

## ESTUDIO DE LAS CAUSAS DE AGRIETAMIENTO DE LOS TUBOS DE VARIOS EVAPORADORES PERTECIENTES A INSTALACIONES FRIGORÍFICAS

E. Porto\*, F. Iglesias\*\*, P. Merino\*, A. Paz\*\*, F. Bouzada\*

\* Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Vigo

\*\* Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste (AIMEN)

**Resumen.** En las pruebas de frío llevadas a cabo en la puesta en marcha de unas instalaciones frigoríficas, se detectaron fugas por agrietamiento en varios codos de cuatro evaporadores. Los equipos miden 1300x700x1600 mm. Están conformados por 500 m de serpentín fabricado con tubo curvado en frío y soldado por tramos. Una vez construidos son galvanizados en caliente.

Para determinar la génesis del fallo, se ha caracterizado química, mecánica y estructuralmente el material de los tubos, y estudiando fractográficamente y por microsonda de EDX las superficies de fractura, a la vez que la evolución de las fisuras, mediante microscopía óptica.

Por la localización de las grietas, sus caracteres macro y micromorfológicos, su progresión y la naturaleza de los productos que se encontraron en su interior, se ha identificado el agrietamiento como un fenómeno de fisuración bajo tensiones por metal líquido.

Se evalúan las medidas preventivas para evitar el fallo.

**Abstract:** In the tests accomplished during the start of some refrigerating installations, some losses, due to fissures in four evaporators, were detected.

The dimensions of the equipment are 1300x700x1600 mm. They are built with cold bended tubes which are welded to form a 500m cooling coil. Once built, they are hot dip galvanized.

In order to determine the genesis of the failure, the material of the tubes was characterized chemically, mechanically and structurally; the fracture surfaces were studied fractographically and by EDX microprobe. The evolution of the fissures was studied by optical micrography.

By the location of the cracks, its macro and micromorphological characters, its progression and the nature of the products found inside, the cracking was identified as a liquid metal embrittlement phenomenon.

### 1. INTRODUCCIÓN

En cuatro evaporadores destinados a las instalaciones frigoríficas de distintos barcos congeladores, se detectaron fugas en varios codos de los serpentines durante la prueba de frío de su puesta en marcha.

Cada evaporador tiene 500 m de serpentín conformado por tramos rectos de aproximadamente 1100 mm de longitud, unidos por 380 codos de 180°.

Los serpentines están construidos con tubos sin soldadura, de diámetro exterior 22 mm y espesor 2 mm, fabricados en acero ST235-NBK según DIN 23291-2. Los tubos se curvan en frío hasta formar una "U". En esta operación de conformado, la sección del tubo pierde, en la zona curvada, su forma circular hasta convertirse en una elipse con ejes de 23 mm y 20 mm. Ocasionalmente, en la parte interior del codo, se producen pliegues que son consecuencia de un doblado defectuoso. Cuando el defecto se detecta visualmente, el tubo curvado se rechaza.

Los elementos de "U" se fabrican, en función de la longitud de sus brazos, de dos tipos diferentes: de brazos largos y cortos. La longitud de los primeros supone casi la totalidad de los tramos rectos del serpentín. Ambos tipos se unen alternativamente por soldadura.

Una vez montado el equipo, se somete, sumergido en un depósito de agua, a una prueba de presión con aire comprimido a 25 kgf/cm<sup>2</sup>. En ninguno de los cuatro evaporadores se apreciaron pérdidas durante esta prueba.

Con posterioridad, los equipos se galvanizaron en caliente.

El número de codos agrietados en cada evaporador fue muy bajo, del orden de dos o tres. Las grietas se produjeron siempre en los codos de los elementos largos, se localizaron en la parte interior del codo y su desarrollo fue transversal al tubo.

Tres de los evaporadores fueron construidos con una misma partida de tubos sin marcas de calidad en su superficie exterior. En el cuarto, se empleó una partida diferente de tubos, en los que si aparecían las marcas de calidad pintadas. A los tubos sin marcas los designaremos en adelante como tubos “tipo 1” y a los otros, tubos “tipo 2”.

Para estudiar las causas del agrietamiento se seleccionaron las siguientes muestras:

Muestras procedentes de los evaporadores dañados:

- Un codo decapado y agrietado cortado longitudinalmente en dos mitades, que designamos como 1A y 1B.
- Una mitad de un codo cortado longitudinalmente, decapado y agrietado. Designado como codo 2A. Un codo completo decapado y con depósitos interiores (codo 2B).
- Un codo galvanizado y agrietado (codo 3A).
- Dos codos con sus prolongaciones rectas decapados.
- Dos codos galvanizados.

Muestras nuevas:

- Cinco codos con sus tramos rectos largos de tubos “tipo 2”.
- Tres tramos rectos de tubos de cada tipo.

Alguno de los evaporadores tuvo que ser decapado con ácido clorhídrico para eliminar el recubrimiento de Zn y facilitar la extracción de los codos dañados.

En la figura 1 se muestra uno de los extremos del medio codo 2A. En su parte interna existe un pliegue consecuencia de una operación de curvado defectuosa y asociada a él, una grieta rodeada de una mancha de coloración gris más clara que el resto de la superficie interior del tubo.

En las muestras 2A y 3A las grietas se localizan en pliegues del curvado, mientras que en las dos mitades 1A y 1B no aparece este tipo de defecto.

Para la investigación de las causas de fallo se realizaron los siguientes análisis y ensayos:

Caracterización química y mecánica del material de ambos tipos de tubos.

Líquidos penetrantes para detectar la existencia de grietas en todos los codos completos recibidos.



**Figura 1.** Sección longitudinal del pliegue 2A. Pliegue fisurado en la parte interna del codo. 2,4 X

Ensayos de tracción y abocardado para la caracterización de la calidad de ambos tipos de tubos.

Estudió mediante microscopía electrónica de barrido la superficies de fractura de las grietas existentes en las mitades de los codos 1B y 2<sup>a</sup>.

Estudio metalográfico mediante microscopía óptica de la zona agrietada, en las mitades 1A y el codo 3A.

El codo 2B se cortó longitudinalmente y se comprobó que los depósitos que aparecían en su interior no eran de origen metálico, eliminándose con facilidad cuando se frotaban. El aspecto general del codo seccionado se recoge en la macrografía de la figura 2, en su parte interior se puede apreciar un pliegue consecuencia del curvado.



**Figura 2.** Codo 2B seccionado longitudinalmente. Pliegue en su parte interna. 0,9 X

**2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

**2.1. Composición química**

Los análisis se realizaron por Espectrometría de Rayos X, ICP y Absorción de Infrarrojos, obteniéndose los siguientes resultados:

Elemento	Tubo “tipo 1”	Tubo “tipo 2”
C	0,102	0,072
Si	0,14	0,26
Mn	0,43	0,61
P	0,009	0,025
S	0,0024	0,0068

**2.2. Características mecánicas**

Los ensayos de tracción a temperatura ambiente realizados, siguiendo la norma EN 10002, sobre dos de los tubos, uno de *Tipo 1* y otro de *Tipo 2*, ofrecen los siguientes resultados:

	Tubo “tipo 1”	Tubo “tipo 2”
R <sub>p</sub>	393 MPa	379 MPa
R <sub>m</sub>	470 MPa	475 MPa
A	37 %	32 %

**2.3. Ensayo de abocardado**

Tras los ensayos de abocardado realizados, de acuerdo con la norma UNE-EN 10234:94, sobre ambos tipos de tubo, no se observa grieta alguna en su superficie, con un aumento del diámetro exterior en torno al 60%.

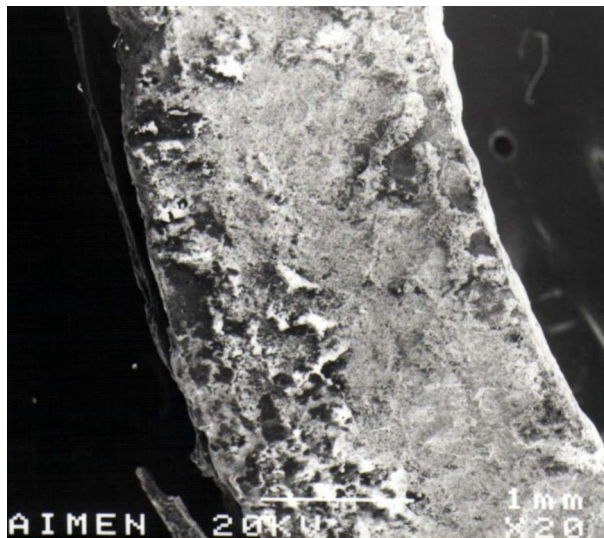
**3. INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES**

El examen se realizó en todos los codos enteros recibidos. En ninguno de ellos se detectó la presencia de grietas.

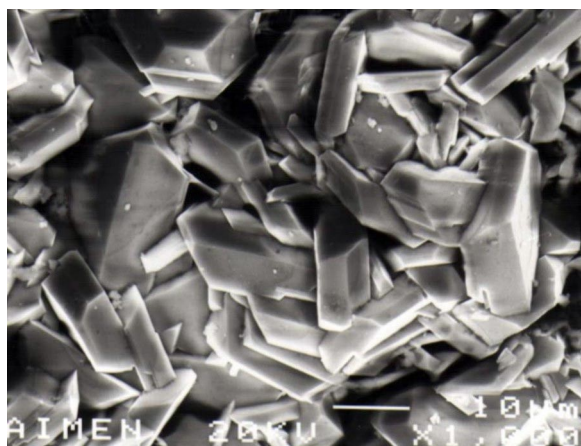
**4. ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA**

En las mitades de los codos 1B y 2A se separaron los labios de las grietas mediante sendos cortes transversales y se estudiaron las superficies de fractura con microscopía electrónica de barrido.

Ambas se encuentran recubiertas en su totalidad de un depósito de aspecto granulado (figura 3) que observado a mayores aumentos aparece formado por pequeños cristales idiomórficos de naturaleza hexagonal (figura 4).



**Figura 3.** Microscopía electrónica de barrido. Semicodo 1B. Superficie de fractura recubierta por un depósito granulado. 20 X.

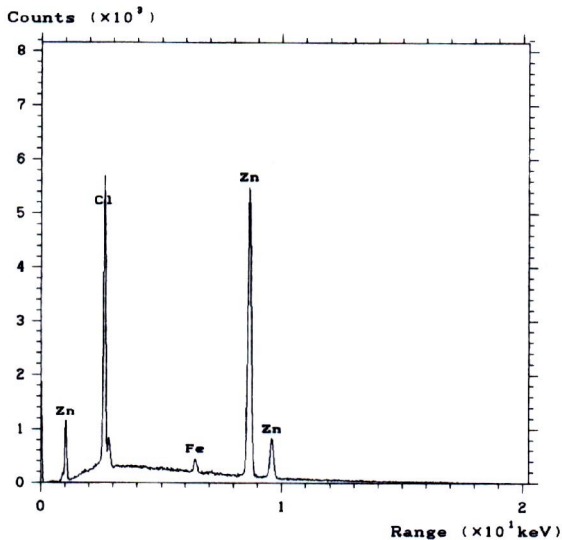


**Figura 4.** Microscopía electrónica de barrido. Detalle de la figura 3. Cristales hexagonales de cinc. 1000 X.

Mediante la microsonda de energías dispersivas, se analizaron cuantitativamente el depósito en el interior de las grietas y la mancha de coloración gris clara asociada a la grieta que aparece en el interior del tubo de la muestra 2A. En ambos espectrogramas se ha identificado la presencia de los elementos cinc, cloro y hierro, éste último en menor cuantía, como pone de manifiesto la altura de sus picos. En la figura 5 se recoge como representativo de ambos espectrogramas el obtenido en el interior de la grieta.

**5. ANÁLISIS METALGRÁFICO**

Se realizaron dos preparaciones metalográficas en la zona agrietada de los codos 1A y 3A a partir de sendos cortes longitudinales.

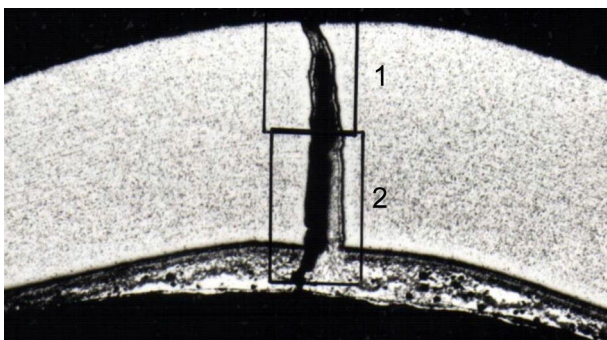


**Figura 5.** Espectrograma mediante microsonda de energías dispersivas correspondiente a los depósitos existentes en la superficie de fractura.

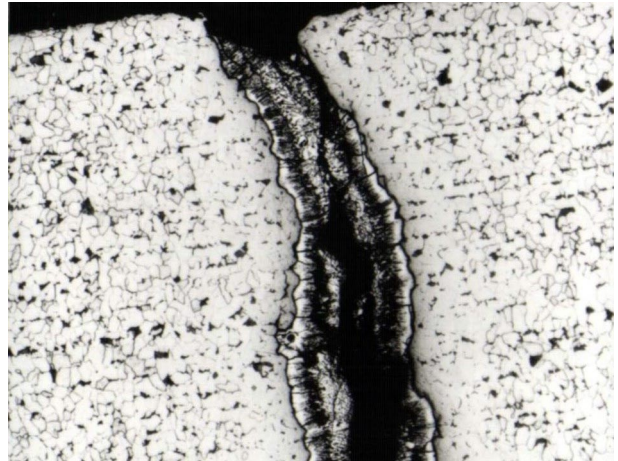
Ambas grietas presentan las mismas características morfológicas.

Las micrografías de las figuras 6, 7, 8 y 9 corresponden a la preparación del codo 3A. En ellas se puede apreciar como la grieta se localiza en un pliegue consecuencia del curvado del tubo, se inicia en la superficie exterior, progresa básicamente perpendicular a la pared y se encuentra rellena de cinc. La grieta no presenta un perfil definido, no obstante, en algunos puntos existen pequeñas ramificaciones de la grieta principal que ponen de manifiesto su progresión intergranular.

En las dos preparaciones, la microestructura del acero del tubo está constituida por pequeñas colonias de perlita fina dispersas en una matriz de granos equiaxiales de ferrita. En la preparación del codo 3A, en las proximidades de la superficie exterior y en el entorno de la grieta, los granos de ferrita y las colonias de perlita aparecen alargados en la dirección perpendicular a la pared como consecuencia de la acusada deformación plástica que provocó la formación del pliegue.



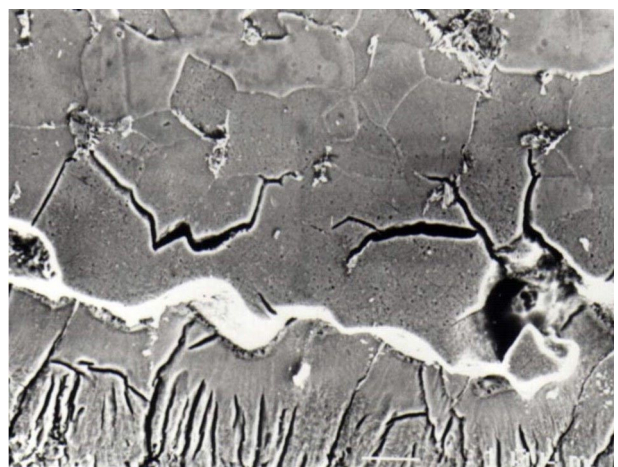
**Figura 6.** Codo 3A. Ataque nital 2%. Grieta pasante situada en un pliegue. Abajo: Superficie exterior del tubo galvanizada. 15 X.



**Figura 7.** Detalle 1 de la figura 5. Grieta rellena de cinc. Ataque nital 2%. 100 X.



**Figura 8.** Detalle 2 de la figura 5. Grieta rellena de cinc. Deformación plástica del acero del tubo en las proximidades de la superficie exterior: granos de ferrita alargados. Ataque nital 2%. 100 X.



**Figura 9.** Arriba: Microgrietas intergranulares en el acero del tubo. Abajo: Material del galvanizado. Microscopía electrónica de barrido. Ataque nital 2%. 750 X.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por su composición química y características mecánicas los aceros de los dos tipos de tubos utilizados cumplen con las especificaciones de la norma. La resistencia a la tracción en el acero de los tubos "tipo 1" se encuentra en el límite superior fijado por ésta y en el caso de los tubos "tipo 2" la supera ligeramente. En ambos aceros, el límite elástico es muy superior al mínimo fijado por la norma (235 MPa), único valor que especifica. Esta circunstancia supone que en la operación de curvado de estos tubos deben de aplicarse esfuerzos considerablemente más elevados que en el caso de tubos con límites elásticos menores, las máquinas de curvado son más solicitadas y el riesgo de formación de pliegues defectuosos se acrecienta.

Los alargamientos obtenidos y los resultados de los ensayos de abocardado ponen de manifiesto que los aceros presentan una ductilidad suficiente como para soportar las operaciones de curvado.

Las operaciones de curvado en frío producen una deformación a tracción en la parte exterior de los codos y a compresión en su parte interior. En la zona deformada a tracción queda implantada una tensión residual de compresión, mientras que en aquella que se deforma a compresión la tensión residual es de tracción. Su componente más significativa, a la vez que la de mayor intensidad, es la orientada en la dirección longitudinal del tubo.

Las tensiones residuales adquieren valores más elevados a medida la deformación plástica impuesta se hace más severa, severidad que se acentúa en la formación accidental de los pliegues. Pueden llegar a alcanzar valores próximos al límite elástico del material, por lo que podrán ser tanto más elevadas cuanto mayor sea éste.

La presencia de cinc en el interior de las grietas y en la superficie interior del tubo, adoptando formas idiomórficas que ponen de manifiesto que penetró en ellas en fase líquida y solidificó en su interior, indican que las grietas tuvieron que originarse antes o durante la operación de galvanizado.

Los resultados de la prueba de presión, en la que no se detectaron fugas, descartan que el agrietamiento se produjera en las etapas de fabricación anteriores a la de galvanizado. Consecuentemente, para permitir la entrada de cinc líquido tuvieron que formarse durante esta operación.

El cloro detectado muy posiblemente proceda del ácido clorhídrico utilizado en las operaciones de decapado.

En las preparaciones metalográficas no se ha observado un perfil definido en las grietas, debido, probablemente, a los efectos de dilución del cinc sobre el acero, que lo

borraron. No obstante, las ramificaciones observadas ponen de manifiesto que su progresión ha sido intergranular.

La existencia de tensiones residuales de tracción elevadas en el interior del codo, el desarrollo de la grieta transversal al tubo, perpendicular a la dirección de las tensiones residuales, su carácter intergranular y la presencia del cinc en su interior, que indica en qué etapa de la fabricación se produjo el fallo, ponen de manifiesto que el agrietamiento es consecuencia de un fenómeno de "fragilización por metal líquido".

Que el fenómeno de agrietamiento surja tan ocasionalmente, y generalmente asociado a los pliegues accidentales, se debe, en nuestra opinión, a que el umbral de las tensiones residuales necesarias para provocarlo se supera muy raramente. Además, que no se produzca nunca en los codos próximos a las uniones soldadas parece indicar que el ciclo térmico de la soldadura favorece la disipación de las tensiones residuales de conformado, al menos en una cuantía suficiente como para situarlas por debajo del umbral crítico.

## 7. CONCLUSIONES

7.1 Por su composición química, características mecánicas y microestructura, los dos tipos de tubos cumplen con los requisitos prescritos por la norma DIN 23391-2 para la calidad ST235-NBK. No obstante, debe destacarse que en el acero de los tubos "tipo 1" la resistencia a tracción se encuentra en el límite superior especificado, mientras que la del acero de los tubos "tipo 2" es ligeramente superior a éste. Ambos aceros poseen un límite elástico mucho más elevado que el mínimo especificado por la norma.

7.2 Las grietas se producen durante la operación de galvanizado, como consecuencia de un fenómeno de "fragilización por metal líquido" provocado por la acción conjunta de cinc líquido y las tensiones residuales de elevada magnitud implantadas durante las operaciones de curvado.

7.3 Dado que por limitaciones económicas los equipos no pueden someterse a un tratamiento térmico de distensionado, se recomienda utilizar un material que, aunque dentro de las exigencias de la norma, presente un límite elástico considerablemente más bajo al del acero utilizado, con objeto de que las tensiones residuales se sitúen por debajo del umbral mínimo para producir la fragilización por metal líquido.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Kamdar, M.H., "Embrittlement by Liquid and Solid Metals", Ed. The Metallurgical Society, 1984

[2] Gordon, P y An, H.H., "The Mechanism of Crack Initiation and Crack Propagation in Metal-Induced Embrittlement of Metals", Metall. Trans. A, Vol 13A, 1982, p 457-482.

[3] Gordon, P. "Metal Induced Embrittlement of Metals – An Evaluation of Embrittler Transport Mechanisms", Metall. Trans. A, Vol. 9, 1978, p 267-272.

[4] Kamdar, M.H. "Liquid Metal Embrittlement, in Treatise on Materials Science and Technology", Vol. 25, Ed. Academic Press, 1983, p 361-459.

[5] Westwood, A.R.C., Preece, C.M. y Kamdar, M.H., "Fracture", Vol. 13, Ed. Academic Press, 1971.

[6] Stoloff, N.S., "Recent Developments in Liquid Metal Embrittlement in Environment Sensitive Fracture of Engineering Materials" en "Proceedings of the AIME Conference", American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1980.

[7] Henry, G. y Dietrich, H. "De Ferri Metallographia" vol. 5, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1979.

[7] Metals Handbook, Vol. 13, "Corrosion", 9ª Edición, p 171-184