

INGENIERÍA FORENSE (DIAGNOSIS DE FALLOS)

E.J. Herrera, L. Soria y J.M. Gallardo

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Universidad de Sevilla,
Escuela Superior de Ingenieros, Camino de Descubrimientos, s/n, 41092 SEVILLA.

Resumen. Los usuarios de productos técnicos exigen que sean seguros y fiables. Sin embargo, se deslizan defectos o se cometen errores en las etapas de proyecto, fabricación, montaje o servicio, que originan fallos. La diagnosis de fallos es la investigación sistemática para encontrar las causas del mal comportamiento, es decir, por qué el producto no fue capaz de cumplir con el propósito para el que fue concebido. En el presente trabajo, se describen los procedimientos y técnicas utilizados en el proceso global de diagnosis, ilustrándose con ejemplos reales estudiados por los autores.

Abstract. Users request that engineering products be safe and reliable. Nevertheless, defects slide or errors are made at the stages of design, manufacturing, assembly or service, giving raise to failures. Failure diagnosis is the systematic investigation leading to find the causes of the bad performance, i. e., why the product was not able to fulfill its intended purpose. In this work, the procedure and techniques used in the integral process of diagnosis are described. The description is illustrated with actual cases studied by the authors.

1. INTRODUCCIÓN.

En el lenguaje técnico se entiende por fallo la alteración sufrida por un componente, en la mayoría de los casos, metálico, que origina un cese prematuro, total o parcial, de su función. Las consecuencias económicas de los fallos pueden ser muy diversas: desde el simple coste de reposición de las piezas averiadas (pérdidas directas) hasta importantes gastos originados por la parada de máquinas o instalaciones (pérdidas indirectas). Los fallos tienen también consecuencias sociales, por ejemplo, un fallo imprevisto puede provocar graves accidentes corporales, incluso la muerte. Así, un casquillo de bala de cañón, agrietado por corrosión bajo tensiones (season cracking), reventó al hacerse una salva de honor, matando una de las esquirlas, violentamente desprendida, a un joven espectador (Fig. 1).



Fig. 1. Un casquillo de bala de cañón similar al que dio lugar a un accidente mortal.

En el estado actual de la Técnica, la seguridad y la fiabilidad son requisitos exigibles de las máquinas, estructuras, dispositivos e instalaciones industriales. Por ello se pide a los ingenieros productos libres de averías y fallos. A pesar del gran interés puesto en conseguir esa meta, se deslizan defectos o se cometen errores en una o varias de las etapas de la vida de una pieza, que abarcan desde su concepción a su utilización final. A veces ocurre que el material se encuentra sometido en la práctica a solicitaciones mecánicas, químicas o térmicas no previstas por el proyectista, bien por carencia de información o por una modificación real de las condiciones de trabajo durante el funcionamiento de la instalación.

La realización del análisis o diagnosis de fallos tiene por objeto encontrar las causas de los fallos y conlleva la sugerencia de remedios o precauciones futuras. Dicho análisis puede estar motivado por razones técnico-económicas o por consideraciones legales.

En el presente trabajo, se exponen los principios y metodología de la diagnosis de fallos y se ilustra la descripción con ejemplos reales estudiados por los autores.

2. TIPOS DE FALLOS.

Para el empleo de un lenguaje común, en la diagnosis de

fallos, se precisa la adopción de una terminología específica, lo que lleva consigo la definición de conceptos y la clasificación, gráfica en su caso, de los tipos de fallos y de sus mecanismos inductores. En Alemania, se ha elaborado con dicho fin la Guía técnica VDI-3822 "Análisis de Fallos" [1]. En dicha Guía se recogen, de forma genérica, las características morfológicas de los distintos fallos metálicos y sus causas determinantes. Los fallos están clasificados en base al tipo de sollicitación, o sollicitaciones, responsable del daño. Surgen así cinco cuadernos (Blätter):

- Fallos debidos a sollicitaciones mecánicas (Cuaderno 2).
- Fallos por corrosión en medios acuosos (Cuaderno 3).
- Fallos debidos a sollicitaciones térmicas (Cuaderno 4).
- Fallos debidos a sollicitaciones tribológicas (Cuaderno 5).

Conceptos generales y definiciones, relativos al análisis de fallos, así como el procedimiento de su realización, se recogen en el Cuaderno 1 de la Guía.

Igual que ocurre en otros campos de la Ciencia y de la Técnica, el análisis de fallos puede realizarse según las pautas de un método sistemático. A este respecto es de gran ayuda la Guía de referencia, donde se contienen esquemas y figuras de los fallos, descripción de sus formas de manifestación y detalles característicos que les acompañan, así como indicaciones sobre el origen y evolución del daño.

Existen, por otra parte, excelentes monografías sobre análisis de fallos, algunas de las cuales se indican en las Referencias [2-6].

3. DIAGNOSIS DE FALLOS.

La experiencia ha demostrado que el factor o los factores motivantes del fallo de una pieza pueden ser muy diversos. Estos factores pueden haber actuado en una o varias de las fases o etapas de la vida de un componente, a saber, proyecto, fabricación, montaje y servicio (Fig. 2). Puesto que los fallos no son deseables, la prevención de los mismos debe ser un esfuerzo continuo que abarque desde el inicio del proyecto hasta la parada final de la máquina. La fase del proyecto es sumamente importante. El diseño del componente o equipo, en cuanto a selección de materiales, formas y dimensiones, características de fabricación, prácticas operatorias y recomendaciones de mantenimiento, tiene una marcada influencia en la disminución de los riesgos de averías. La figura 3 muestra un detalle de un componente con rosca cuadrada, perteneciente a una grúa, roto por fatiga ocasionada por un mal diseño (carencia de un buen radio de acuerdo en el fondo de la rosca).

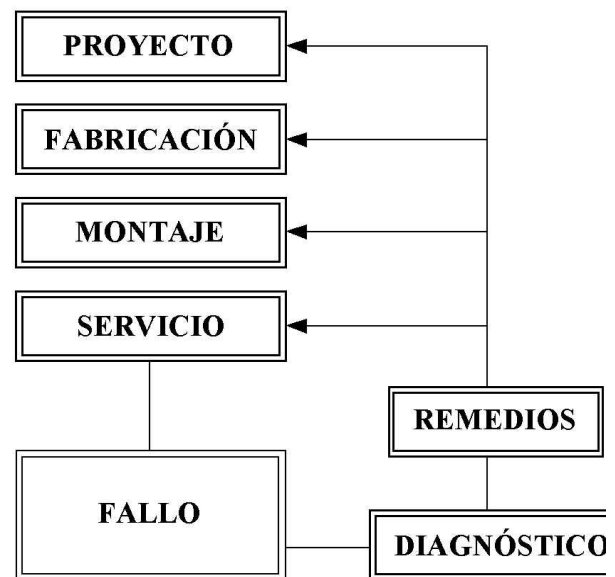


Fig. 2. Fases de la vida de una pieza y efecto retroalimentador de la diagnosis de fallos.

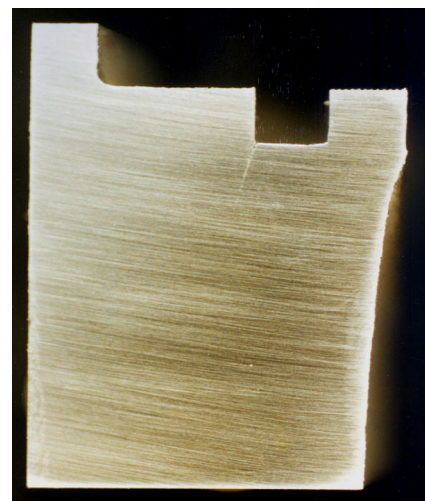


Fig 3. Componente de grúa roto por fatiga. La fractura (a la derecha de la figura) fue promovida por un mal diseño, que dio lugar a la aparición de grietas en zonas de concentración de tensiones. Una grieta similar a la que originó la rotura puede observarse en la figura.

En la etapa de manufactura de las piezas, un sistema de inspección debe asegurar que los fabricantes trabajen de acuerdo a las especificaciones de diseño y que su control de calidad actúe de forma eficiente. La figura 4 ilustra una rotura debida a una mala manufactura de piezas.

Debe también tenerse en cuenta que algunos componentes, a la espera de montaje, han de someterse temporalmente a medidas protectoras de corrosión. El deterioro puede también tener lugar en la etapa de transporte o de almacenamiento. Así, por ejemplo, los autores, han podido observar la aparición de corrosión superficial en perfiles de acero galvanizado tras un viaje

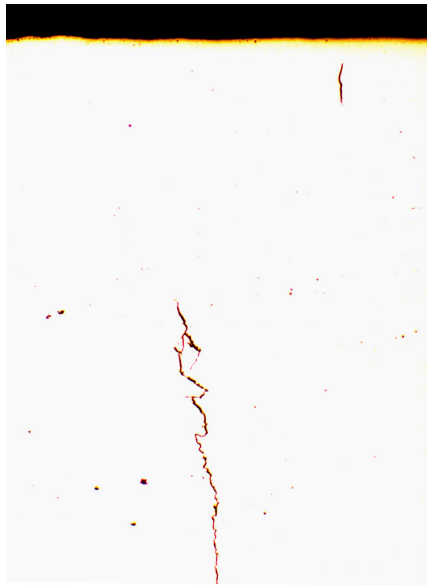


Figura 4. Grietas originadas por una deficiente ejecución de soldadura en un eje de acero, perteneciente a una cableadora, que rompió por fatiga a los 20 días de funcionamiento.

a ultramar, en condiciones no adecuadas de almacenamiento, o ataque de piezas pequeñas de acero galvanizado contenidas en cajas de madera fresca, que habían emitido vapores ácidos.

En la fase de montaje de máquinas, o construcción de plantas, además de un buen alineamiento, se ha de comprobar, entre otros aspectos, la calidad de la soldadura in situ, que los tratamientos térmicos se atienen a lo especificado y que el equipo está exento de daño, por ejemplo, en lo que concierne a recubrimientos. La figura 5 muestra el aspecto de un alabe de turbina deteriorado, en su borde de ataque, debido a un mal montaje, que causó un desajuste entre el rotor y los sectores del forro, que dio lugar, a su vez, a un fuerte rozamiento. El extremo de los alabes, fabricados en una superaleación de níquel, quedó desprotegido del recubrimiento protector y sufrió corrosión en caliente de alta temperatura.

Para evitar la instalación en planta de materiales inapropiados, debido a una simple mezcla de almacén, es muy aconsejable el empleo de un sistema claro de identificación. El uso de materiales erróneos, suscitado por deficientes marcas de identificación, puede también haberse dado durante el estadio de fabricación, por ello, es aconsejable verificar si los materiales de los equipos (al menos, los de las partes más críticas) se atienen a lo especificado en el proyecto.

Finalmente, en la etapa de funcionamiento o servicio, el componente se encuentra sometido a unos esfuerzos mecánicos en un determinado ambiente físico-químico. La mayoría de los fallos metálicos ocurre en esta etapa de la vida de las piezas. La figura 6 muestra un tubo de



Figura 5. Alabe de turbina deteriorado, a causa de un mal alineamiento rotor-forro.

caldera roto, por el lado del fuego, a los 10 meses de servicio efectivo. El daño fue debido a sobrecalentamiento prolongado, motivado por espesas incrustaciones del tubo, debido al uso de un agua muy rica en sulfato cálcico.



Figura 6. Tubo de caldera roto en servicio.

En este período de utilización de la pieza, un buen sistema de mantenimiento debe comprender no sólo una planificación de las paradas para reparar o renovar equipos, sino la aplicación de una serie de medidas preventivas de averías, así como el seguimiento o detección del deterioro. Respecto a este último extremo, es deseable no limitarse a inspecciones visuales de ciertos equipos a intervalos regulares de tiempo, sino proceder a detectar el deterioro con el equipo en servicio (on-line monitoring). Los sistemas de detección de averías dan la alerta a tiempo, lo que permite la adopción de medidas correctivas. En algunos casos, al ocurrir el fallo, se conocen los remedios aplicables o se pueden deducir fácilmente, pero en otros, se ha de proceder previamente a un diagnóstico, consultando, eventualmente, a un especialista.

La diagnosis de un fallo, el hallazgo de las causas del deterioro de una máquina o instalación industrial, no es, en la actualidad, una operación independiente y aislada, sino que está enmarcada dentro del proceso global del control de calidad. Es una experiencia más de la práctica del servicio o marcha de la instalación, que habrá de incidir, por retroalimentación (Fig. 2), en el desarrollo y mejora de la productividad y de la seguridad. El enfoque es parecido al que se hace, en el sistema sanitario, en la llamada *Amedicina preventiva*®.

4. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLOS.

En la investigación de un fallo metálico, el analista se encuentra con frecuencia en una situación similar a la del policía o detective que se enfrenta a la resolución de un crimen misterioso (Fig. 7).



Fig. 7. El famoso detective Sherlock Holmes.

Por ello, debe examinar y evaluar cuidadosamente todas las pistas, por pequeñas que sean, para determinar las causas probables del fallo (crimen) y la secuencia de sucesos, que lo han desencadenado. La formulación de un tal objetivo muestra la complejidad del análisis, ya que su campo material comprende actividades propias de oficina de proyectos, plantas manufactureras, equipos de montajes y talleres de utilización. Para acumular el máximo de información, el investigador debe utilizar un metodología adecuada, aplicada en un orden secuencial correcto, para no destruir huellas o vestigios antes de que puedan ser analizados. En gran medida, esta metodología ha sido popularizada por las series televisivas americanas CSI (Crime Scene Investigation) y CSI – Miami, y la española El Comisario, donde se hacen, con frecuencia, referencias a la actuación de la policía científica.

El investigador de fallos desempeña también una función semejante a la de un médico clínico que ha de localizar el mal padecido por un enfermo, antes de proceder a recetar. El proceso de diagnosis se aborda de una forma sistemática que, en el caso del facultativo, es bien conocida: (1) historial clínico, (2) reconocimiento del enfermo, (3) prescripción de análisis y estudios diversos, (4) diagnosis y remedios. Una metodología parecida debe seguirse en la diagnosis de fallos metálicos.

Ahora bien, la pieza fallada no puede responder a las preguntas del analista (médico), ya que es un *Acadáver*®. A este respecto, el analista, en su examen post-mortem, se asemeja más a un médico forense. De ahí que se llame también, a la diagnosis (análisis) de fallos, ingeniería forense. En sentido estricto, el análisis de fallos debería designarse ingeniería forense (foro = abogacía/juzgado) solamente cuando se combinan aspectos legales y técnicos [7], como en pleitos sobre productos defectuosos.

4.1. Historial de la pieza.

En la recogida de información, debe tenerse en cuenta que la pieza fue concebida, diseñada, fabricada y montada en un periodo anterior al fallo, generalmente ocurrido en servicio. Es conveniente, y a veces necesario, conseguir el plano de la pieza, con la lista de modificaciones de diseño, si ha lugar, incluyendo las especificaciones de materiales, su estado estructural y propiedades mecánicas, el procedimiento de conformado, tratamientos térmicos, tipo de acabado y otras. A esta documentación deben añadirse los certificados de control de calidad en el curso de fabricación, en recepción y en la evaluación final del producto. El examen de estos documentos técnicos, y otros análogos, es siempre de gran interés, pudiendo, en el caso de demandas judiciales, ser determinantes, cuando se detecta falta de conformidad con las especificaciones.

Asimismo, el conocimiento de las condiciones reales de trabajo de la pieza (tensiones de servicio, medio ambiente, temperatura, régimen de mantenimiento, etc.) es sumamente importante, al igual que la historia de la avería misma, en lo referente a sus antecedentes, desarrollo y consecuencias. La figura 8 muestra la corrosión interior de una tubería de acero usada para conducción de agua municipal, en forma de pústulas, bajo las cuales se aprecia un ataque localizado por picaduras. Una de estas picaduras ha logrado atravesar la pared del tubo. La causa (agua estancada durante 2 años) se pudo averiguar tras diversas entrevistas con los técnicos de la empresa de aguas.

La recopilación de información sobre la historia de la pieza no es completa sin el testimonio de personas que han vivido el fallo o han estado relacionadas con la



Fig. 8. Interior de tubo corroído donde se aprecia una picadura que ha atravesado la pared de acero.

fabricación o control de la misma. Las entrevistas con tales testigos han de conducirse con habilidad, ya que las personas involucradas suelen adoptar una actitud defensiva, ante el temor de verse implicadas en la responsabilidad del fallo. Por eso, la información, así adquirida, debe interpretarse con cautela, dada la posible parcialidad de los interrogados, bien inintencionada o deliberadamente.

4.2. Examen visual.

Debe remarcarse la importancia fundamental de la toma de muestras representativas, como paso previo a cualquier observación visual o microscópica. En el caso de fallos por corrosión, además de un trozo del material afectado en servicio, se tomarán muestras del medio en contacto y de los productos de corrosión. Las muestras han de manipularse cuidadosamente y deben tomarse medidas preventivas para su conservación. En el caso de piezas rotas, la protección de las superficies fracturadas es de particular relevancia, especialmente si han de someterse a estudios de microscopía electrónica de barrido. Muchos resultados de estos estudios se han malogrado por haberse procedido, con anterioridad, al acoplamiento de las dos partes de la pieza siniestrada, por un empaquetamiento deficiente, por mala protección contra la corrosión e incluso por el contacto con los dedos. Por desgracia, llegan, en ocasiones, al laboratorio del analista, muestras falladas que han sido indebidamente manipuladas y empaquetadas, no habiéndose tenido en cuenta las advertencias anteriores.

La observación visual y, eventualmente, con lupa del componente averiado permite descubrir la presencia de coloraciones, productos de corrosión, detalles macroestructurales y características morfológicas, que pueden arrojar luz sobre las causas del deterioro, o la rotura, así como de su génesis. Por ejemplo, el examen visual puede fácilmente detectar el fenómeno de descincificación de un latón por el simple cambio de color de amarillento a rojizo. El análisis fractográfico, en particular, hace posible la determinación de la naturaleza real de las tensiones de trabajo en piezas rotas, la secuencia de la rotura y, especialmente, la

localización de la zona de inicio [5, 6]. La figura 9 muestra el aspecto de un tornillo de acero, perteneciente a un camión, roto por sobrecarga, donde se aprecian una notable deformación plástica y signos de la actuación de tensiones de cortadura.

El examen visual de las piezas, unido al historial de las mismas, son, a veces, suficientes para caracterizar el fallo o, al menos, para detectar puntos débiles o sospechar anomalías. Sin embargo, en general, se ha de proceder a pruebas complementarias, bien de comprobación o de esclarecimiento.



Fig. 9. Tornillo de camión roto con claros signos de deformación plástica.

4.3. Ensayos

Los ensayos posibles, o necesarios, de realizar en la diagnosis son muy variados, tanto destructivos como no destructivos, y con distinto grado de sofisticación, y en consecuencia, de onerosidad. La elección juiciosa de los mismos incidirá favorablemente en el coste total de la investigación.

La experiencia demuestra que, en la mayoría de los casos, un estudio metalúrgico clásico es suficiente. Se entiende por ello, una comprobación de la composición química y de sus características mecánicas, así como exámenes metalográficos en la zona de degradación o de inicio de las grietas. Por otra parte, suele ser muy aconsejable llevar a cabo **ensayos paralelos** con piezas originales no utilizadas o que, habiendo estado en servicio, no han sufrido averías. A veces, será conveniente llevar a cabo, en el laboratorio, **ensayos simulados** con piezas similares o modificadas a las que han padecido el fallo. La realización de un ensayo simulado fue determinante para corroborar las causas del fallo del colector de cobre y de los conductores que transmiten la corriente a las escobillas de un motor que trabajaba en una fábrica de reciclado de papel y cartónaje (Fig. 10).

En ocasiones será necesario hacer uso de medios de investigación complementarios, como la microscopía electrónica de barrido (SEM). Un ejemplo de la necesidad de utilización de técnicas complementarias se presenta en la Fig. 11, donde se muestran dos ejes cilíndricos rotos, en que la mera observación visual es incapaz de distinguir el modo de fractura. Ese aspecto de

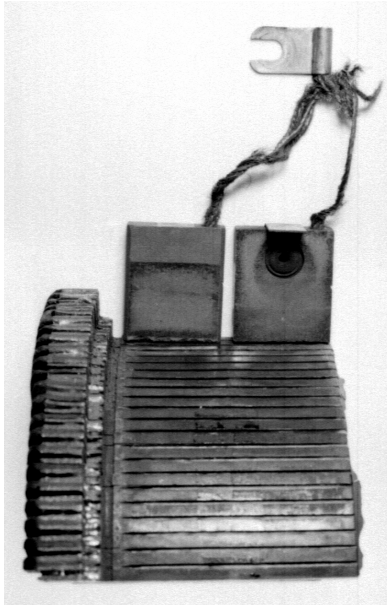


Fig. 10. Aspecto del deterioro de los hilos de cobre y del desgaste del colector por ataque de un corroyente gaseoso.

la rotura lo puede presentar un material frágil sometido a tensiones de tracción o un material dúctil que ha soportado tensiones de torsión. El examen microfractográfico, con ayuda de la microscopía SEM, puede, sin embargo, determinar si el comportamiento del material ha sido dúctil o frágil.

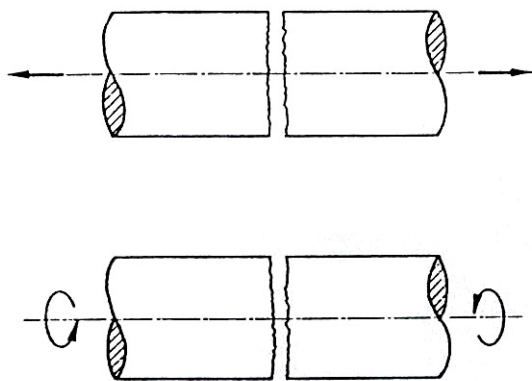


Fig. 11. Dos roturas con el mismo aspecto macrofractográfico, pero correspondientes a un material frágil (tracción) y dúctil (torsión), respectivamente.

De la misma manera, el examen microfractográfico de las caras fracturadas del tornillo de la figura 9 corrobora que la rotura fue dúctil, estando los hoyuelos (dimples) orientados en la dirección de los esfuerzos de cortadura (Fig. 12).

4.4. Diagnóstico e informe

La totalidad de la información generada con el historial de la pieza, su observación visual y los ensayos efectua-

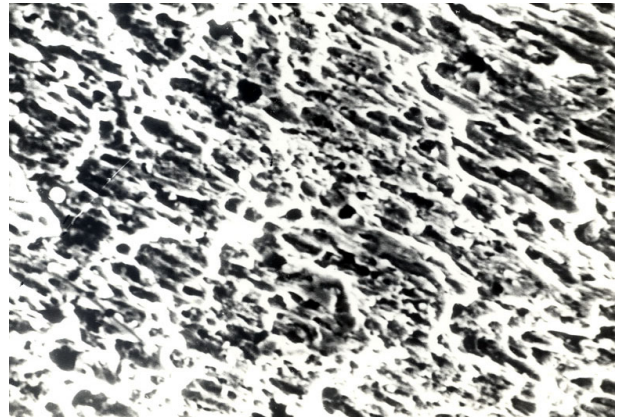


Fig. 12. Hoyuelos (dimples) orientados en la dirección de los esfuerzos cortantes, perteneciente a la superficie fracturada del tornillo de la figura 9.

dos ha de ser interpretada, sopesada y enmarcada dentro de un escenario lógico que explique la avería. El investigador debe examinar sistemática y racionalmente todos los datos recogidos y, apoyado en su experiencia previa y, en su caso, en la bibliografía, alcanzar unas conclusiones que sean compatibles con la información acumulada y verificada.

El informe debe expresar el tipo de fallo, sus causas y los remedios oportunos. A veces, el fallo puede haberse originado por la acción simultánea o secuencial de varios mecanismos. Así, una picadura producida por corrosión puede facilitar el nacimiento de una grieta, siendo la fatiga la culpable última de la rotura. En cuanto a los remedios, su formulación surge del hecho de que los fallos son el resultado de una falta de adecuación entre las características de las piezas y las agresiones a que han estado sometidas. Finalmente, el informe debe redactarse en un lenguaje riguroso y sencillo, teniendo en cuenta a las personas a que va dirigido. Este último punto es de capital importancia cuando ha de ser usado en demandas judiciales.

5. CONSIDERACIONES FINALES.

Las causas de un fallo pueden aparecer con claridad, en muchas ocasiones, con la información recogida en las indagaciones y la realización de algunos ensayos; pero, en otras, quedarán sumidas en una oscura combinación de circunstancias. Esto último puede ser debido a diversas razones. La más evidente es que las informaciones aportadas por los solicitantes de ayuda técnica son incompletas, parciales, a veces, e inverificables. Según datos estadísticos recogidos por compañías de seguros [4], aproximadamente un 18% de los fallos, del pasado, han quedado sin una explicación clara. En contra de una opinión muy extendida, los fallos debidos a defectos del material suponen sólo un 8 o un 9%, porcentaje que es muy bajo en relación a los originados por defectos de fabricación y montaje (30%) y, especialmente, a los ocurridos en servicio, incluidos

los ocasionados por mantenimiento deficiente (43%), que constituye la etapa de vida de los componentes más propensa al deterioro.

La complejidad, y el consiguiente carácter pluridisciplinar, de la diagnosis de fallos exige que el analista tenga una amplia formación, principalmente, en Metalurgia, Química e Ingeniería Mecánica. El especialista en este campo debe, además, tener a su disposición -y saber interpretar- una diversidad de técnicas instrumentales de ensayos. Al enfrentarse con la formulación de las causas de un fallo, el investigador acudirá, en primer lugar, a sus propios conocimientos y experiencia anterior, pero, a veces, habrá de consultar con la bibliografía, dada la diversidad de problemas que se pueden presentar.

Finalmente, cualidades tan difusas como "tener buen ojo clínico", referida a los médicos, o "intuición policial" o "buen olfato", en relación a los detectives, se pueden aplicar, por extensión, a los analistas de fallos, quienes, además, han de poseer buenas dotes de comunicación, ya que han de redactar informes en lenguaje claro, riguroso y sencillo, al mismo tiempo.

REFERENCIAS .

- [1]. Schadensanalyse, VDI - Richtlinie 3822. Verein Deutscher Ingenieure, VDI - Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf. (Comercializada por Beuth Verlag, Berlín).
- [2]. Broichhausen, J, Schadenskunde, C. Hanser Verlag, München (1985).
- [3]. Jones, D.R.H., Engineering Materials 3 (Materials Failure Analysis), Pergamon Press, Oxford (1993).
- [4]. Schmitt-Thomas, K-h. G., Integrierte Schadenanalyse, Springer Verlag, Berlin (1999).
- [5]. Wulpi, D-J., AUnderstanding How Components Fail®, Second Edition, ASM International, Materials Park, OH (2001).
- [6]. ASM Handbook Vol. 11 (Failure Analysis and Prevention), ASM International, Materials Park, OH (2002).
- [7]. Dobson, W.G., Dillof, N.J. and Gatslick, H.B., AForensic engineering: a case study®, Metal Progress, August, 61-68 (1989).