

ESTUDIO DE CARACTERES FRACTOGRAFICOS DE ROTURAS PROGRESIVAS EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

R. Servent Miró, J.M. Pintado Fé, J. Alvarez Alba

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
División de Materiales y Estructuras
Carretera de Ajalvir p.k. 4
28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)

Resumen: La definición de caracteres fractográficos asociados a un proceso de rotura de materiales constituye un estudio necesario, aunque no suficiente, en la determinación de los mecanismos y las causas de esa rotura. En aceros inoxidable austeníticos algunos de los caracteres correspondientes a roturas por fatiga y roturas por corrosión bajo tensiones pueden confundirse por lo que se plantea, en el presente trabajo, un estudio detallado para su identificación en referencia a un caso de rotura real en servicio de remaches de acero AISI 304L y resultados de ensayos de fatiga en laboratorio.

Abstract: Characterization of fractographic patterns associated with fracture processes of materials is a necessary but not sufficient study when analyzing the mechanisms and causes of those failures. Whether fatigue or stress corrosion cracking processes cause the fracture of an austenitic stainless steel, some of the suitable fractographic patterns could be mistaken and for this, present work aims to study and more clearly define those features referred to a true in service failure of several AISI 304L rivets and the results of laboratory fatigue tests, too.

1. INTRODUCCION

Si bien la fractografía constituye un capítulo básico en el análisis de fallos en servicio, la correcta interpretación de los caracteres fractográficos asociados a un proceso de rotura debe realizarse atendiendo, también, a consideraciones relativas a los mecanismos por los que se generan dichos caracteres, a la influencia que, sobre estos caracteres, puede tener la naturaleza y estructura del material, a factores geométricos y de diseño y a la sollicitación mecánico-ambiental a la que el material (la pieza estudiada en su conjunto) ha sido sometido. Los caracteres macromorfológicos definidos en un estudio fractográfico proporcionan información acerca de los modos y tipos de carga aplicada, la influencia de factores geométricos, etc.; por otro lado, los correspondientes caracteres micromorfológicos revelan el mecanismo (uno o varios conjuntamente) que ha actuado en el proceso de rotura: iniciación, propagación (en diferentes etapas y con variantes) y rotura final.

Los fenómenos de fatiga y corrosión bajo tensiones o tensocorrosión aparecen como la causa primaria de gran número de casos de rotura progresiva de elementos estructurales de sistemas y mecanismos en sectores industriales muy diversos y, en esta medida, la identificación inequívoca de los caracteres fractográficos de una rotura como parte del estudio de fallos en servicio resulta de primordial importancia por las consecuencias

relativas a la prevención de nuevos fallos, a la corrección de errores de diseño, a la modificación de procedimientos de mantenimiento, etc.

En el caso de la roturas progresivas por fatiga o corrosión bajo tensiones en aceros inoxidable austeníticos, los caracteres fractográficos específicos asociados a estos procesos no han sido, en su totalidad, tratados con detalle en la literatura sobre el tema y, por otro lado, se presentan, en algún caso, con rasgos muy parecidos pudiendo, en un estudio no suficientemente riguroso, dar lugar a errores en la definición del mecanismo de una rotura dada. Debido a la importancia de esta cuestión, se plantea en este trabajo el estudio de estos caracteres (macro y micromorfológicos) en referencia al análisis de un caso real de fallo en servicio de piezas de un mismo material en diferente estado microestructural (atención al problema de la sensibilización del acero) y a los resultados de ensayos realizados en laboratorio sobre probetas del mismo material.

2. ROTURAS POR FATIGA Y ROTURAS POR CORROSION BAJO TENSIONES EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

2.1. Roturas por fatiga. En relación con la caracterización morfológica de las fracturas producidas por fatiga pueden diferenciarse las correspondientes a procesos

debidos a fatiga oligocíclica o a bajo número de ciclos y a procesos de fatiga a altos números de ciclos (a las cuales nos referiremos en el desarrollo de este trabajo). Tratándose, en ambos casos, de fenómenos de rotura progresiva (macrofractográficamente se aprecian una zona de rotura progresiva y una segunda de rotura instantánea por sobrecarga estática), las primeras presentan una fractura por roturas estáticas parciales sucesivas sin que opere ningún mecanismo propio de propagación de grieta; las segundas, por el contrario, se desarrollan con micromecanismos propios para la iniciación y la propagación de la grieta de acuerdo con un proceso en el que, tradicionalmente, se han distinguido tres etapas [1] definidas esquemáticamente en la Fig. 1 y que corresponden a los distintos mecanismos asociados a diferentes valores de la relación $da/dN = f(\Delta K)$ y son responsables de los también distintos caracteres fractográficos que pueden observarse en cada etapa.

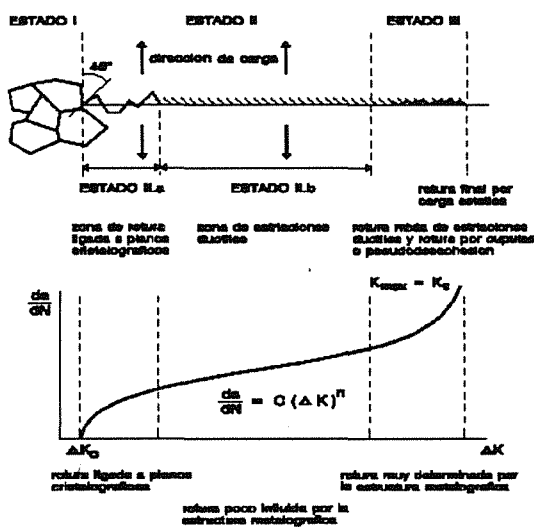


Fig. 1. Estados del desarrollo de un proceso de fatiga a altos números de ciclos.

En aceros inoxidables austeníticos (cfr. apartado 3.4.), las roturas por fatiga son transcristalinas en el estado II (ligadas a planos cristalográficos en el estado de propagación II.a e independientes de la microestructura del material en el estado II.b). Al aumentar el factor de intensidad de esfuerzos con la longitud de la grieta manteniendo constante el valor de la carga aplicada o al aumentar el esfuerzo por la disminución de la sección remanente, la separación de las estriaciones de fatiga, de orientación fuertemente determinada por la dirección de propagación de la grieta, aumenta en el estado II.a (estriaciones frágiles con presencia de microgrietas asociadas) (cfr. Fig. 9) y se produce la transición al estado II.b (estriaciones dúctiles) (cfr. Fig. 10). La rotura final por sobrecarga afecta a un área que es tanto mayor cuanto mayor es el valor máximo del esfuerzo en

la sección remanente.

2.2. Roturas por corrosión bajo tensiones. El fenómeno de corrosión bajo tensiones es un proceso de rotura progresiva (diferida bajo carga estática) de materiales metálicos que se produce cuando concurren los efectos del contacto de éste con un medio ambiente agresivo (electrolito más agua), de la susceptibilidad del material (naturaleza, condición y estado) en el medio ambiente de trabajo y de un nivel suficiente de tensiones mantenidas (localmente, componentes de tracción). En estas condiciones el proceso se desarrolla en un tiempo más o menos prolongado y la temperatura ambiente determina también la velocidad del mismo. La grieta se propaga (transgranular o intergranularmente) a través de zonas preferenciales. En el caso de propagación intercrystalina, el mecanismo usual de propagación es por disolución anódica del material en la punta de la grieta y por la acción simultánea de las tensiones que, en el fondo de la grieta, rompen la capa pasivada exponiendo la nueva superficie al contacto con el medio ambiente agresivo.

El mecanismo de propagación de una rotura transcristalina por corrosión bajo tensiones, de acuerdo con la teoría de la absorción química, es un proceso de propagación de enfragilización del material y de roturas por descohesión: en la superficie libre de punta de grieta se produce la absorción de un determinado elemento (aún en cantidad mínima) que disminuye localmente la resistencia cohesiva del material absorbente y se produce la descohesión por acción de un cierto nivel de esfuerzos ($K_I > K_{Iacc}$), rompiéndose la capa pasivada formada y dando lugar a que continúe la absorción (se trata, pues, de un proceso que necesita de la existencia de un cierto grado de microdeformación plástica en el material).

Cuando la rotura es transcristalina la fractura presenta una morfología de zonas planas frecuentemente dispuestas en forma de abanicos y, en las facetas de corte de grano, pueden apreciarse algunos espinazos de desgarro (Fig. 2), un cierto ataque de la superficie y, por lo mencionado en el párrafo anterior, indicaciones de líneas de deslizamiento de planos (intersección de éstos con la superficie de fractura). En el caso de roturas intercrystalinas, se observa la formación de productos de corrosión y grietas secundarias (también intergranulares) así como el ataque y disolución (más o menos marcados) en aristas y caras de grano.

En aceros inoxidables austeníticos, la rotura por corrosión bajo tensiones es de carácter transgranular aunque, si el acero está sensibilizado, puede desarrollarse intergranularmente. Aunque no está claramente establecido, sí se admite en términos generales que la sensibilización de estos aceros, definitiva en cuanto a la susceptibilidad a la corrosión intercrystalina, afecta también a la susceptibilidad que presentan a la corrosión bajo



Fig. 2. Micrografía de una rotura por corrosión bajo tensiones en una chapa de acero AISI 304L. Caracteres fractográficos típicos (escalones y espinazos de desgarro).

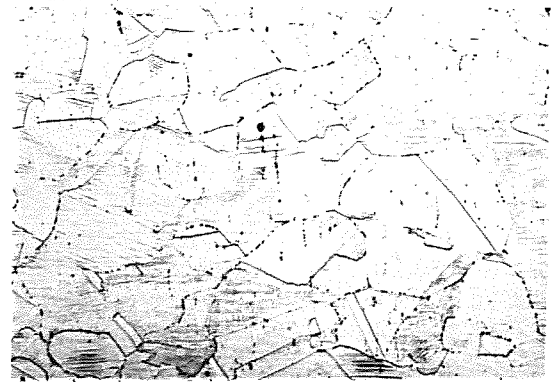


Fig. 3. Microestructura de uno de los remaches rotos en servicio. Precipitación de carburos y bandas de deslizamiento. (Contraste interferencial, x 200).

tensiones transcristalina.

3. ESTUDIO FRACTOGRAFICO DE LAS ROTURAS EN REMACHES DE ACERO AISI 304L

En dos soportes de instrumentación de motores de reacción para pruebas en banco, se produjo la rotura de los tres remaches que unían cada soporte a la carcasa (bypass duct) de sendos motores a las 45 y 62 horas de funcionamiento en banco cuando los soportes, en ambos casos, no estaban siendo empleados para fijar elemento alguno de instrumentación. Los remaches, de acero clasificado como AISI 304L (de bajo contenido en C), fueron remachados en frío, en seco y a presión hasta una carga de 5 a 6 Kg con un mismo recorrido medido del útil de remachado (diámetro final del remache del orden de 3.3 mm). La temperatura de trabajo de los remaches se estimó en unos 220 °C y las cargas sobre éstos fueron sólo las debidas a inercias por vibración y a las tensiones internas introducidas en la operación de remachado (según el eje longitudinal del remache).

3.1. Caracterización microestructural de los remaches.

La observación de probetas metalográficas de los remaches, en el estado de tratamiento de entrega para su utilización, revela una estructura de austenita, de tamaño de grano habitual, con gran número de carburos precipitados, mayoritariamente, en los bordes de grano y, en el caso de los remaches ya utilizados (rotos o no), se aprecian indicaciones de bandas de deslizamiento en el interior de los granos (Fig. 3).

La presencia de carburos precipitados en borde de grano es indicativa de un estado de sensibilización del acero a la corrosión intergranular (hecho contrastado positivamente también por la aplicación de la especificación

ASTM A262) debido a un defecto en el tratamiento térmico dado (baja velocidad de enfriamiento). Aplicado adecuadamente el tratamiento de ablandamiento previsto, se obtuvo una estructura sin carburos en cantidad significativa en los bordes de grano.

3.2. Estudio macrofractográfico de la rotura de los remaches. En todos los casos estudiados, la rotura se localiza a la altura de las dos piezas unidas por los remaches (soporte de instrumentación y carcasa del motor) y se desarrolla en un sólo plano perpendicular al eje del remache sin que se observe macrodeformación plástica significativa asociada a la fractura.

Con carácter general, la textura de la superficie de fractura es irregular (con diferencias sólo entre remaches de distinto soporte), con unas zonas de aparente fuerte oxidación y otras de rotura ligada a la estructura cristalina del material. En ningún caso se aprecian líneas de propagación direccional de la fractura ni líneas (playas) de frentes sucesivos de avance de grieta. Asimismo, tampoco se han observado orígenes localizados de la fractura.

No se aprecia en ningún remache zona alguna de rotura final por sobrecarga y, considerando los remaches correspondientes a un mismo soporte, no se observan indicios suficientes de que alguno de ellos rompiera después que otro o los otros dos como consecuencia de la rotura de un primer remache.

3.3. Estudio microfractográfico de las roturas de los remaches. Con el microscopio electrónico de barrido se observan, en las superficies de fractura de todos los remaches, caracteres micromorfológicos semejantes aunque con variación en cuanto al porcentaje de la superficie afectada en cada caso (en general, los corres-

pendientes a un mismo soporte presentan mayor similitud entre sí y ligeras diferencias con los del otro soporte). Estos caracteres son:

a) zonas de rotura transcristalina constituidas por escalones de planos cristalográficos en las que se aprecian sistemas de líneas rectas paralelas, perpendiculares a los laterales de cada escalón y con pequeño espaciado entre ellas (Fig. 4). También se han observado, en algunos casos, sistemas de líneas cruzadas en un mismo abanico (Fig. 5).

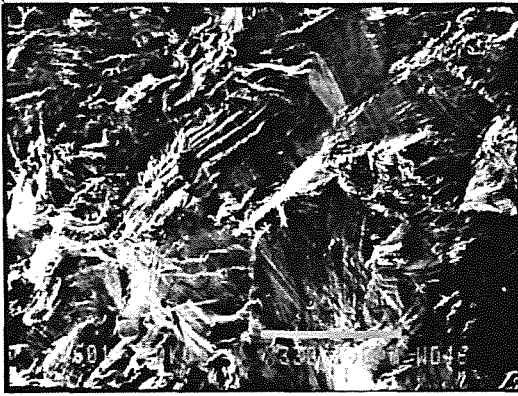


Fig. 4. Micrografía (SEM, x 330) de la superficie de rotura de un remache. Líneas de deslizamiento y facetas de cortes de grano en parte dispuestas en escalones.

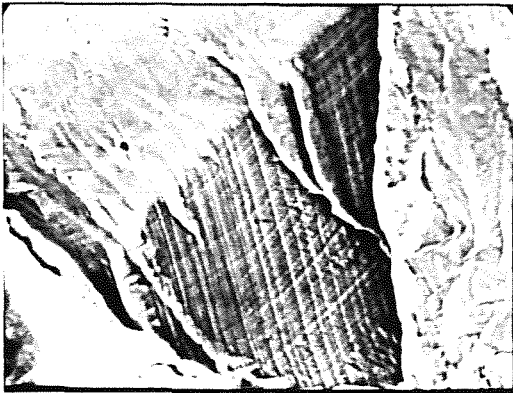


Fig. 5. Micrografía (SEM, x 3500) de una zona de un remache próxima al borde de la fractura. Sistemas de líneas de deslizamiento cruzados.

b) Zonas fuertemente oxidadas en las que no puede apreciarse el relieve bajo la capa de óxido.

c) Zonas ligeramente oxidadas en las cuales puede distinguirse, bajo la capa de óxido, el relieve descrito en a) (Fig. 6).

d) Pequeñas zonas, intercaladas en zonas con los caracteres descritos en a), con oxidación intercrystalina muy acusada.



Fig. 6. Micrografía (SEM, x 950) de una zona de la rotura de un remache con ligera oxidación.

3.4. Ensayos de tracción y fatiga realizados sobre remaches. Complementariamente al análisis de las roturas descrito en los apartados anteriores, se realizaron una serie de ensayos en laboratorio de tracción y fatiga sobre remaches no utilizados en servicio. Para la realización de éstos se construyó un útil (Fig. 7) que permitió ensayar los remaches, en las condiciones de carga establecidas para cada caso, reproduciendo el grado de deformación correspondiente a los remaches rotos en los soportes (remachados de la misma manera que aquellos y uniendo dos espesores iguales a los del soporte y la carcasa del motor). Dado que el propósito en el planteamiento de estos ensayos estaba en el estudio de los caracteres fractográficos asociados a procesos de rotura por carga estática y por fatiga y no en la determinación de valores de propiedades mecánicas, el número de probetas ensayadas en cada caso fue muy limitado (p.e. una sólo para cada caso de fatiga ensayado) y, en consecuencia, los resultados obtenidos en términos de valores de resistencia, de ciclos para rotura en fatiga, etc. deben sólo ser considerados a título orientativo.

En el ensayo a tracción de remaches en estado de tratamiento de entrega se estimó, para éstos, una carga de rotura de 630 MPa. La correspondiente rotura se produjo en doble bisel a 45° con estricción significativa y, en el estudio microfractográfico realizado, se observó la superficie de fractura constituida exclusivamente por cúpulas.

Los ensayos de fatiga se realizaron con espectro de amplitud constante y frecuencia de 10 Hz. El remache tratado térmicamente para eliminar la sensibilización (ensayo con $P_{max} = 3325$ N y $P_{min} = 175$ N) rompió a los 60500 ciclos y los remaches en estado de tratamiento de entrega ($P_{max} = 2500$ N y $P_{min} = 415$ N) lo hicieron a 400000 ciclos (ensayo a temperatura ambiente) y a 280000 ciclos (ensayo a 200 °C). En todos los casos se aprecia una deformación plástica importante asociada a

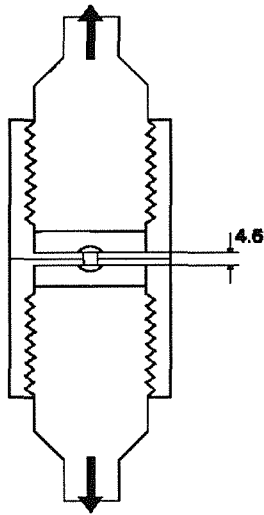


Fig. 7. Esquema del útil para los ensayos a tracción y fatiga de los remaches.

origen de la grieta (estado II.a), se observan estriaciones frágiles, propagación ligada a la estructura cristalina del material y presencia de microgrietas (Fig. 9); y, en la zona más alejada del origen, estriaciones dúctiles y propagación no asociada a la estructura cristalina (Figs. 10 a 12).



Fig. 9. Zona de rotura próxima al origen de un remache ensayado a fatiga (SEM, x 4000). Estriaciones frágiles y microgrietas asociadas.

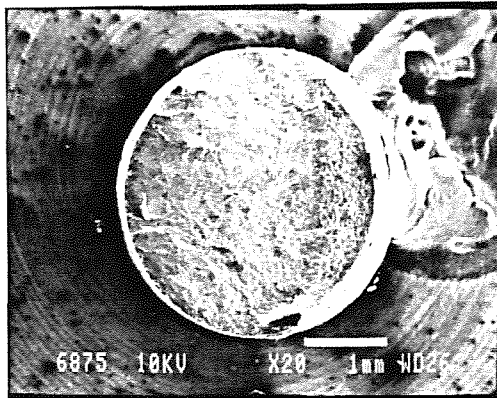


Fig. 8. Superficie de fractura (SEM x 20) de un remache ensayado a fatiga. Zona de rotura por fatiga y de rotura final por carga estática.



Fig. 10. Estriaciones dúctiles de fatiga en una zona intermedia de la rotura (SEM x 2000).

la rotura final por sobrecarga estática y la existencia, en la superficie de fractura, de dos zonas claramente diferenciadas (Fig. 8): una, de rotura progresiva por fatiga de recorrido básicamente en un plano normal al eje del remache y, la segunda, de rotura final por sobrecarga estática en bisel a 45°. Microfractográficamente, en la zona de rotura final el relieve está formado exclusivamente por cúpulas y, en la zona de rotura progresiva, se distinguen claramente los caracteres típicos de propagación de grieta por fatiga, no apreciándose diferencias morfológicas significativas por el hecho de que el remache esté o no sensibilizado o por la temperatura de ensayo: en las proximidades del

4. DISCUSION

4.1. Determinación de la causa de rotura de los remaches en servicio. Atendiendo a la solicitud de carga sobre los remaches en las condiciones de servicio en las que se produjo la rotura, de haberse producido ésta por fatiga debería apreciarse (y no ha sido el caso), al menos en el último remache de cada soporte en romper, una zona de rotura final por sobrecarga estática. Asimismo, un proceso de rotura por fatiga comportaría una cierta deformación plástica asociada a la rotura final dado el tipo de material de que se trata (de estructura cúbica centrada en caras y elevada plasticidad, por los

que no se produce un efecto de entalla significativo al romper la sección remanente y esta rotura es macromorfológicamente dúctil, la posibilidad de localización de uno o varios orígenes de la fractura y la existencia de líneas de propagación direccional y de frentes sucesivos de avance de grieta. Desde el punto de vista microestructural, el relieve de sistemas de líneas finas descrito, similar al de estriaciones frágiles de fatiga, se distingue de éste por presentar independencia en el espaciado y morfología respecto del valor del factor de intensidad de esfuerzos local (que varía a lo largo de las distintas zonas del plano de rotura) y en que su orientación es perpendicular a los bordes de los escalones de los abanicos e independiente de la dirección de propagación de la grieta.

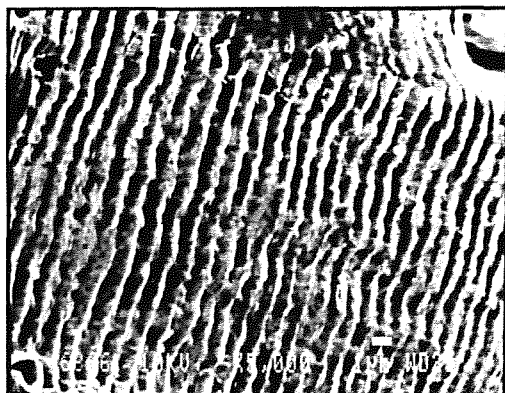


Fig. 11. Detalle de la figura anterior (SEM x 5000).

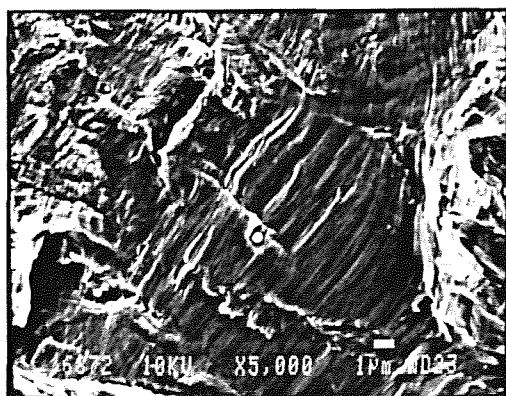


Fig. 12. Zona de rotura alejada del origen de un remache ensayado a fatiga. Estriaciones dúctiles (SEM, x 5000).

En consecuencia, cabe concluir que el proceso de rotura de los remaches ha sido, básicamente, debido a un proceso de corrosión bajo tensiones y no de fatiga, aunque no debe excluirse que, en zonas locales reducidas, pudiera existir un aporte secundario de corrosión-fatiga en el proceso global de avance de la grieta. El

factor determinante de la rotura ha sido el elevado grado de sensibilización del acero (incrementando también la susceptibilidad a corrosión bajo tensiones) y la temperatura de trabajo ha contribuido a acelerar el proceso.

El efecto de la sensibilización del material a la corrosión intercrystalina ha podido también ponerse de relieve con la localización de zonas en la superficie de fractura en las que se apreció una oxidación intercrystalina profunda.

4.2. Caracteres micromorfológicos diferenciales de las roturas por fatiga y por corrosión bajo tensiones. Los sistemas de líneas finas observados en las facetas de la superficie de rotura de los remaches rotos en servicio deben interpretarse como marcas de deslizamiento de planos cristalográficos (slip lines) durante el proceso de microdeformación según direcciones preferenciales determinadas por la estructura cristalina del material (red cúbica centrada en caras). En la bibliografía consultada, las referencias encontradas al respecto muestran indicaciones parecidas, resultantes de la intersección de esos planos de deslizamiento con las superficies de fractura. En el caso aquí propuesto, éstas presentan trazos rectilíneos y cubren uniformemente una mayor superficie, apreciándose también en algunas zonas dos sistemas de líneas de deslizamiento de planos cruzados (en este sentido cabe afirmar que, cuanto mayor es la deformación aplicada al material, mayor es el deslizamiento de planos de un sistema e, incluso, más probable resulta que inicien su deslizamiento planos de un segundo sistema).

Respecto de las estriaciones de fatiga en el estado II.a, la distinción estriba, tal como se ha señalado en el apartado anterior, en que las líneas de deslizamiento presentan un espaciado y forma constantes a lo largo de la grieta (independencia respecto del K_I local), en que aparecen orientadas perpendicularmente a los bordes de los escalones y en que no se observa la presencia de microgrietas asociadas. En relación con las estriaciones dúctiles características del estado II.b de fatiga, la distinción es más evidente (por la morfología bien conocida de las estriaciones, con las crestas claramente marcadas) y no debe haber lugar para confusión en su interpretación.

Otros caracteres microfractográficos propios, distintos de los que pueden observarse en roturas por fatiga, son los espinazos de desgarro que pueden observarse ocasionalmente sobre los escalones, y obviamente, las indicaciones de un mayor o menor grado de oxidación superficial de la fractura así como la presencia de productos de corrosión (en el caso de un acero sensibilizado a corrosión intergranular y trabajando a temperaturas relativamente altas, es razonable que estas indicaciones estén más acusadas que en el caso de un proceso de corrosión bajo tensiones en el mismo acero no sensibilizado).

zado y trabajando a temperatura ambiente).

5. CONCLUSIONES

El análisis de fallos en servicio comprende la ejecución sistemática, rigurosa y ordenada de una serie de estudios que permiten acopiar una cierta información que, sólo cuando es considerada en su conjunto, lleva a poder establecer las conclusiones correctas que resuelven el caso. Entre estos estudios, la caracterización fractográfica de las roturas encontradas es necesaria para la determinación de los mecanismos (uno o varios) por los cuales se ha conducido el proceso de rotura.

En el caso de aceros inoxidable austeníticos, las roturas transcristalinas desarrolladas en un proceso de corrosión bajo tensiones, presentan unos caracteres microfractográficos (descohesión transcristalina y presencia sobre los planos de descohesión de sistemas de finas líneas que son trazas de planos de deslizamiento) que son en cierto modo similares a los caracteres típicos de rotura por fatiga en el estado II-a de propagación, si bien pueden diferenciarse atendiendo a la dependencia o no del espaciado y forma de estas indicaciones respecto del K_I local, a su orientación respecto de la dirección de propagación de la grieta, o a los bordes de los escalones en las zonas planas de descohesión y a que se presenten o no microgrietas asociadas. Otros caracteres morfológicos específicos de cada uno de estos procesos son más claramente diferenciables: existencia o no de una sección de rotura final por sobrecarga, presencia de espinazos de desgarramiento sobre las facetas de corte de grano, grado de oxidación de la superficie de fractura, y sobre todo, la aparición en el caso de fatiga (estado II-b de propagación) de las mesetas no ligadas a planos cristalográficos sobre las que aparecen las típicas estriaciones de fatiga.

El estado de sensibilización a corrosión intergranular en que puede encontrarse un acero inoxidable austenítico parece que también incrementa la susceptibilidad de éste a la corrosión bajo tensiones (de carácter transcristalino). Sin embargo, aunque en el caso de darse un proceso de este tipo se encuentran, junto a los caracteres específicos del mismo, indicaciones de corrosión intergranular, no parece que esta circunstancia determine una variación en los caracteres fractográficos asociados a este proceso respecto de los correspondientes en el mismo acero no sensibilizado.

6. REFERENCIAS

Pintado Fé J.M. "Fallos en servicio de los materiales metálicos". Ed. INTA, 1992.

Mukay Y., Watanabe M. y Murata M. "Fractographic

observation of stress corrosion cracking of AISI 304 stainless steel in boiling 42% magnesium chloride solution", en *Fractography in Failure Analysis ASTM STP 645*. Ed. ASTM.

Hioki S. y Mukay Y. "Effect of the cyclic rate on corrosion fatigue and fractography of type 304 stainless steel in boiling 42 percent magnesium-chloride solution", en *Fractography in Failure Analysis ASTM STP 645*. Ed. ASTM.

Tetelman A.S. y McEvily J. "Fracture of structural materials". Ed. John Willey and sons, 1967.