la tensión crítica de von Mises. Por otra parte, en la Figura 10 se ha estimado la vida útil de las muestras estudiadas, obteniéndose una vida promedio de 22,3 años con una desviación estándar de 9,8 años². Esta estimación obtenida se ha comparado con los datos de roturas de tuberías durante los primeros 7 años de funcionamiento en carga de las tuberías. A partir de estos resultados, en la Figura 11 se muestra que transcurridos 50 años de uso en carga de las tuberías, se habría producido la rotura de los 350 tubos de los que consta la red de distribución de agua regenerada. Se observa que existe una buena concordancia entre la estimación obtenida a través del análisis por FEM y los datos de roturas reales, producidas en la red de distribución durante los primeros siete años de uso en carga.

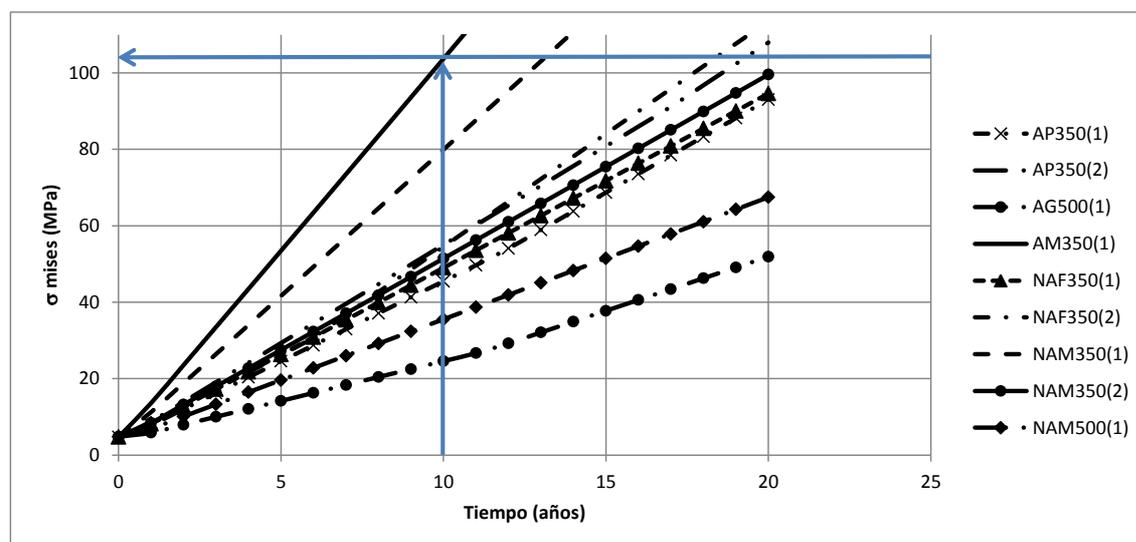


Figura 9. Criterio de rotura de las tuberías con las condiciones de contorno establecidas.

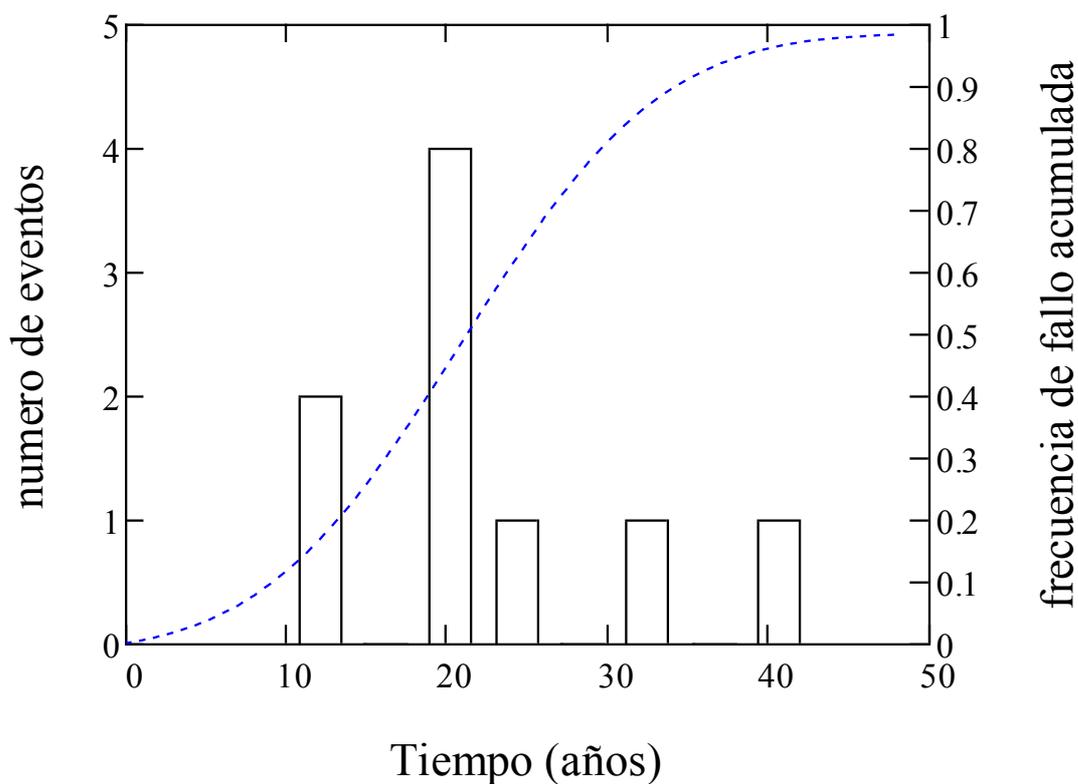


Figura 10. Frecuencia de fallos estimada, donde cada evento corresponde a 10 años de uso de las tuberías en carga. Promedio = 22,3 años y desviación estándar = 9,8 años².

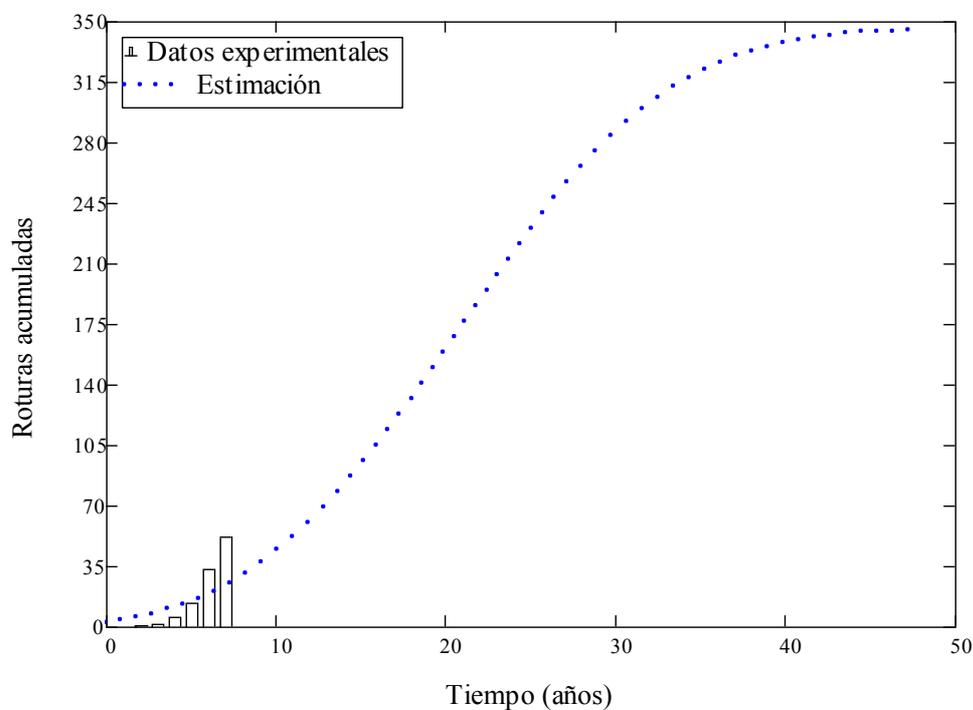


Figura 11. Ajuste de los datos reales de roturas, en los primeros años de funcionamiento en carga, frente a la previsión obtenida del modelo FEM.

5. CONCLUSIONES

El uso de tuberías de amianto-cemento en contacto con agua regenerada con un contenido en sulfatos relativamente bajo, en torno a 200mg/l, produce una alteración del material con la formación de ettringita y la inducción de formación de microfisuras paralelas a la dirección de flujo. Esto indica que, para este tipo de materiales, las reglamentaciones son poco conservadores en cuanto al riesgo de ataque por sulfatos, lo que estaría asociado con la exposición a este agresivo en condiciones de presión (6,3MPa), ya que los ensayos de laboratorio se realizan a presión atmosférica.

Se observa que hay una relación crítica con el espesor de pared y el diámetro de tubo, ya que para estas concentraciones moderadas de sulfatos, un incremento de material permite asumir las formaciones de productos expansivos sin que se produzcan roturas en la red.

El análisis micro-estructural permite obtener parámetros micro-mecánicos para alimentar el modelo en lo relativo a número y espesor de fisuras.

El modelado mediante elementos finitos permite establecer criterios de roturas de las tuberías que, correlacionados con la situación micro-mecánica de las tuberías después de 10 años de uso en carga, proporcionan información sobre la edad potencial de rotura de cada tubería analizada. Por otra parte, se ha inferido la frecuencia de fallos de las tuberías en las condiciones de trabajo, obteniéndose un valor promedio de vida de las tuberías de 22,3 años con una desviación de 9,8 años². Por último, se corrobora la validez del ajuste con los datos reales de roturas producidos durante los siete primeros años de uso de las tuberías en carga, estableciéndose la previsión total de rotura de las tuberías a 50 años de uso en carga.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida en los proyectos MICINN (MAT2010-21088-C03-03 y BIA2010-18863).

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Adeeb, A.M. y Matti, M.A. Leaching corrosion of asbestos cement pipes, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol, 6, n° 4, pp. 233-240 (1984)
- AWWA, Water stats 2002 distribution system survey, AWWA, Denver, CO (2004)
- AWWA, Standard for asbestos cement distribution pipe 4" to 16" for water and other liquids, AWWA C400-03, Denver, CO (2003)
- EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural, Ministerio de Fomento – Gobierno de España. Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento (2008)
- ISO 2785:1986, Directives for selection of asbestos-cement pipes subject to external loads with or without internal pressure, Ed. ISO (1986)
- Ferrer, J., Benet, M. Análisis de comportamiento de tubos de fibrocemento sometidos a presión interior y cargas externas, *Revista de Obras Públicas*, pp. 277-185 (1986)
- Francisca, F.M., Redolfi, E.R. y Prato, C.A. Análisis de tuberías enterradas en suelos loésicos: Efecto de la saturación del suelo, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol, n°2, pp. 3-20 (2002)
- Hu, Y., Hubble, D.W. Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, pp. 608-621 (2007)
- Hu, Y., Wang, D.L. y Chowdhury, R. Condition assessment methods for AC pipes and current prácticas, *ASCE Pipeline Conference*, Colorado (USA), pp. 1-11 (2010a)
- Hu, Y., Wang, D.L. y Chowdhury, R. AC pipe in North America: Inventory, breakage and working

- environments, *International Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 1 (4), pp.156-172 (2010b)
- Mai, Y.W. Strength and fracture properties of asbestos-cement mortar composites, *Journal of Material Science*, Vol. 14 pp. 2091-2102 (1979)
- Matti, M.A., Al-Adeeb, A.M. Sulfate attack on asbestos cement pipes, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol, 7, n° 3, pp. 169-176 (1985)
- Menéndez, E. y Andrade, C. Analysis of deterioration of the concrete of a sewer for industrial waste water with sulphates, *Proceedings of the International RILEM TC 211-PAE Final Conference on Concrete in Aggressive Aqueous Environments*, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 45-53 (2009)
- Menéndez, E. Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo, Ed. IECA (2010)
- Ping Hong, H. Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects, *Structural Safety*, 21, pp. 203-222 (1999)
- Sarkar, S.L., Jolicoeur, C. y Khorami, J. Microchemical and microstructural investigations of degradation in asbestos-cement sheet, *Cement & Concrete Research*, Vol. 17, pp. 864-874 (1987)
- Shah, S.P. Fiber reinforced concretes. A review of capabilities. Publication C810261, The Aberdeen Group (1981)
- Stark, G. Asbestos cement (AC) pipe condition evaluation, Ed. Levelton Consultant, Ltd., Canadá, (2009)
- Studinkat, J.B. Asbestos substitution in the fibre cement industry, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, n° 2, pp. 73-78 (1989)
- UNE 88211, Conducciones de amianto-cemento. Criterios mecánicos para la elección de tubos a utilizar en conducciones enterradas con o sin presión, Ed. AENOR (1990)
- Valiente, A. Efecto de la microfisuración de la matriz sobre la curva de tensión-deformación de fibrocementos. III Encuentro del grupo español de fractura, Guadalajara (España), pp. 229-235 (1986).
- Zevin, L.S., Zevin, I.M. Orientation of asbestos in asbestos cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 8, pp. 599-606 (1979)
- Zevin, L.S., Zevin, I.M. Asbestos cement: orientation of fibres and anisotropy of mechanical properties, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 4, n°3 (1982)