

Aportaciones de estaño-plata y estaño-cobre en la soldadura blanda por capilaridad de canalizaciones de cobre

J. Durán*, J.M. Amo* y C.M. Durán*

Resumen

Se estudia la influencia del tipo de aleación utilizada como material de aporte, en los defectos resultantes en las uniones de soldadura blanda por capilaridad en instalaciones de tubería de cobre, que provocan la fuga del fluido de las canalizaciones. Las diferentes temperaturas eutécticas y de los rangos *solidus-líquidus* de estos tipos de aleaciones, obligan a ajustar los aportes del calor de soldeo en cada caso para conseguir las propiedades de capilaridad y temperaturas de aleación adecuadas para la correcta formación de las soldaduras. Se demuestra que, la mayoría de los defectos en las uniones se produce por mala dosificación de los aportes térmicos, lo que conduce, dependiendo de la aleación utilizada, a variaciones en la fluidez de la aportación que pueden dar lugar a fallos en la penetración de las juntas o a insuficiente consistencia para el relleno de las uniones.

Palabras clave

Soldadura por capilaridad. Canalizaciones cobre. Fallos en servicio. Aleaciones estaño-plata y estaño-cobre. Defectos. Temperatura de soldeo.

Tin-silver and tin-copper alloys for capillarity joining –soft soldering– of copper piping

Abstract

It is studied the influence of the type of alloy used as filling material on the defects of the soldering joints in copper piping installations, which induce the fluid leak of the systems. The different eutectic temperatures and solidus-liquidus ranges of these alloys, require the setting of the soldering heat input in each case to obtain the suitable capillarity features and alloying temperatures to achieve for the correct formation of the bondings. Most defects in the joints are demonstrated to be generated by bad dosification of thermal inputs, which led depending on the filler alloy used to variations in its fluidity that may produce penetration failures in the bonds or insufficient consistency for the filling of the joints.

Keywords

Capillarity bondings. Copper piping. Service failures. Tin-silver and tin-copper alloys. Defects. Bonding temperatures.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tres años ha aumentado de forma significativa el número de fallos en servicio de canalizaciones de cobre realizadas por soldadura blanda, para instalaciones de agua caliente y calefacción en edificios de nueva construcción. Los materiales de aportación utilizados son aleaciones de estaño-plata y estaño-cobre, los cuales se usan indistintamente en estas instalaciones. Los fallos se deben a fugas en las uniones soldadas a solape de empalmes y derivaciones de las canalizaciones pro-

ducidas por defectos existentes en las soldaduras. Estos defectos son frecuentemente por falta de material de relleno para completar las zonas de solape de las juntas, por penetración incompleta del aporte o por lagunas sin soldar, cuya coalescencia puede dar lugar a la comunicación entre el interior y el exterior de las tuberías, no encontrándose en general defectos de grietas o fisuras. Idénticas consecuencias, en cuanto a la estanqueidad de las uniones, se producen en soldaduras en las que, aunque el material de aporte penetra en toda la unión, no tiene capacidad de relleno, produciendo solo un

(*) Dpto. Ingeniería de materiales. Degradación y Durabilidad. CENIM (CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid (España).

estañado superficial en una parte o en la totalidad de la unión. En este trabajo, en base a las composiciones de los aportes de estaño-plata y estaño-cobre más usuales para soldeo blando^[1 y 2], a las temperaturas de formación de sus eutécticos y a las máximas de fusión^[3] y, a la correcta utilización de los fundentes y temperaturas de soldeo, se determinan las condiciones óptimas de mojado y capilaridad de los aportes^[4-6]. Se demuestra, de esta forma, que la mayoría de los defectos de las uniones se producen por mala dosificación de los aportes térmicos, dependiendo de la aleación utilizada. Ello conduce a variaciones en la fluidez de las aportaciones que pueden dar lugar a fallos en la penetración de las juntas o a insuficiente consistencia para el relleno de las mismas. Se exponen los planteamientos genéricos en este tipo de investigaciones basándose en los estudios llevados a cabo por el CENIM en estos últimos años. El material empleado procede de experiencias directas realizadas en el Departamento de Ingeniería Degradación y Durabilidad y de fallos reales de instalaciones en servicio.

2. ESTUDIO DE MUESTRAS SOLDADAS. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ENSAYOS MACROGRÁFICOS

Las muestras soldadas en estudio son, normalmente, uniones a solape que mediante manguitos o accesorios en codo o T constituyen los empalmes y derivaciones de las instalaciones. Pueden ser extraídas "in situ", de las instalaciones para estudio de fallos en servicio, o bien ejecutadas en los talleres-laboratorio del CENIM, para estudios concretos sobre diseño de uniones o comportamiento de materiales de aportación. En la figura 1 se presentan unas muestras comunes de estos tipos, obtenidos de fallos en servicio. Obsérvese la oxidación que presentan, indicativa de la existencia de fugas y la acumulación de material de aporte en sus partes bajas en posición de servicio, producidas por el descolgamiento de este material en estado fluido. Es importante disponer de muestras con descolgaduras, las cuales van a proporcionar el material para los análisis de composición química. Estos análisis, normalmente realizados por vía húmeda, requieren de 2 a 3 g de material, que se obtienen a partir de virutas o limaduras de las descolgaduras.

Para los análisis macrográficos, las muestras se seccionan longitudinalmente por planos diametrales y se preparan para examen macrográfico en lupa o microscopio óptico. Cada empalme o junta da lugar a dos líneas de soldadura, superior e inferior

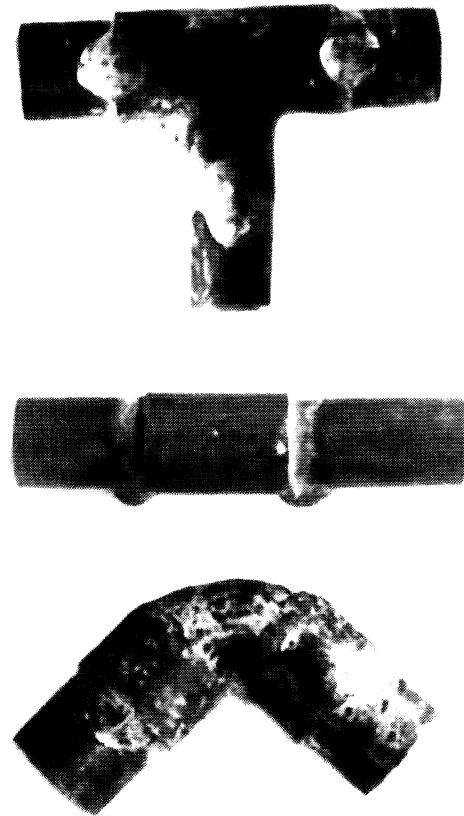


Figura 1. Muestras comunes de soldaduras en tuberías de cobre.

Figure 1. Common samples of soldering joints in copper assemblies.

– corte transversal a través de la descolgadura-, de características normalmente diferentes en uniones defectuosas. Las secciones de las figuras 2 y 3 muestran los defectos usuales puestos de manifiesto por estos ensayos: típicas zonas vacías u hoquedades de material de aportación en las líneas de soldadura y zonas continuas sin soldar por penetración incompleta del aporte en el fondo de las uniones a solape. Puede observarse como este último defecto, en ambos casos presentados, se produce preferentemente en la línea superior de soldadura o línea contraria a la descolgadura. En la parte inferior, los defectos encontrados son menos frecuentes. En cualquiera de los casos, estos defectos pueden ser producidos por incorrecta aplicación del fundente o decapante de soldeo o por deterioro o vaporización brusca de éste por excesivos calentamientos.

El hecho de que la zona sin soldar en el fondo de las juntas se produzca en la línea superior de las uniones apunta a elevados calentamientos como causa más probable. Ello produciría la excesiva fluidez del aporte, que pierde su capacidad de

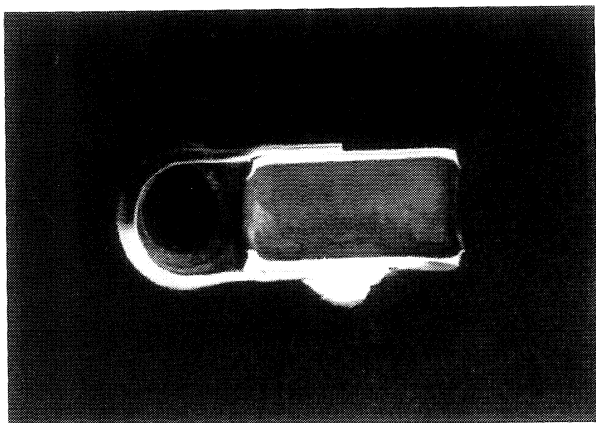


Figura 2. Soldadura en codo: zonas aisladas sin aporte y fondo sin sellar en la parte superior.

Figure 2. Elbow joint: Isolated zones without filler metal and non sealed bottom at the top edge.

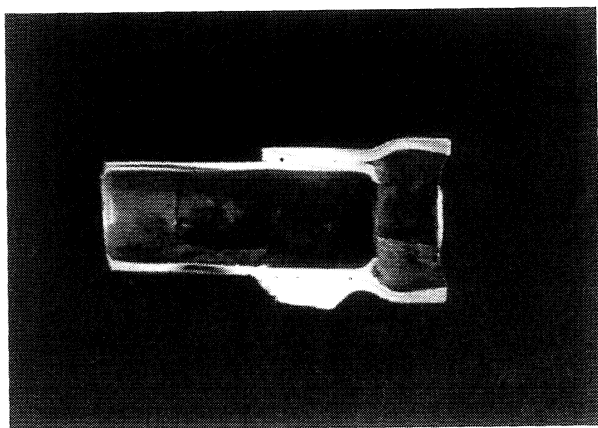


Figura 3. Soldadura en derivación en T: Defectos similares a los de la figura anterior.

Figure 3. T joint: similar defects to those of the preceding figure.

relleno y se desliza por gravedad hasta la línea inferior de la soldadura. Las acumulaciones de aporte debajo de las juntas confirman, también, esta hipótesis.

A falta de requisitos normalizados para la aceptación de este tipo de uniones es usual hacerles extensibles los del código ASME, sección IX^[7], para solapes con soldadura fuerte que, para líneas de soldadura en secciones macrográficas, exige que ambos extremos de las líneas estén sellados con el material de aporte y que la suma de las longitudes sin soldar, no supere al 20 % de la longitud total del solape.

Las composiciones químicas de los materiales de aporte usuales, utilizados en los últimos años para este tipo de instalaciones, oscilan entre el

3 % y el 6 % de plata para las aleaciones de estaño-plata y del 2 % al 5 % de cobre para las aleaciones de estaño-cobre. Ambos tipos de aleación presentan buena acción de mojado sobre cobre de superficies limpias y desoxidadas, por lo que sus características de penetración por capilaridad en juntas a solape son excelentes.

3. ANALISIS MICROESTRUCTURAL

El objetivo principal de estos análisis es la comprobación de la formación de una buena unión soldada entre el material de aporte y el material de base. Al mismo tiempo, sirven para controlar la existencia de grietas en la zona soldada y para estudio de precipitados y crecimientos de granos por posibles recalentamientos. Las soldaduras correctas presentan con frecuencia dos finas bandas continuas de intermetálicos en sus bordes, formadas por difusión con el metal de base, que demuestran la existencia de una buena unión. Las bandas anchas son indicio de fuertes calentamientos, no siendo recomendables por ser zonas de dureza elevada, propensas a la formación de fisuras. En la figura 4 ($\times 50$) se ven las dos bandas de intermetálicos indicativas de la formación de soldadura y de un calentamiento relativamente elevado, dada la magnitud de las segregaciones y precipitados de cobre próximos a los bordes de la soldadura.

En la ampliación mostrada en la figura 5 ($\times 200$) puede apreciarse la ausencia de grietas en general y especialmente en las bandas, más duras, de intermetálicos. En las figuras 6 y 7 ($\times 200$) se muestran precipitados de plata y cobre, respectivamente, en la línea de soldadura en

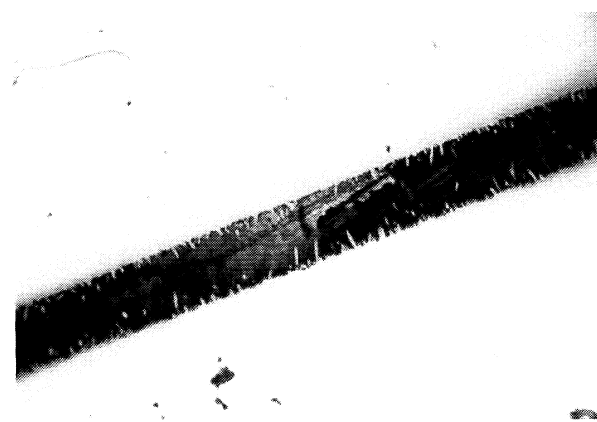


Figura 4. Banda de intermetálicos y precipitados en borde de soldadura ($\times 50$).

Figure 4. Intermetallic layers and precipitates at one edge of a joint ($\times 50$).



Figura 5. Ampliación de banda de intermetálicos (x200) sin grietas aparentes.

Figure 5. Magnification of intermetallic layer (x200) without apparent cracks.



Figura 6. Agujas de precipitados de plata, Ag_3Sn , en soldadura de aleación de estaño-plata (x200).

Figure 6. Ag_3Sn needles in a soldering joint of a tin-silver alloy (x200).



Figura 7. Precipitados de cobre, Cu_6Sn_5 , en el cierre interno de una soldadura de aleación de estaño-cobre (x200).

Figure 7. Copper precipitates, Cu_6Sn_5 , at the inside shuttling of a tin-copper soldered joint (x200).

la primera y en el cierre interno de una unión, en la segunda. Se trata de precipitados Ag_3Sn y

Cu_6Sn_5 , característicos de los aportes de estaño-plata y de estaño-cobre, fácilmente identificables en este caso mediante el examen microestructural. Las micrografías de las figuras 8 y 9 (x75), tomadas en soldadura y en un extremo de línea soldada, muestran el gran tamaño de grano que puede alcanzar la microestructura del material de aporte y los precipitados producidos (Cu_6Sn_5), indicando la aplicación de fuertes calentamientos.

4. ANALISIS ESPECTROGRÁFICO POR MEB-EDS Y ENSAYOS DE FRACTURA

Estos estudios son complementarios de los anteriores, utilizándose conjuntamente cuando se requieren investigaciones completas de los defectos existentes y de sus posibles causas. No obstante, pueden formar un bloque independiente para diagnóstico rápidas, dando una aproximación general a los problemas de una instalación, muchas veces suficiente para su resolución. Con los microanálisis realizados con microscopio electrónico de barrido (MEB), pueden determinarse, cualitativamente, los tipos de aleaciones de los aportes utilizados y, a partir de las microestructuras de las soldaduras, las fases metalográficas presentes y la condiciones generales de soldeo. Como ejemplo, en soldaduras concernientes a este trabajo, en la figura 10 se muestra la microestructura de una aleación de estaño-plata-cobre en la que se encuentran los típicos precipitados de cobre, Cu_6Sn_5 , sobre un fondo del eutéctico de la aleación. Obsérvese el gran tamaño del precipitado próximo al centro de la imagen. En la parte inferior de la figura se da el espectro correspondiente a éste precipitado.

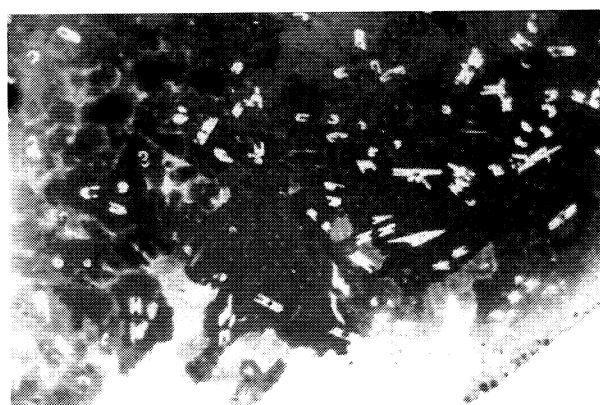


Figura 8. Precipitados de cobre, Cu_6Sn_5 , y microestructura del grano en la línea de soldadura con aportación de estaño-cobre (x200).

Figure 8. Copper precipitates, Cu_6Sn_5 and grain microstructure of a tin-copper joint line (x200).

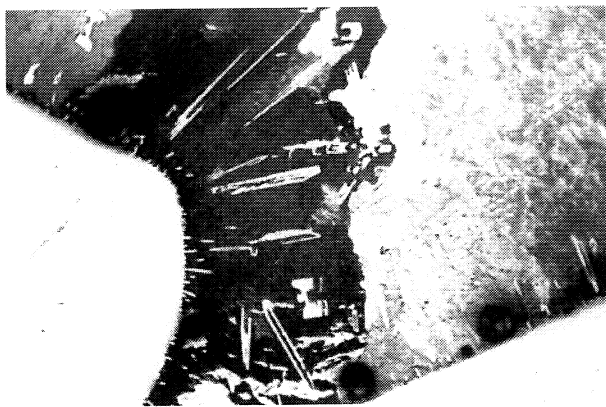


Figura 9. Final de una línea soldada. Microestructuras de aporte análogas a las de la figura anterior(x200).

Figure 9. Edge of a soldering joint. Filler microstructures similar to those of the former joint(x200).

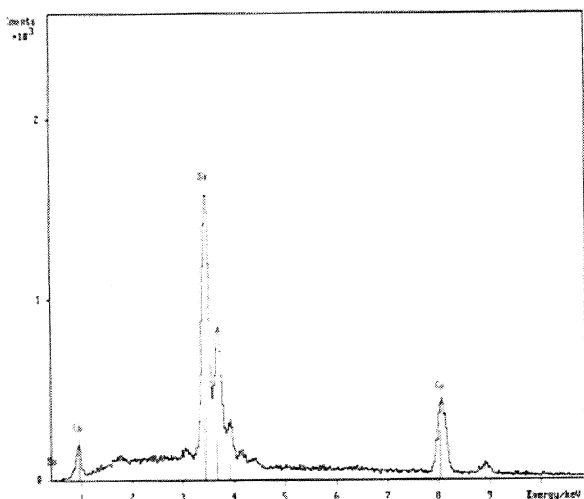
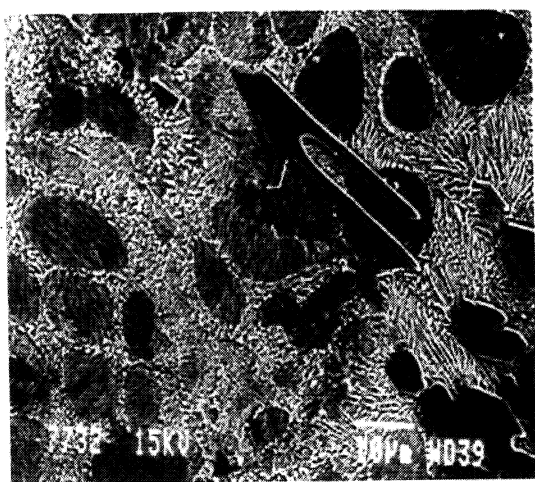


Figura 10. Precipitado de estaño-cobre, Cu_6Sn_5 , sobre el eutéctico de una aleación de estaño-plata-cobre. Debajo, espectro del precipitado.

Figure 10. Copper precipitates, Cu_6Sn_5 , over the eutectic matrix of a Sn-Cu-Ag filler. At the bottom, spectrum of the precipitate.

El espectro de la aguja mayor presente en la micrografía de la figura 11 demuestra que el aporte de esta soldadura es, en principio, del tipo estaño-plata. Espectros de otras zonas, más o menos puntuales o globales, pueden determinar la existencia de otros elementos de aleación. La micrografía de la figura 12 muestra una gran cantidad de segregaciones en una soldadura, indicios de la alta temperatura de ejecución. El tamaño de las agujas de plata, en la micrografía anterior, apunta en el mismo sentido.

Los ensayos de fractura se hacen por separación de las dos partes de una unión a solape, rompiendo la soldadura por esfuerzo de desgarramiento. De la observación de las superficies de fractura se obtienen importantes conclusiones, relativas especialmente a los defectos existentes y a la ejecución. La soldadura de la figura 13 presenta abundante número de lagunas, unas con fondo estañado y otras con fondo desnudo, color cobrizo y ausencia total

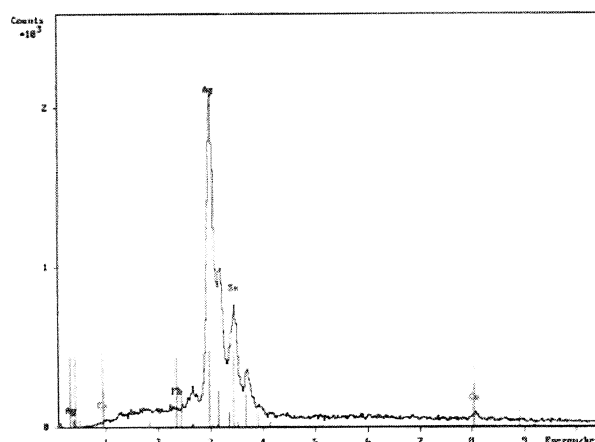
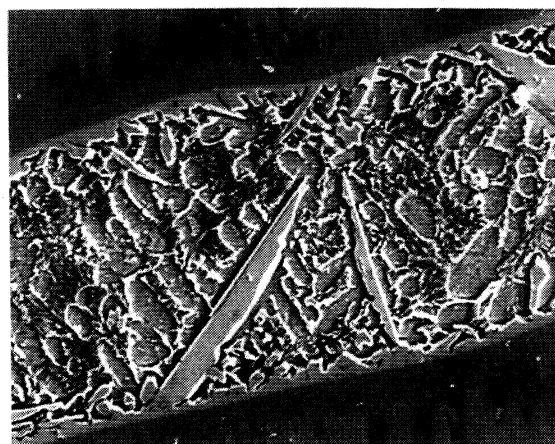


Figura 11. Aguja de estaño-plata Ag_3Sn , (x400) y espectro de la misma.

Figure 11. Ag_3Sn needle and its spectrum at the bottom.

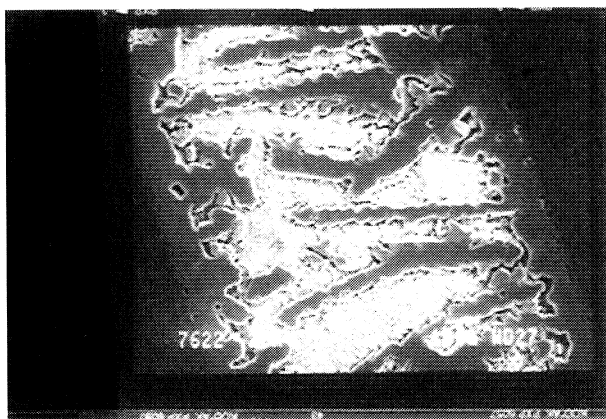


Figura 12. Segregación del cobre del material base en una soldadura.

Figure 12. Copper segregation of the basis material in a soldering joint.

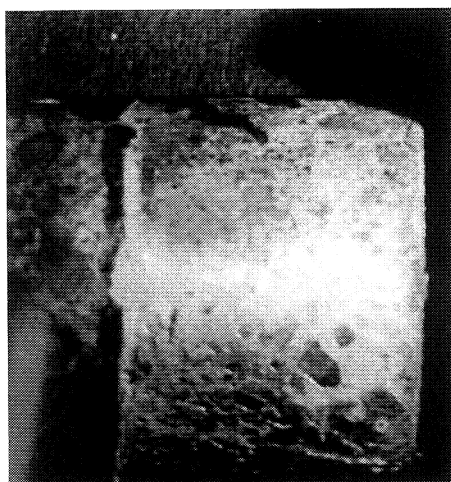


Figura 13. Ensayo de fractura de una unión soldada: lagunas con falta de material de aporte.

Figure 13. Fracture test of a soldering joint. Blow holes without metal filler.

de material de aporte. Tanto unas como otras pueden producirse por oclusión de vapores procedentes de humedades, suciedad o descomposición de los decapantes. La deficiente aplicación de éstos últimos es, también, la causa frecuente de producción de las lagunas sin estaño, dado que los aportes no mojan la superficie oxidada del cobre ni pueden fluir por capilaridad sin la película previa de fundente. El origen de las superficies estañadas es, con frecuencia, la aparición de burbujas, a causa de los calentamientos elevados que provocan la vaporización brusca de los decapantes, pudiendo también estar favorecidas por el uso de decapantes inapropiados.

Rev. Metal. Madrid 37 (2001)

En la figura 14, la unión presentaba una gran parte de sus superficies sin soldar pero con baño de estaño en ambas. La limpieza y aplicación del fundente fueron correctas, pero la elevada fluidez del aporte, a causa del fuerte calentamiento, no permitió el relleno de la junta, fluyendo y depositándose por gravedad en la parte inferior, como se ve en la fotografía. La parte superior queda prácticamente sin material de aporte y sin sellado para evitar las fugas.

Para superar este tipo de ensayos, aplicados a instalaciones realizadas con soldeo fuerte, el código ASME, sección IX^[7], requiere que el aporte cierre los dos extremos de las juntas y que las áreas sin soldar no excedan el 25 % del área total de la unión. Adicionalmente, la suma de las longitudes de las lagunas sobre cualquier línea en la dirección del solape, no debe superar el 25 % de la longitud del mismo.

5. DISCUSIÓN

Los análisis precedentes demuestran que los defectos presentes en las instalaciones en estudio, capaces de producir fugas y originar el levantamiento y revisión de los sistemas completos de tuberías, son básicamente de dos tipos:

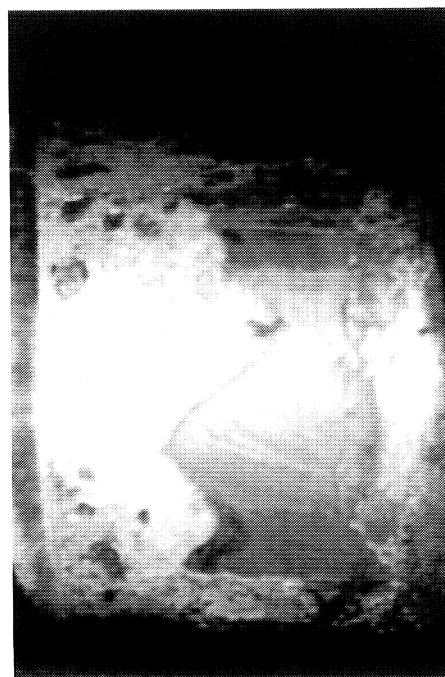


Figura 14. Gran zona estañada, sin soldar, puesta de manifiesto en el ensayo de fractura de una unión.

Figure 14. Great tinned zone, without bonding, detected in the fracture test of a joint.

- a) Defectos producidos por mala preparación superficial de las partes a unir o defectuosa aplicación y/o elección de los fundentes.
- b) Defectos producidos por exceso de la temperatura de calentamiento de las uniones.

Estos últimos son los más frecuentes, estando implicados en el 90 % de los casos de fallo, lo que demuestra que hay una tendencia general a la aplicación de excesivas temperaturas de soldeo.

La respuesta a esta práctica hay que buscarla en las propiedades de fusión de las aleaciones de aporte. En las figuras 15 y 16 se presentan los diagramas binarios estaño-plata y estaño-cobre. Las aleaciones eutécticas o de mínimo punto de fusión, corresponden al 3,5 % de plata para las aleaciones de estaño-plata, con 221 °C de punto de fusión y al 0,9% de cobre para las aleaciones estaño-cobre, con punto de fusión de 227 °C. Para el rango de aleaciones usuales, 3 a 6 % de plata y 2 a 5 % de cobre, las temperaturas máximas de fusión están entre 221 °C y 270 °C para las de estaño-plata y entre 270 °C y 370 °C para las de estaño-cobre, aproximadamente. Teniendo en cuenta que las temperaturas óptimas de soldeo se sitúan en una banda de 50 °C por encima de las curvas líquidas respectivas, se deduce que estas temperaturas deben ser, como máximo, algo superiores a los 300 °C, para los aportes de estaño-plata y del orden de 100 °C más altas para los de estaño-cobre.

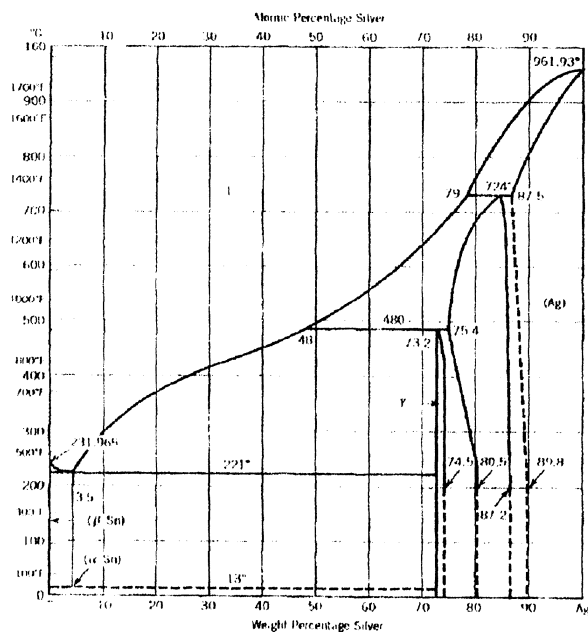


Figura 15. Diagrama binario de la aleación estaño-plata.

Figure 15. Binary diagram of the tin-silver system.

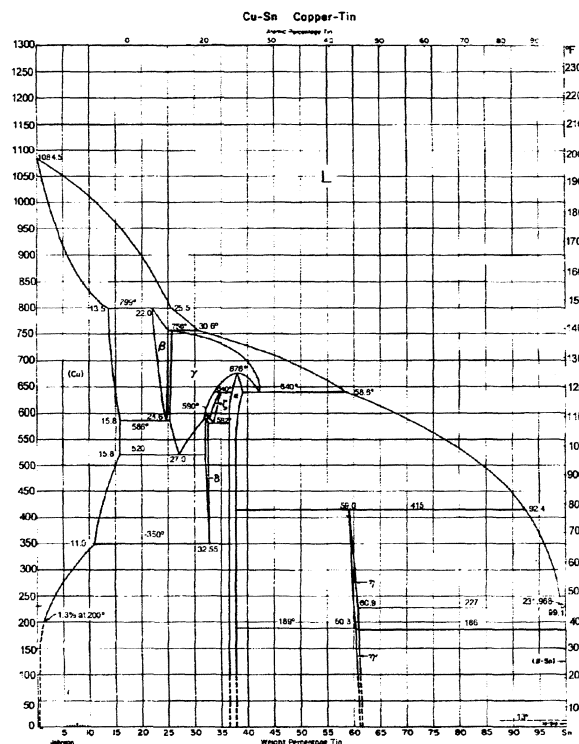


Figura 16. Diagrama binario de la aleación estaño-cobre.

Figure 16. Binary diagram of the tin-copper system.

Estas últimas, por tanto, requieren temperaturas mucho más altas de soldeo, de forma que, temperaturas, por ejemplo, de 300 °C –dentro del rango sólido-líquido de las aleaciones de estaño-cobre-, aptas para soldeo con estaño-plata, podrían resultar insuficientes o “frías” para estaño-cobre y presentar problemas de falta de fluidez y capacidad de mojado para penetrar por capilaridad hasta el fondo de las juntas, especialmente si éstas son muy ajustadas. Inversamente, las aleaciones de estaño-plata aplicadas a temperaturas superiores a 400 °C presentarán el problema inverso, con fluidez excesiva y poca capacidad de relleno, dando lugar a los defectos, ya estudiados, de exceso de calor de soldeo.

Estos defectos, sin embargo, no son exclusivos de las aleaciones de estaño-plata, dándose igualmente en las de estaño-cobre, de donde se deduce que se están aplicando temperaturas aún más altas, llevando a fluidez excesiva, incluso, a estas últimas aleaciones. Ello podría justificarse como una reacción lógica del soldador cuando, calentando las uniones a temperaturas usuales de soldeo para aportes de estaño-plata, no consigue con las de estaño-cobre la capacidad de penetración adecuada en junta. Aportando más calor, incontrolada e

indiscriminadamente, sin tener en cuenta el tipo de aporte, pueden producirse excesos con efectos negativos para la calidad de las soldaduras, incluso, con estos últimos aportes.

La solución del problema apunta hacia el entrenamiento previo de los soldadores con cada tipo de aporte, debiendo conocer en cada caso el tipo de aleación que está utilizando. Para ello, es recomendable asegurarse de la composición de los aportes utilizados, con las debidas garantías, dadas las importantes consecuencias que pueden derivarse para el buen funcionamiento de las instalaciones.

6. CONCLUSIONES

- La mayoría de los fallos actuales que se presentan en las instalaciones de tuberías de cobre para agua caliente y calefacción, realizadas con soldadura blanda por capilaridad con aportes de estaño-plata y estaño-cobre, se deben a defectos originados por calentamientos excesivos de soldeo.
- Las aleaciones de estaño-cobre requieren una temperatura de soldeo del orden de 100 °C más alta que las de estaño-plata. La elevación incontrolada e indiscriminada de la temperatura es la causa que da lugar a los defectos reseñados. Otros tipos de defectos, aunque dándose en muy inferior cuantía, pueden ser achacables a la falta de limpieza o humedad en las uniones, así como a incorrectas aplicaciones o elección de los fundentes o decapantes de soldeo.
- Es recomendable el entrenamiento previo de los soldadores, en cada tipo de aporte, dirigido

especialmente a la dosificación de las temperaturas y del calor de soldeo requeridos en cada caso. Es muy importante asegurarse de la composición de las aleaciones utilizadas, con las debidas garantías, dadas las graves consecuencias que pueden derivarse para el buen funcionamiento de las instalaciones.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al personal de las secciones de Metalografía, Análisis Químico y Microscopía Electrónica de Barrido, que han hecho posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ASTM B 32-96, *Standard Specification for Solder Metal*, American Standard for Testing and Materials, Hitchin, Inglaterra, 1996.
- [2] J. GUNTER, *Copper: Its Trade, Manufacture, Use and Environmental Status*, ASM International, Ohio, EEUU, 1999.
- [3] Hojas técnicas, *The Equilibrium Diagrams of the Systems*, The Institute of Metals, Londres, Inglaterra.
- [4] C.J. THWAITES, *Capillarity Joining-Brazing and Soft-Soldering*, Research Studies Press, Letchworth, Inglaterra, 1982.
- [5] C.J. THWAITES, *Tin and Tin Alloys*, Metals Handbook, vol 9, 9ª Ed. ASM, Ohio, EEUU, 1985.
- [6] A. RAHN, *The Basics of Soldering*, John Wiley and Sons, Inc. NY, EEUU, 1993.
- [7] ASME-IX, *Welding and Brazing Qualifications*, American Society of Mechanical Engineers, NY, EEUU.