

EL EXAMEN MACROSCÓPICO EN EL ANÁLISIS DE FALLOS DE LOS PRODUCTOS METÁLICOS

V. López⁽¹⁾, M.C. Peña⁽¹⁾, J. Chao⁽¹⁾, M. Carsi⁽¹⁾

(1) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ESPAÑA

E-mail (autor de contacto): vlopez@cenim.csic.es

RESUMEN

El objetivo fundamental de cualquier investigación sobre fallos en componentes metálicos es determinar las causas de la rotura o dañado en servicio y establecer las soluciones adecuadas para prevenir otros fallos similares. Los ensayos habitualmente utilizados en la investigación de fallos son el examen visual y macroscópico del componente roto (examen morfológico de la rotura), la microscopía óptica y electrónica, el análisis químico, los ensayos mecánicos, y los ensayos no destructivos. Los ensayos que habitualmente aportan mayor información son las técnicas metalográficas y el examen morfológico de la rotura cuyo objetivo fundamental es el estudio del aspecto general de la fractura y resolver las posibles alteraciones de superficie que han podido participar en el fallo en servicio. En este trabajo se consideran diversos casos prácticos que ponen de manifiesto la importancia del examen macroscópico en la práctica del análisis de fallos, en algunas ocasiones porque ha permitido establecer conclusiones definitivas sobre las causas del fallo, y, en otras, por centrar la investigación en la zona de iniciación de la rotura. En concreto se presentan diversas investigaciones sobre roturas producidas por defectos de material, y por defectos de fabricación y de diseño, así como otro tipo de roturas inducidas por reparaciones mal ejecutadas y por alteraciones accidentales del material en las que el examen visual y macroscópico ha sido decisivo en la investigación sobre las causas del fallo.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: Materiales metálicos. Análisis de fallos. Estudio metalográfico. Examen macroscópico.

1. INTRODUCCIÓN

La rotura de los componentes metálicos puede producirse por defectos de diseño o de material, por la incorrecta selección de los materiales o de su estado de tratamiento mecánico o térmico, por defectos de fabricación, por condiciones de servicio imprevistas y por reparaciones inadecuadas o alteraciones accidentales del material durante el servicio. En la práctica del análisis de fallos podemos considerar dos etapas de trabajo fundamentales, que corresponden al análisis morfológico de la rotura y a los ensayos complementarios de laboratorio. Los ensayos de laboratorio que habitualmente aportan mayor información en el análisis de fallos son los relacionados con las técnicas metalográficas, debido a que, en general, existe una evidencia metalográfica asociada a cada mecanismo de rotura, y también por su capacidad para identificar defectos metalúrgicos y relacionarlos con un determinado tipo de rotura.

El análisis morfológico de la rotura se realiza por observación visual directa o con un microscopio de bajos aumentos, preferiblemente un estereomicroscopio, y tiene por objeto examinar el aspecto general de la fractura y las posibles alteraciones de superficie asociadas. En muchas ocasiones da más información que otros medios de ensayo más laboriosos y costosos, aunque en general es necesario contrastar estas primeras observaciones con los resultados obtenidos con otras técnicas de ensayo. De esta forma se consigue una imagen más completa sobre los factores que han podido participar en el proceso de rotura y se evita establecer ciertas conclusiones que pudieran ser erróneas. Mediante este análisis se obtiene información sobre detalles de la rotura y alteraciones de superficie que no se manifiestan en ninguna de las otras etapas de investigación. Es tan importante que, en ocasiones, permite establecer una primera conclusión sobre las causas del fallo y en otras centrar la investigación en la zona de iniciación. Un examen visual mal realizado puede conducir a conclusiones erróneas o, al menos, limitar los resultados de la investigación.

En el grupo de los ensayos de laboratorio se considera como una fase importante de estudio el examen macroscópico de secciones macroatacadas con ácidos minerales fuertes, que permite la observación de los detalles más groseros de un metal. La finalidad fundamental del examen macroscópico es detectar defectos sobre una sección completa de un componente metálico o partes seleccionadas de la misma. y permite diferenciar los defectos de fabricación de los debidos a condiciones de servicio, por lo que se considera como una herramienta fundamental en el estudio de fallos en servicio.

En este trabajo se consideran diversos casos prácticos donde los resultados del análisis morfológico de la rotura y el examen macroscópico han permitido establecer las causas primarias del fallo o centrar la investigación en la zona de iniciación de la rotura. En concreto se presentan diversas investigaciones sobre fallos relacionados con defectos de material, de fabricación y de diseño, y de roturas asociadas a reparaciones mal realizadas y por alteraciones accidentales del material.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

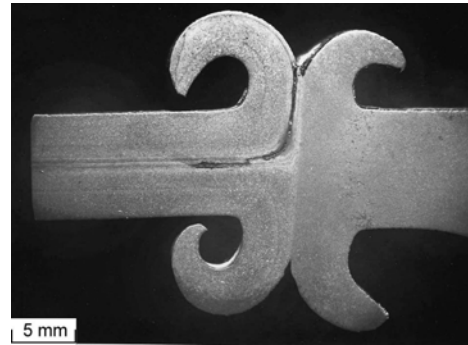
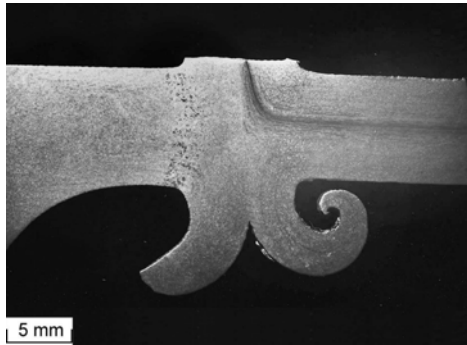
El examen morfológico de la rotura requiere muy poca o ninguna preparación pero debe prestarse especial atención en el manejo de los fragmentos rotos para evitar un posible deterioro mecánico o químico de la superficie de fractura que podría interferir en el examen posterior. Siempre que sea posible se evitará la limpieza de las superficies de fractura, y cuando se considera necesario deben utilizarse procedimientos de baja o nula agresividad. Los procedimientos de limpieza habitualmente utilizados son el chorro de aire, el tratamiento con disolventes orgánicos, la limpieza con medios ácidos o alcalinos que disuelven los depósitos no metálicos pero no atacan al metal base, y la limpieza en baño de ultrasonidos. La superficie fracturada debe protegerse adecuadamente para evitar alteraciones químicas, mecánicas o térmicas que puedan condicionar los resultados del estudio posterior. De igual forma, en la toma de muestras para realizar los ensayos de laboratorio y en la preparación de probetas para metalografía deben tomarse suficientes precauciones para evitar alteraciones en las características estructurales del material que pudieran condicionar los resultados de la investigación.

3. CASOS ESTUDIADOS.

3.1 Agrietamiento y rotura de puentes traseros de automóvil.- En el ensayo de control de calidad con partículas magnéticas de puentes traseros de automóvil soldados por fricción y acabados en estado de tratamiento térmico de temple y revenido, se detectó agrietamiento de la unión soldada. El material utilizado en la fabricación de este componente es un acero aleado con manganeso para temple y revenido del tipo UNE-EN 10083-28Mn6 (AISI 1536).

Los resultados del análisis químico realizado en el material de la parte agrietada del puente trasero indican que la composición química, con un porcentaje en masa del 0,32% de carbono y 1,36% de manganeso, es conforme a la especificada para el acero tipo UNE-EN 10083-28Mn6. El examen

macroscópico de secciones transversales de corte en zonas de la unión soldada con señal de defecto en el ensayo con partículas magnéticas, figuras 1.1 y 1.2, revela una banda de segregación central que cambia de orientación en la zona de soldadura por efecto de los esfuerzos impuestos en la etapa de forja del proceso de soldeo por fricción. Se genera así un defecto en la superficie de pieza, que por su efecto concentrador de tensiones favorece el inicio de grietas en temple.



Figuras 1.1 y 1.2. Banda de segregación central del puente trasero y agrietamiento asociado.

En el examen en microscopio se revela una microestructura de martensita revenida característica de un tratamiento térmico de temple y revenido tenaz ejecutado correctamente, y permite precisar que la banda central corresponde a segregación química y suciedad de colada, figuras 1.3 y 1.4.

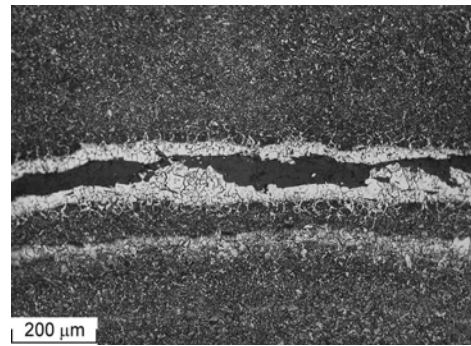
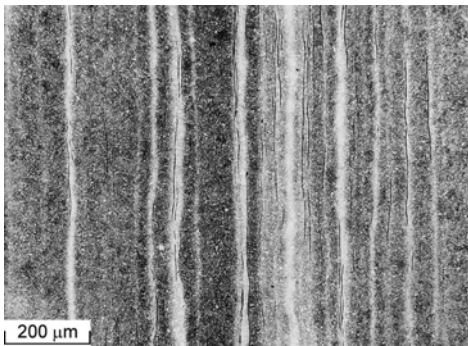


Figura 1.3. Bandas de segregación química.

Figura 1.4. Inclusiones de escoria.

Los resultados del examen macroscópico son suficientes para poder concluir que el agrietamiento de la unión soldada se ha producido en el tratamiento térmico de temple debido al desarrollo de bandas segregadas en la fabricación del acero, que de acuerdo con los resultados del examen microscópico corresponden a segregación química y a suciedad de colada.

3.2 Rotura de dientes en una corona de transmisión.- La rotura en servicio de la corona se produce por el desprendimiento de los dientes en la zona de raíz. El material utilizado en su fabricación es un acero del tipo 50 CrMo4 (AISI 4150) con tratamiento térmico de temple y revenido, y posterior tratamiento de endurecimiento superficial de temple por inducción en la parte dentada de la corona.

Los resultados del análisis químico satisfacen los requisitos de composición química especificados para el acero tipo 50 CrMo4, y los obtenidos en los ensayos de dureza realizados en pared de diente y en la zona de núcleo de pieza son adecuados a los tratamientos térmicos realizados.

El aspecto visual de las superficies de fractura en diente y corona indica que la rotura se ha producido por un proceso de fatiga iniciado en raíz de diente, en la zona marcada O, propaga hasta alcanzar la posición M y finalmente se produce la rotura final instantánea, figura 2.1

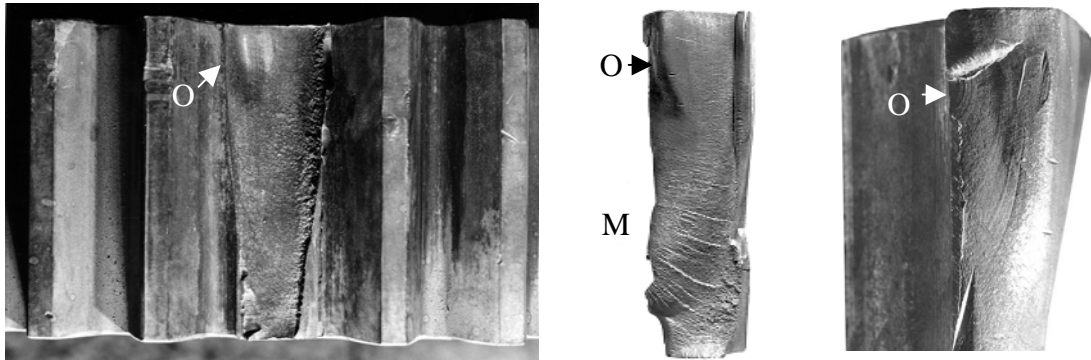


Figura 2.1. Superficie de fractura en la corona y en el diente de la corona.

El ensayo con líquidos penetrantes revela agrietamiento iniciado en zona de raíz, que en su propagación tiende a desprender los dientes de la corona, figura 2.2. El agrietamiento se produce únicamente en la superficie lateral donde se inicia el fallo por fatiga del diente roto.

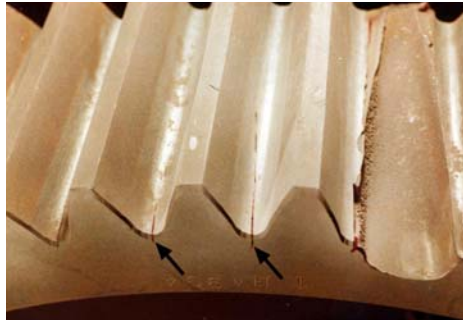


Figura 2.2. Agrietamiento de la corona en raíz de dientes, revelado en el ensayo con líquidos penetrantes.

En el examen macroscópico de la superficie lateral de la corona afectada por agrietamiento, el tratamiento térmico de temple superficial no cubre el acuerdo entre flanco y fondo del diente ni el espacio entre dientes, figura 2.3a. En la superficie lateral opuesta, sin agrietar, el tratamiento de superficie afecta a todo el perfil de diente, incluido el hueco entre dientes, figura 2.3b.

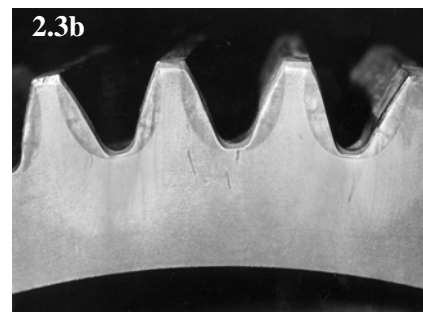
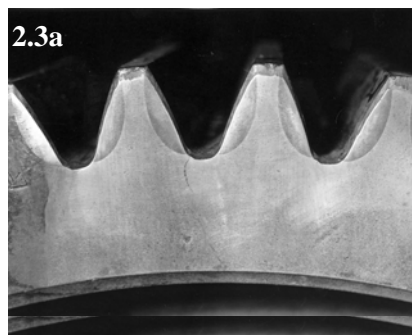


Figura 2.3. Examen macroscópico de las paredes laterales de la corona

El examen macroscópico de probetas obtenidas del diente roto, figuras 2.4a y 2.4b, confirma que en la zona de inicio de la rotura el material de raíz de diente no está afectado por el tratamiento de temple superficial. En este estado metalúrgico puede producirse un pico de tensión de tracción residual en la zona de transición entre la parte tratada del diente y la no tratada, que actúa como una

entalla metalúrgica y favorece el inicio de la rotura por fatiga. Además, debido a la ausencia del tratamiento de endurecimiento superficial en la zona de radio en raíz, no ha quedado reforzada la resistencia a flexión del diente, y por ello también se favorece el inicio de grietas de fatiga.

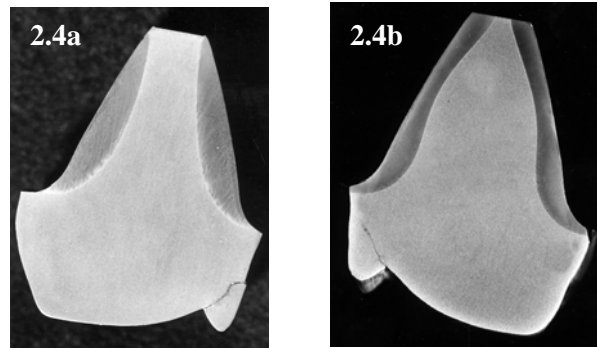


Figura 2.4. Examen macroscópico del diente roto.

En consecuencia, los resultados de este estudio permiten concluir que la rotura se produce en un proceso de fatiga por flexión plana unilateral iniciada en raíz de diente, debido a un defecto en el tratamiento de endurecimiento superficial (temple) atribuible a una incorrecta presentación del inductor frente a la superficie dentada de la corona.

3.3 Rotura por fatiga de espárragos disyuntores.- En el ensayo de fiabilidad a fatiga de un disyuntor se produjo la rotura de uno de los espárragos componentes del sistema para un número de ciclos inferior al mínimo de diseño. El material especificado para la fabricación de los espárragos es un acero no aleado del tipo UNE-EN 10083-C45 (AISI 1045) en estado de normalizado.

La morfología de la superficie de rotura es característica de un proceso de fatiga por flexión plana bilateral iniciado en una zona de cambio de sección sin radio de acuerdo, figura 3.1. En el estudio de espárragos nuevos se comprueba que el mecanizado de la pieza se ha realizado incorrectamente, no respetando las instrucciones del plano de fabricación que indicaba un mecanizado con radio de acuerdo mínimo de 2 mm en la zona de inicio de las grietas de fatiga, figura 3.2.



Figura 3.1. Superficie de rotura del espárrago ensayado a fatiga.

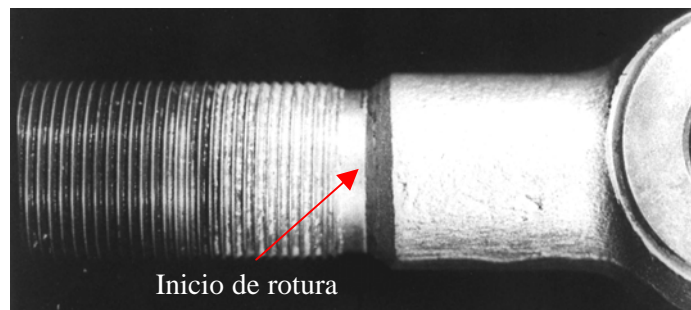


Figura 3.2. Zona de inicio de las grietas de fatiga en el ensayo de fiabilidad.

Los resultados de los ensayos para el control de composición química y estado metalúrgico del acero fueron conformes a lo especificado, y en la zona de inicio no existen defectos metalúrgicos que pudieran condicionar el comportamiento a fatiga. Los resultados del examen visual permiten concluir que la rotura se produce en un proceso de fatiga por flexión plana bilateral debido al efecto concentrador de tensiones que se genera por el incorrecto mecanizado de la pieza sin radios de acuerdo en el cambio de sección.

3.4 Rotura por fatiga de un cigüeñal.- El material del cigüeñal es un acero no aleado del tipo C45 (AISI 1045), y la rotura se produce en servicio después de su reparación mediante recargue por arco sumergido y posterior cromado de las muñequillas. El fallo se produjo por un proceso de fatiga iniciado en la superficie reparada, figura 4.1. El examen macroscópico de secciones longitudinales obtenidas en la zona de iniciación de la rotura revela el recargue de superficie y la zona afectada térmicamente inducida (ZAT), figura 4.2.

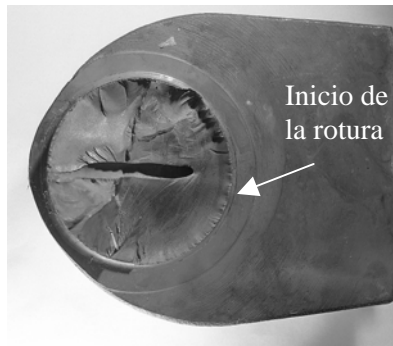


Figura 4.1. Superficie de rotura.

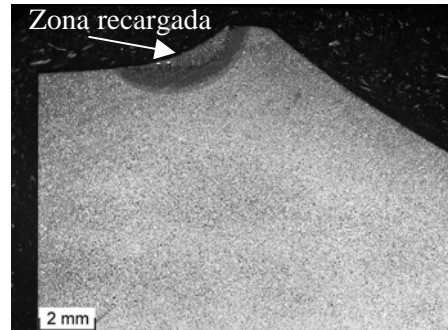


Figura 4.2. Zona reparada del cigüeñal.

Los resultados del análisis químico son conformes a los especificados para un acero del tipo C45 y la microestructura del acero en el núcleo de la muñequilla es ferrita-perlita. En la zona reparada la estructura del metal del recargue es de tipo columnar, con una dureza media de 405 HV1, y la de la zona afectada térmicamente (ZAT) es martensita de dureza 710HV1. En ambas zonas existe agrietamiento asociado a la reparación, figuras 4.3 y 4.4. Las características estructurales resultantes de la reparación son indicativas de que no se realizaron los tratamientos térmicos de pre y pos-soldadura en la reparación, y debe considerarse como la causa de la rotura en servicio.

La experiencia indica que las reparaciones realizadas mediante recargue en un proceso de soldeo en productos solicitados a esfuerzos de fatiga son, en general, soluciones poco efectivas y suelen ser causa de una vida residual muy limitada, particularmente si el material del elemento reparado es un acero templeable y el proceso de recargue se realiza sin tratamiento térmico de pre y pos-soldadura.

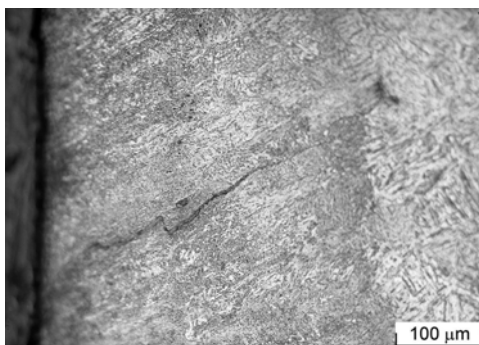


Figura 4.3. Grietas en metal aportado.

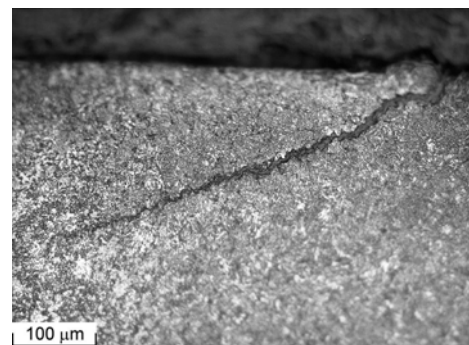


Figura 4.4. Grietas en ZAT.

3.5 Rotura de barras de acero de alta resistencia.- La rotura de las barras se produjo en el montaje en obra para una tensión de trabajo inferior al límite elástico del material, en zonas afectadas por defectos de superficie. El material de las barras es un acero de alta resistencia, del tipo 60Cr3 (AISI 5160), con valores del límite elástico superiores a 1000 MPa. En barras con defectos de superficie provocados en laboratorio, de naturaleza similar a los de las barras rotas en obra, se produce la rotura en el ensayo de tracción en laboratorio a una tensión de 760 MPa.

El aspecto de la superficie de fractura de las barras rotas en obra y de las barras rotas en laboratorio con defectos de superficie es característico de roturas semifrágiles con desarrollo de marcas en forma de espiga o raspa de pez que informan sobre la zona de iniciación de la rotura, que en el caso actual corresponde a la superficie de la barra en una zona de defectos cuyo aspecto es característico de fusión localizada por cebado de arco o por salpicaduras de soldadura, figuras 5.1 y 5.2.

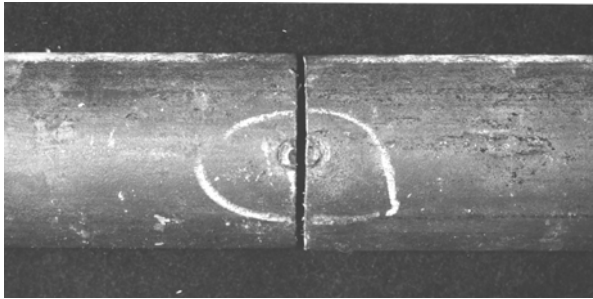


Figura 5.1. Superficie de la barra con defectos de fusión localizada y rotura asociada.

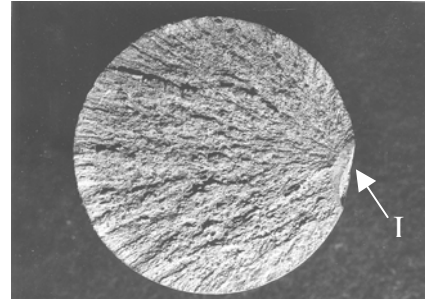


Figura 5.2. Superficie de rotura en la barra de acero con inicio en I.

En el examen macro y microscópico de secciones longitudinales de corte obtenidas de las zonas de iniciación de la rotura se manifiesta una alteración estructural debida a un efecto térmico, con desarrollo de dos capas microestructuralmente diferentes que corresponden a metal fundido la más externa y a transformación a martensita en la interior, figura 5.3. En ambas capas se observa agrietamiento del acero asociado a la fusión localizada del material de superficie.

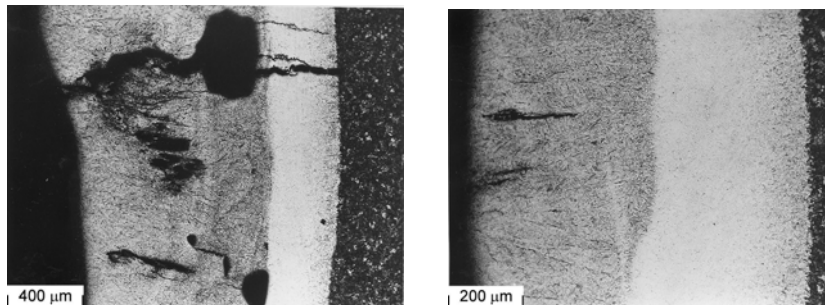


Figura 5.3. Defectos de fusión localizada en superficie de barra.

Los resultados del examen macroscópico son suficientes para establecer que los defectos de superficie en las barras corresponden a fusión local del material de superficie por cebado de arco o por efecto de salpicaduras de soldadura. La rotura en servicio para una tensión de tracción inferior al límite elástico debe atribuirse al desarrollo de estos defectos.

3.6 Rotura de un recipiente a presión para almacenamiento de hidrógeno.- Este recipiente se utilizó en un principio para el almacenamiento de oxígeno con sistema de cierre por roscado de la tapa al interior del cuello del recipiente y con soldadura posterior de la tapa al cuello. Posteriormente se destinó al almacenamiento de hidrógeno, modificándose el sistema de cierre que se realiza por roscado de la tapa a la superficie exterior del cuello.

El fallo del recipiente es del tipo catastrófico que proporciona diversos fragmentos de rotura, figura 6.1. La superficie de fractura es característica de roturas semifrágiles con desarrollo de marcas en forma de espiga o raspa de pez que indican como posible inicio de la rotura la zona del cuello donde existe agrietamiento longitudinal. El examen de la superficie de fractura en esta parte del recipiente permite localizar el inicio del fallo en el extremo superior del cuello roscado donde existe una pequeña zona lenticular de tonalidad más oscura que el resto de la rotura, figura 6.2.

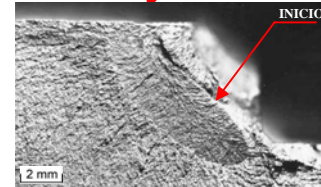
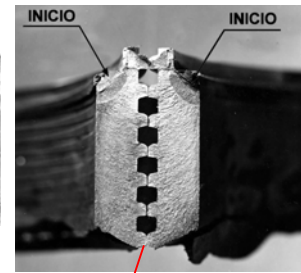
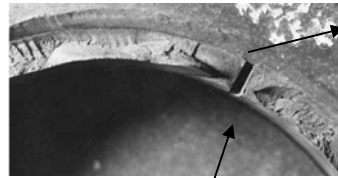
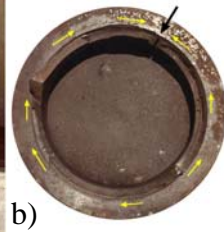


Figura 6.1. Dos de los fragmentos de rotura del recipiente. Cuerpo y ojiva (a), y cuello roscado con tapa (b). La flecha en cuello indica la zona agrietada longitudinalmente.

Figura 6.2. Superficie de fractura en la zona del cuello de la botella. Inicio de la rotura.

En el examen macroscópico de secciones longitudinales obtenidas en el cuello del recipiente, paralelas a la superficie de fractura, se observa una alteración estructural por el calor generado en un proceso de soldeo en la parte superior del cuello roscado del recipiente, con restos del metal aportado en soldadura y agrietamiento iniciado en el fondo del diente de la rosca interior, figura 6.3. La grieta inicia y propaga por la zona afectada térmicamente con estructura de martensita sin revenir de dureza media 570 HV1, es intercrystalina, está rellena de productos de corrosión y propaga sin deformación plástica del acero, figura 6.4. Esta morfología de la grieta es característica de un mecanismo de corrosión bajo tensión en aceros de elevada resistencia.

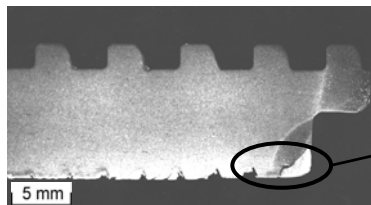


Figura 6.3. Sección longitudinal en la zona del cuello de la botella.

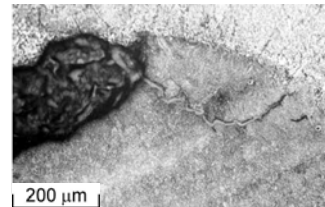


Figura 6.4. Agrietamiento iniciado en fondo de diente de rosca.

Los resultados del examen visual y macroscópico indican que la rotura se ha iniciado en la parte superior del cuello roscado del recipiente en la zona de la unión soldada de la tapa al cuello correspondiente al sistema de cierre. El examen microscópico permite precisar que la rotura se produce en un proceso de corrosión bajo tensión favorecido por las alteraciones estructurales y el efecto concentrador de tensiones que se producen en el proceso de soldeo del sistema de cierre.

REFERENCIAS

1. F.K. Nauman, "Failure Analysis. Case Histories and Methodology"; 1983, Dr. Rieder-Verlag GmbH Stuttgart, West Germany. American Society for Metals, Metals Park, Ohio. (*libro*)
2. "Failure Analysis and Prevention". Metals Handbook. Vol. 11; 2002, ASM International, Materials Park, Ohio. (*libro*)
3. J.L. McCall and P.M. French (eds.), "Metallography in Failure Analysis"; 1978, Plenum Press, New York. (*libro*)