Foto: Donal Bartkowlak

Foto: http://corrosion.ksc.nasa.gov

Análisis de Falla:

Un Viaje a la Raíz del Problema y la Solución

María Cristina Rojas Cruz
Periodista Metal Actual

El análisis de falla debe ser una práctica continua e integral de los sistemas de calidad de las empresas.

La falla de un equipo puede traer graves consecuencias económicas, y en ocasiones la pérdida de vidas humanas, de allí que su análisis sea un complejo "sistema forense" que revela las causas del problema, ofrece bases para aplicar soluciones y puede generar incluso, nuevas alternativas para lograr producciones o componentes más eficientes.

Tal y como sucede en la escena de un crimen, el análisis de falla de un equipo o elemento está diseñado para que, a través de él, se pueda examinar cuidadosamente la pieza o sección que falló, su diseño, su fabricación y su historia de operación y encontrar las razones del cómo y por qué falló.

En este sentido, las razones para adelantar este proceso pueden ser muchas: prevenir futuros eventos de falla, garantizar seguridad, funcionamiento y uso eficiente de los componentes o máquinas a lo largo de su vida, descubrir defectos en el procesamiento de un material o componente, incluso desde su diseño y en la fase de fabricación, o corregir y prevenir futuros episodios que se convierten en pérdidas económicas invaluables.

La importancia del análisis de falla radica entonces en que funciona como una herramienta para disminuir los costos de mantenimiento, incrementar la disponibilidad del

sistema o equipo, reducir los casos de lucro cesante, apoyar el cumplimiento de las metas de producción, aminorar las probabilidades de pérdidas tanto financieras como humanas y, en algunos casos, hasta impulsar el desarrollo de avances técnicos o tecnológicos importantes para distintos segmentos de la industria.

Dado su amplio campo de acción, puede realizarse sobre grandes estructuras o piezas mecánicas inoperables (un puente que cae o un eje que se rompe), sobre componentes que operan pero no cumplen la función para la cual fueron creados (rodamiento con picaduras) y en piezas cuyo alto grado de deterioro hacen inseguro su uso (una caldera de 150 pci con una fisura que, al explotar, puede tener mayor efecto devastador que el de un carrobomba).

Específicamente, en el campo de las máquinas, y aunque a la gran mayoría se le estima una vida útil que puede ir desde un mes hasta 20 años, su fallo anticipado es una razón suficiente para considerar un análisis forense que se realiza siguiendo unos pasos escalonados hacia la causa real del problema, permitiendo fijar correctivos para evitar nuevos casos problema y que tiene tres objetivos primarios según la práctica que se adelante.

Así, para determinar el *mecanismo de la falla*, se examina la evidencia objetiva que presenta el componente fallado y que puede tener como causas: fatiga, corrosión, oxidación, entre otros; para *determinar la causa o la raíz de la falla*, se aplican exámenes espaciales al diseño y a los aspectos operacionales y; para *generar acciones correctivas*, se reúnen y avalúan todas las pruebas compiladas.

¿Por qué se Presentan las Fallas?

Las fallas que pueden presentar un equipo, componente o pieza y sus causas, están generalmente ligadas a varios aspectos, entre ellos:

- *Diseño Inadecuado*: "Un caso típico se presentó en los años 50 con los jets comerciales, cuyo diseño incluyó ventanas rectangulares que generaron una concentración de esfuerzos y con la fricción del viento, sufrieron la aparición de pequeñas grietas que luego alcanzaron un tamaño crítico y produjeron la explosión de las naves en pleno vuelo", cuenta el ingeniero Wilson Hormaza de la Universidad de los Andes.

  Se entiende entonces que el diseño es parte importante a la hora de evaluar la aparición de una falla, por lo que es necesario tener en cuenta las condiciones a las cuales ha estado expuesta la pieza durante su funcionamiento tales como el medio ambiente, tipo y magnitud de la carga, temperatura de operación y vida útil, entre otras.

- *Material Inadecuado y/o defectuoso*, afectado por segregación, contenido excesivo de inclusiones, porosidades y cavidades de contracciones. Un ejemplo claro fueron las fallas en las uniones de las alas al fuselaje, de los aviones de combate F-111 de la Fuerza Aérea Americana; el material era extremadamente frágil para la unión lo que desencadenó numerosas catástrofes aéreas en los años 70.

  Frente a las deficiencias de material cabe anotar que se pueden distinguir tres categorías: la selección de un material inadecuado, la sustitución deliberada o accidental de un material y la presencia de un material defectuoso.

- *Nuevo material no probado:* se refiere a materiales, sobre todo compuestos, de los cuales no se tiene el suficiente historial de su comportamiento y se utilizan en aplicaciones críticas. Por ejemplo, cuando en un avión se usa un material especial sin saber cómo reaccionará frente a un caso específico de presurización.

- *Negligencia:* Ocurre por lo general, cuando no se respetan las condiciones de operación de un equipo o pieza y se sobre-utilizan, cuando no se cumple con los mantenimientos adecuados o desactivan los sistemas de seguridad. "Eso lo descubrimos en una empresa con una caldera a la que unos operarios le realizaron un mantenimiento, desconectaron

Fractura frágil en cremallera y caja de dirección vehicular.

Fatiga superficial en riel de ferrocarril.

Desgaste adhesivo en buje con caucho natural.

Corrosión en tubería de intercambiador de calor.

Agrietamiento por Creep.

Fotos:Grupo AFIS – Universidad Nacional de Colombia.

todos los sistemas de seguridad y la pusieron a funcionar; consecuencia, explotó", comenta el ingeniero de la Universidad de los Andes.

- *Tratamiento térmico (TT) defectuoso:* "Los TT deficientes pueden generar micro-grietas en los componentes después del tratamiento o al poco tiempo de servicio" [1] El caso de las alas de fuselaje de los aviones F-111, antes mencionado, es un buen ejemplo ya que en la investigación de la falla se concluyó que el proceso de TT del acero de alta resistencia D6 AC produjo una microestructura heterogénea en la pieza de la unión.
- *Manufactura defectuosa*: en las piezas pueden presentarse surcos de mecanizado, sobre todo en zonas de esfuerzo que conllevan a la ruptura de los componentes y acortan su vida útil.
- *Montaje defectuoso:* este caso puede provenir tanto de errores del ensamble original de una máquina, después de los procesos de mantenimiento de la misma, y/o en el ensamble después de realizado el mantenimiento. Se da un desalineamiento de las partes móviles y montajes ambiguos o incompletos.
- *Mecanismos de falla*: al igual que las fuentes de las fallas, éstos son factores inherentes al material que influyen en la aparición de anomalías y son elemento clave para futuras correcciones.
- *La fatiga:* en este caso, el material es sometido a esfuerzos alternados, con la presencia de fallas progresivas como grietas que se incrementan al paso del tiempo y el uso. En el caso de la fatiga por esfuerzo cíclico de contacto y que tiene por causas el desalineamiento de las superficies y una fuerza excesiva de empuje y contacto, se da rotura o desprendimiento de partículas de la superficie provocando depresiones superficiales.
- *El desgaste:* referido al daño superficial que se manifiesta con la pérdida progresiva de material ocasionada por el contacto mecánico. En el intervienen factores como la intensidad de la carga, compatibilidad, dureza del material, lubricación, tiempo de operación y puede ser abrasivo, con la pérdida progresiva de material superficial y adhesivo con deformación superficial.
- *La corrosión*: deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. El ambiente, el oxígeno, las ferrobacterias, entre otros, son factores incidentes que originan este fenómeno.
- *El creep o termofluencia*: es una deformación dependiente del tiempo y de carácter permanente, a alta temperatura que se presenta con carga constante o con esfuerzo constante [2].

La Ruta del Análisis de Falla

Son distintos los sectores productivos, tecnológicos y técnicos que recurren frecuentemente a practicar análisis

de falla, entre ellos la industria aeronáutica, médica y militar en las que los costos materiales y humanos de los olvidos, procedimientos errados, fallas de diseño y demás, son funestos para quienes los cometen.

Considerando sus aportes –para la ingeniería mecánica– el análisis de falla es una de las herramientas más importantes y uno de los procesos más especializados y complejos del área, debido a que para determinar una causa probable de falla en una evaluación, son numerosos los factores a estimar y que, por lo general, se analizan separadamente, siguiendo un orden minucioso para obtener diagnóstico, conclusiones y recomendaciones finales.

Las siguientes, son las etapas para adelantar un proceso de 'análisis forense'.

- *Evidencia Documental*: Es, tal vez, una de las etapas más sensibles del proceso dado que el componente que falla es concebido, diseñado y fabricado en un tiempo anterior a la falla, por lo que se debe recopilar y contar con el historial del mismo:

o *Certificados de pruebas realizadas*. El ingeniero Hormaza afirma que la industria nacional poco se preocupa por este aspecto, cosa que si hacen las multinacionales dado que la gran mayoría llevan un historial de fabricación, de las prueba y del control de calidad de sus productos e insumos. "Recuerdo el caso de una empresa local que compró unos pernos. El proveedor le aseguró que estaban fabricados de un material X, pero fallaron. Luego, cuando se realizaron los análisis se encontró que el material no era el especificado por el proveedor. Confiaron sin un soporte".

La industria debe exigir un certificado de composición química y propiedades mecánicas de los productos que adquiere y que le permita reclamar incluso, frente a instancias legales por daños y perjuicios".

o *Datos de ensayos mecánicos:* tales como pruebas de dureza, tensión, flexión o fatiga.

o *Planos*: Como regla, el fabricante debe proveerlos, pero la industria no los exige, lo que muchas veces estimula que los proveedores no cumplan las especificaciones y las dimensiones de los productos que ofrecen.

o *Garantías:* Tanto de materiales como de equipos.

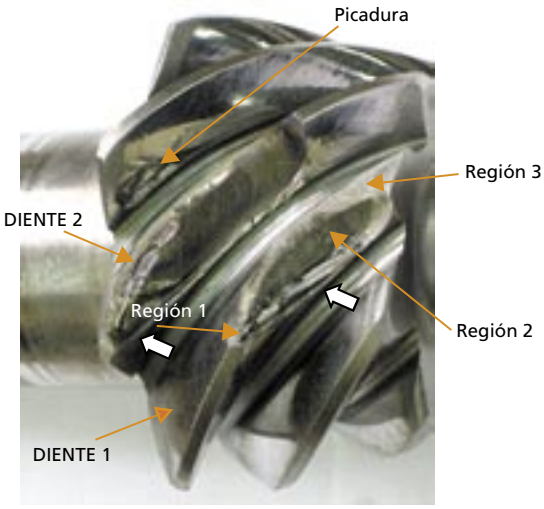
o *Fotografía:* medio económico y muy útil en el análisis. Se deben tomar fotografías del sistema completo en el sitio, del componente antes y después de ser removido, de sus partes, vistas cercanas del área de falla del componente, de otros componentes que puedan mostrar daños relacionados con la falla; preferiblemente a color y desde todos los ángulos posibles.

"Lo ideal es que el registro fotográfico sea levantado por dos personas para obtener perspectivas complementarias. Todo es válido y entre más fotografías se tomen, mayores serán las pistas para el trabajo y el desarrollo del análisis", explica el ingeniero Hormaza.

Esta fase es clave en el proceso citado pues el experto en análisis se solicita cuando ya ha ocurrido la falla, cuando se han removido las piezas, se han manipulado, unido, friccionado o dejado a la intemperie, lo que desvía la investigación, retraza y genera costos adicionales en las pruebas. De allí que, igual como sucede en un caso de asesinato, ante una falla no se altere la evidencia.

- *Condiciones de servicio*: en esta fase se recopila información sobre la operación actual del equipo o componente: niveles de temperatura, presión, velocidad de operación, datos de mantenimiento, condiciones ambientales, humedad, etc.

- *Entrevistas*: el testimonio de las personas es vital en el proceso ya que da pistas concretas para encontrar el mecanismo de falla. Sin embargo, se ha demostrado que los individuos tienen emociones negativas al examinar sus propios errores y en esta instancia,



Fotos: Cortesía Wilson Hormaza – UniAndes.

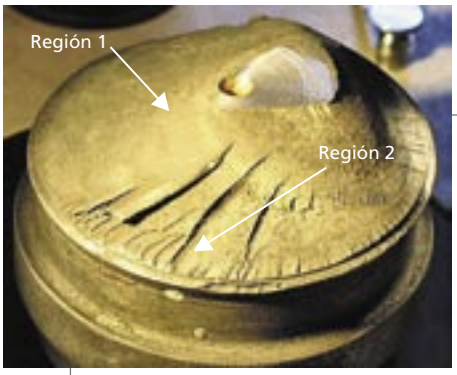
Vista general de la superficie dañada de los dientes 1 y 2. Se observa que la cara de trabajo de los dientes, indicada por la flecha blanca, sufre mayor carga y es una zona candidata para el inicio de la falla. En detalle, Vista de la región 3 de la superficie de fractura del diente 1, distinguiéndose marcas de playa y la región de arrancamiento.

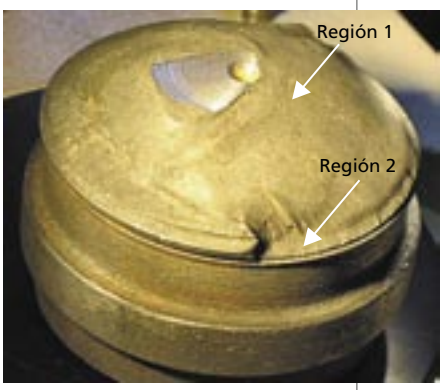
la sinceridad será esencial para no desviar responsabilidades, negándolas o atribuyéndolas a otros sistemas.

- *Selección de muestras*: durante la remoción de un componente que falló se debe procurar no ocasionar otros daños, por ejemplo, si se requiere cortar una pieza, usar un método que no cambie las características del área de falla o simplemente, no tocar la superficie de la fractura con los dedos.
- *Preservación de muestras*: la parte afectada debe conservarse intacta para analizarla en conjunto con los residuos existentes (óxido, polvo, etc.) que pueden ser relevantes en el análisis y causa de la falla. Sin embargo, estas sustancias pueden dificultar el trabajo de análisis por lo que la "limpieza" debe realizarla un especialista, utilizando pruebas y sustancia especiales según el caso –thinner y acetona u otros solventes–, hasta que la pieza o componente revele su brillo original
- *Ensayos no destructivos*: son herramientas auxiliares para determinar la causa de falla de un componente, haciendo posible verificar la correspondencia entre las posibles discontinuidades (y/o defectos) y la falla ocurrida. Entre ellas están las inspecciones con tintas penetrantes, las partículas magnéticas, el ultrasonido y la radiografía o gammagrafía.
- *Ensayos mecánicos*: son útiles en la medición del servicio y el tipo de material y se adelantan utilizando probetas para ensayo de tensión, compresión, flexión o impacto con el mismo material que presentó falla.
- *Análisis macroscópico* (fractográfico en la superficie de fractura): es un análisis visual en el que se emplea un estereoscopio para determinar cambios en la coloración o textura asociados con oxidación, contaminantes (amoniaco o ácidos) o productos de corrosión y revela características superficiales en la falla, que dan patrones de dirección de propagación y origen de la fractura como la marca de playa, marcas de sargento y labios de cizallamiento, entre otras [3].
- *Análisis microscópico de la estructura*: realizado con microscopios ópticos o electrónicos de barrido (SEM) –mucho más potentes que los estereoscopios– que ofrecen una resolución hasta de un millón de aumentos y una mayor profundidad.
- *Análisis de composición química*: el material o parte que falló se analiza para verificar si cumple con las especificaciones; eventualmente se analizan también los residuos de corrosión para identificar los agentes agresores o contaminantes.
- *Conclusiones*: los resultados obtenidos en las etapas anteriores se sintetizan y relacionan en las conclusiones. A partir de las evidencias y pruebas se elabora un informe que, en términos generales, contiene: descripción del componente que falló, historial de servicio, historial de fabricación, resultados de análisis metalúrgicos y mecánicos, determinación de los mecanismos y causas de la falla y, recomendaciones para evitar una nueva ocurrencia de falla.

Microestructura ferritico-perlítica de un acero de baja aleación, donde se tiene un fase ferrita (región clara) y una perlita (región oscura) uniformemente distribuidas y con tamaño de grano no uniforme. De izquierda a derecha, micrografía de la sección transversal de la varilla corrugada a 500X y a 1000X.

Fotos: Cortesía Wilson Hormaza – UniAndes.





A la izquierda, vista general de la superficie de fractura de un perno, a la derecha, vista posterior de la misma pieza fracturada.

Fotos: Cortesía Wilson Hormaza – UniAndes.

Aunque los análisis de falla son una herramienta vital para la corrección y prevención en los procesos industriales, se debe considerar que en ellos se manejan probabilidades y que las fallas pueden no tener un origen único, sino la unión de varios.

Colombia, a la Vanguardia en la Materia

La empresa colombiana puede confiar en los avances y los servicios que se ofrecen en nuestro país con respecto al análisis de falla, dado que los laboratorios encargados de las pruebas cuentan hoy con alta tecnología, representada en equipos como microscopios electrónicos de barrido y transmisión, software de análisis de imagen, difractómetros de rayos X, entre otros.

La academia lleva la delantera no sólo porque posee la tecnología necesaria para hacerlo, sino por su interés permanente en la investigación y la actualización, explorando y apropiando desarrollos logrados en el extranjero para hacer su servicio exitoso y hoy, reconocido en Centro y Suramérica América.

Tal vez por el buen nivel citado de los centros que prestan estos servicios y porque indiscutiblemente los empresarios nacionales han ampliado su forma de concebir y manejar sus procesos, han empezado también, poco a poco, a dar pasos hacia el análisis sistemático de falla.

"Antes, si una pieza fallaba simplemente se cambiaba y listo, no se indagaba por nada más; pero con el correr del tiempo la industria se han preguntado el porqué de las fallas, de su recurrencia, el costo que implican y sobre todo, han descubierto la comodidad de hacer la evaluación en su país sin tener que viajar al exterior", comenta el ingeniero Wilson Hormaza.

Entre las universidades más prestigiosas del país, que cuentan con la tecnología adecuada para adelantar un análisis de falla se destacan la Universidad de los Andes y la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, la Universidad del Norte en Barranquilla, la Universidad Industrial de Santander - UIS y la Universidad de Manizales.

En general, los costos estimados para las pruebas que fijan estos centros de formación están dados más por sus tiempos de realización que por el tipo de análisis. "Los casos cortos son más económicos que los complejos porque implican más ensayos y tiempo de investigación". El ingeniero Hormaza explica que la tabla de pruebas es estándar –entre dos y ocho millones de pesos–; y en cualquier caso se cotizan las pruebas, los tiempos de los técnicos que preparan las muestras, el tiempo de análisis propio de la coordinación y se hacen las mediciones.

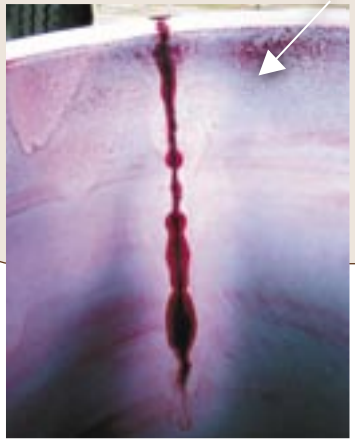
Otra gama de oferta la concentran las empresas privadas que prestan servicios básicos de pruebas relacionadas con este campo, pero que para realizar un análisis de falla como tal subcontratan universidades.

Prevención: Una Medida Libre de Fallas

La prevención en la industria ha sido un tema sensible para los empresarios de vieja y nueva data, un tema dispendioso en el que los costos y lucro cesante ocasionado por fallas ha sido tal vez el factor determinante para que se cambie a una cultura de la prevención.

Prevenir está ligado a factores tan importantes como la revisión periódica de los aparatos y maquinaria, la capacitación constante de los operarios, la inspección detallada del mantenimiento y la certificación de los procesos; y todos contribuyen a que se eviten en alto grado, los casos de falla que presenta la industria y que reducen notablemente sus utilidades y su desarrollo.

Vista general de una grieta en el interior de una camisa de un motor diesel. En el gráfico de detalle, se observa la presencia de cavidades (puntos rojos) en la superficie.



Fotos: Cortesía Wilson Hormaza – UniAndes.

"Son pocas las empresas que tienen sentido de prevención. Unas por filosofía y otro porcentaje muy pequeño por recursos económicos. La recomendación sería que adelantaran sus investigaciones en sus instalaciones, pero esto requiere una infraestructura y una serie de recursos especiales como un microscopio óptico que está por el orden de los US$ 10.000".

Ante los altos costos de las inversiones, que sin duda muchas empresas medianas y pequeñas no están en capacidad de cubrir, el servicio ofrecido por las universidades se convierte en una alternativa viable, segura y económica, comenta el especialista de Análisis de Falla de la Universidad de los Andes.

Pero prevenir siempre será más económico que afrontar las consecuencias de una falla, los tiempos muertos y la improductividad del recurso humano; aunque adelantar un análisis sistemático de fallas le ofrezca a la empresa, después de efectuado, la posibilidad de alcanzar en menor tiempo, un grado cero de accidentes, fallas y defectos [4].

La industria debe evolucionar de realizar análisis de falla para encontrar meramente la raíz de un problema, tomar el procedimiento como una simple especialización de la ingeniería mecánica o realizarlo solo por atender las consideraciones legales de los aseguradores y obtener así el desembolso de las indemnizaciones, a una práctica duradera. "Si queremos alcanzar un alto nivel de competitividad interna y externa, el análisis de falla debe ser una práctica continua e integral de los sistemas de calidad de nuestras empresas" [5].

Con la tecnología de avanzada para esta materia existente en el país y que está a la vanguardia tecnológica frente al desarrollo mundial, el análisis de falla se convierte entonces en uno de los campos que mayores aportes puede brindar a la industria nacional, pero que debe estar acompañado por un cambio de mentalidad empresarial para ser bien aprovechada.

Fuentes:

- **Wilson Hormaza**. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. **whormaza@uniandes.edu.co.**

- **Juan Carlos Martínez Romero**. Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia. Asistente de investigación. Grupo AFIS (Análisis de Falla Integridad y Superficies).

Bibliografía:

1. Análisis de Falla. Universidad Metropolitana. Cursos

2. Análisis Forense de Partes Falladas. Artículo adaptado de "Guidelines for Forensic Análisis of Failed Parts" de Gas Michinery Resource Council por Gerardo Vargas C.

3. Análisis de Falla. Wilson Hormaza. Universidad de los Andes

4. Ensayos y precios. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Mecánica. Centro de investigación en propiedades mecánicas y estructura de materiales – CIPEM

5. La difícil tarea de Analizar Fallas. Equipo de Consultores InfoSol. México 2005

6. http://www.confiabilidad.net/art_05/RCM/rcm_16.pdf

Citas:

1) Análisis de Falla. Universidad Metropolitana. Cursos Pág. 76.

2) Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Donald R. Askeland – Pradeep P. Phule. 4a. Edición. Editorial Thompson.

3) Cada agente se manifiesta en la superficie afectada dejando rastros característicos propios; en el caso del agua (corrosivo), provoca puntos o salpicaduras en el material; otras manifestaciones de daño son la marca de playa que se revela con señales semejantes a la figuras que dejan las olas en la arena, las marcas de sargento, similares a emblemas militares y los labios de cizallamiento –frecuente en materiales dúctiles– en los que la estructura se deforma.

4) Análisis de Falla. Universidad Metropolitana. Cursos Pág. 73.

5) Mecánica de Fractura y Análisis de falla. Héctor Hernández Albañil – Edgar Espejo Mora. Universidad Nacional de Colombia. Colección Sede. Pág. 267.