



# Análisis de falla

## Conceptos y contextos en estudios de casos

---

Héctor Alfonso Castelblanco G.



# Análisis de falla

## Conceptos y contextos en estudios de casos

---

Héctor Alfonso Castelblanco G.





**Comité editorial de producción  
educativa digital**

Jaime Quiceno G.  
Ricardo Pachón V.  
Fanny C. Velasco L.  
Wilson Ramírez L.  
Héctor Sanabria R.  
Jorge Federico Vargas P.  
Juan Carlos Lozano

**Rector**

Rafael Santos Calderón

**Vicerrector académico**

Óscar Leonardo Herrera Sandoval

**Vicerrector administrativo y financiero**

Nelson Gnecco Iglesias

Esta es una publicación del Departamento de Ingeniería Mecánica  
de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Adolfo Naranjo Parra  
*Decano*

Pedro William Pérez Orozco  
*Director del Departamento de Ingeniería Mecánica*

ISBN (eBook): 978-958-26-0405-9  
Primera edición: 2018

© Autor: Héctor Alfonso Castelblanco G.  
© Ediciones Universidad Central  
Calle 21 n.º 5-84 (4.º piso). Bogotá, D. C., Colombia  
PBX: 323 98 68, ext. 1556  
editorial@ucentral.edu.co

---

**Catalogación en la Publicación Universidad Central**

Castelblanco G., Héctor Alfonso

Análisis de falla: Conceptos y contextos en estudios de casos /  
Héctor Alfonso Castelblanco G. ; dirección editorial Héctor Sanabria Rivera.

--Bogotá : Ediciones Universidad Central, 2018.

114 páginas : ilustraciones, fotografías a color ; 25 cm

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN: 978-958-26-0405-9

1. Materiales – Propiedades mecánicas – Manuales
2. Resistencia de materiales – Manuales
3. Mecánica de fractura – Manuales
3. Ensayos (Tecnología)

I. Sanabria Rivera, Héctor, director editorial II. Universidad Central. Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas. Departamento de Ingeniería Mecánica

620.112 – dc23

PTBUC / 06-09-2018

---

**Preparación editorial  
Coordinación Editorial**

Dirección: Héctor Sanabria Rivera  
Coordinación: Jorge Enrique Beltrán  
Diseño y diagramación: Patricia Salinas Garzón  
Corrección de textos: Linda Carolina Rodríguez

Impreso en Colombia - *Printed in Colombia*

Prohibida la reproducción o transformación total o parcial de este material por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

<b>Resumen</b> .....	<b>9</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>Trayecto 1</b>	
1.1. ¿Qué es una falla y por qué estudiarla? .....	14
1.1.1. Falla en tanqueros.....	15
1.1.2. Falla en transbordador espacial Challenger .....	16
1.1.3. Falla en reactores nucleares .....	17
1.1.4. Falla en puente de Tacoma .....	18
1.2. Fuentes de falla de componentes mecánicos en general .....	20
1.2.1. Deficiencia de diseño .....	20
1.2.2. Deficiencia de material .....	21
1.2.3. Deficiencia de fabricación.....	22
1.2.4. Deficiencia de montaje .....	23
1.2.5. Deficiencia de operación.....	24
1.2.6. Deficiencia en el mantenimiento.....	24
1.2.7. Deficiencias en transporte .....	25
1.3. ¿Qué son los modos y mecanismos en una falla?.....	25
1.4. Estudio de caso.....	28
1.4.1. ¿Qué es un estudio de caso?.....	28
1.4.2. Caso colapso de estructura metálica .....	29
1.4.3. Descripción general del evento .....	30
1.4.4. Desarrollo del caso de estudio .....	31
1.4.5. Conclusiones del trayecto .....	35

## Trayecto 2

2.1. Diagrama de flujo del trayecto.....	36
2.2. Modo de falla por fractura.....	37
2.2.1. Marcas de Ratchet .....	38
2.2.2. Marcas radiales y de río .....	39
2.2.3. Marcas de playa o de costilla .....	39
2.2.4. Marcas Wallner .....	39
2.2.5. Estriaciones .....	40
2.3. Desgaste .....	41
2.3.1. Desgaste adhesivo .....	42
2.3.2. Desgaste abrasivo .....	44
2.3.3. Desgaste por fatiga superficial .....	44
2.3.4. Desgaste por cavitación .....	45
2.4. Corrosión.....	46
2.5. Modo de falla por deformación.....	47
2.6. La mecánica de la fractura.....	48
2.7. Fractura desde la perspectiva de la mecánica de la fractura ..	53
2.7.1. Fractura frágil .....	55
2.7.2. Fractura dúctil .....	55
2.8. ¿Por qué estudiar las grietas? .....	56
2.8.1. Fractura lineal elástica .....	57
2.8.2. Fractura elastoplástica .....	57
2.8.3. Fractura de colapso plástico .....	58
2.9. Aportes de la mecánica de la fractura al análisis de falla.....	60
2.10. Propagación de grietas .....	60
2.11. Comportamiento de los materiales metálicos en fractura .....	64
2.11.1. Fractura por clivaje .....	64
2.11.2. Agrietamiento dúctil .....	65
2.11.3. Agrietamiento intergranular .....	66
2.13. Conclusiones del trayecto .....	68

### Trayecto 3

3.1. ¿Cómo evaluar una falla? .....	69
3.2. Ensayos no destructivos .....	70
3.2.1. Definición y reglamentación .....	70
3.2.2. NTC-3777. Guía para la realización del ensayo radiográfico .....	71
3.2.3. NTC-4179. Ensayos no destructivos de revestimientos por oxidación anódica sobre aluminio puro y aleaciones de aluminio, por medición de la admitancia .....	71
3.2.4. NTC-2034. Ensayos no destructivos. Calificación y certificación de personal .....	72
3.2.5. NTC-2120. Soldadura. Guía para la inspección de soldadura mediante ensayos no destructivos .....	72
3.3. Tipos de ensayos no destructivos (NDT) .....	73
3.3.1. Inspección visual .....	73
3.3.2. Líquidos penetrantes .....	74
3.3.3. Partículas magnéticas .....	75
3.3.4. Ultrasonido .....	76
3.3.5. Corrientes de Eddy .....	77
3.3.6. Rayos X .....	77
3.3.7. Termografía .....	78
3.4. Ensayos destructivos .....	79
3.4.1. Ensayo de tensión .....	80
3.4.2. Ensayo de compresión .....	81
3.4.3. Ensayo de dureza .....	82
3.4.4. Ensayo de fatiga .....	83
3.4.5. Ensayo metalográfico .....	84
3.4.6. Ensayo de fractura .....	85
3.5. Aportes al caso de estudio .....	85
3.5.1. Ensayo de composición química .....	86
3.5.2. Ensayo de tensión .....	87
3.5.3. Ensayo de compresión sobre perfil armado .....	89
3.5.4. Conclusiones al caso de estudio .....	89
3.5.5. Conclusiones del trayecto .....	89

## Trayecto 4

4.1. Metodologías en el análisis de fallas .....	92
4.1.1. Análisis del mecanismo de falla .....	93
4.1.2. Recopilación de información.....	93
4.1.3. Determinación de los modos de falla presentes .....	94
4.1.4. Levantamiento metrológico .....	95
4.1.5. Ensayos no destructivos .....	95
4.1.6. Ensayos destructivos .....	96
4.2. Validación de materiales y procesos de manufactura .....	96
4.2.1. Determinación de los mecanismos de falla .....	96
4.2.2. Elaboración de informe.....	97
4.3. Análisis de causa raíz.....	98
4.3.1. Determinación de los modos de falla humanos u organizacionales .....	99
4.3.2. Verificación de ejecución de procedimientos.....	99
4.3.3. Determinación del mecanismo de falla humano u organizacional .....	99
4.3.4. Elaboración de informe.....	99
4.4. Herramientas para mostrar los resultados de análisis de falla de forma gráfica .....	100
4.4.1. Diagrama de árbol .....	100
4.4.2. Análisis de eventos y factores casuales .....	101
4.4.3. Diagrama de espina de pescado.....	102
4.5. Análisis del caso de estudio .....	103
4.5.1. Recopilación de antecedentes y determinación de modos de falla .....	104
<b>Conclusiones .....</b>	<b>109</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>111</b>

Este módulo tiene como finalidad entregar a los lectores las herramientas básicas para la verificación, diagnóstico, seguimiento y control de una falla de un componente mecánico. Con el fin de establecer un orden específico para los conceptos, está dividido en cuatro capítulos, que llevan al lector a indagar desde el punto de vista teórico las fuentes y mecanismos de una falla, la evaluación de esta, las técnicas para examinarla y una metodología de seguimiento y control. El objetivo de este módulo es apropiarse de los conceptos de la mecánica clásica y comprender el comportamiento de los materiales desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, con el fin de fortalecer conceptos específicos y comprender el comportamiento de una falla en una pieza. En este sentido, los conceptos, teorías y metodologías descritas en el presente documento pretenden generar una secuencia lógica para la determinación de la causa de falla en un componente o equipo. Como apoyo general al módulo, el lector cuenta con un estudio de caso que se desarrolla durante los diferentes capítulos; dicho caso tiene por finalidad contextualizar los conceptos abordados en cada instancia.

#### Palabras clave

Modos de falla, mecanismos de falla, mecánica de la fractura, ensayos destructivos, ensayos no destructivos, metodologías, causa raíz, propagación de grietas.

### Cómo citar este módulo

APA: Castelblanco, H. A. (2018). *Análisis de falla*. Bogotá, Colombia: Ediciones Universidad Central.

MLA: Castelblanco, Héctor Alfonso. *Análisis de falla*. Bogotá, Colombia: Ediciones Universidad Central, 2018. Impreso.

CHICAGO PARENTÉTICO: Castelblanco, Héctor Alfonso. 2018. *Análisis de falla*. Bogotá, Colombia: Ediciones Universidad Central.

Este módulo tiene como finalidad entregarles a los lectores las herramientas básicas para la verificación, diagnóstico, seguimiento y control de una falla de un componente mecánico. Con el fin de establecer un orden específico a los conceptos, el módulo está dividido en cuatro trayectos, los cuales se asocian a una pregunta clave para cada trayecto. El primer trayecto responde a la pregunta ¿por qué estudiar una falla?, el segundo trayecto responde a la pregunta ¿por qué estudiar las grietas?, el tercero estudia cómo evaluar una falla y, por último, se responde a la pregunta ¿por qué hacer un análisis de falla? Cada trayecto lleva al lector a profundizar conceptualmente en lo que implica el análisis de falla, la evaluación de una falla, pasando por las técnicas que puede usar para examinarlas y finalizando con una metodología para el seguimiento y control.

El estudiante tendrá como objetivo inicial recordar conceptos de la mecánica clásica y comprender el comportamiento de los materiales desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, con el fin de fortalecer conceptos específicos y entender el comportamiento de una pieza a la falla. A su vez, podrá realizar un trabajo colaborativo con un estudio de caso que se desarrollará con el avance del módulo. Todos los conceptos, teorías y metodologías mostradas en el presente documento pretenden generar una secuencia lógica para la determinación de la causa de falla de un componente o equipo (figura 1).

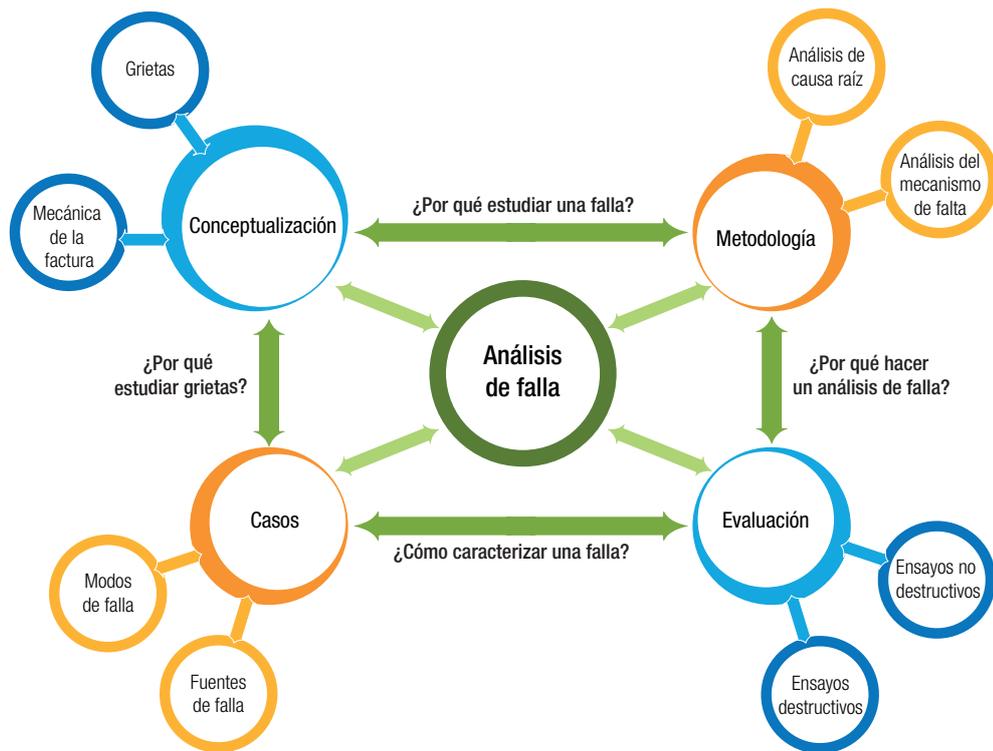


Figura 1. Esquema general de las preguntas que responde el módulo.  
Fuente: elaboración propia.

# Trayecto 1

En este trayecto se abordan casos de fallas mecánicas que marcaron la historia y que fueron una referencia en el estudio del análisis de falla, los cuales permitieron generar puntos de partida para reglamentaciones y normas que en la actualidad son vigentes. Como conceptos generales, se encontrará la relación entre falla, modo de falla y mecanismo de falla, con el fin de contextualizar términos generales de la mecánica de la fractura y el análisis de falla. Igualmente, se conocerá un caso real de falla que se empezará a desarrollar con los conceptos tratados en el trayecto. La relación entre los conceptos a tratar se muestra en la figura 2.

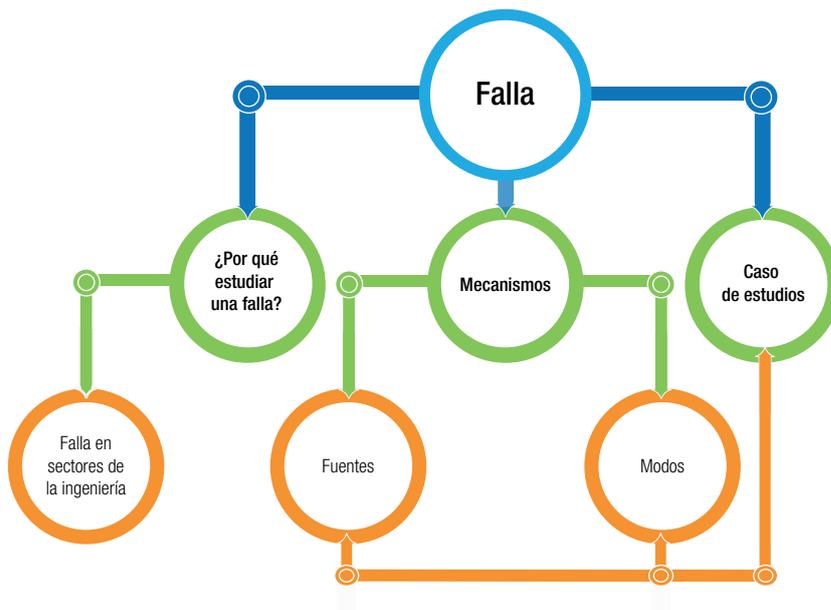


Figura 2. Conceptos asociados al trayecto 1.  
Fuente: elaboración propia.

## 1.1. ¿Qué es una falla y por qué estudiarla?

Desde la ingeniería, en cualquiera de sus ramos de diseño, se prevén casos de vida útil de los productos desarrollados en los cuales se abarcan la mayor cantidad de variables que pueden afectar al elemento diseñado, las incertidumbres asociadas a los diseños, las aplicaciones y su uso final. De esta manera, las fallas que se presentan son un nicho de estudio, el cual tiene un contexto amplio y extendido a todos y cada uno de los estados del diseño y la interacción con los usuarios, entornos y variables. Entender, analizar, evaluar y encontrar las raíces de estos inconvenientes competen al análisis de falla.

Por tanto, la falla se considera una condición no deseada, que no permite a un elemento estructural, componente o parte de un equipo, cumplir la función para la cual fue diseñada. No siempre una falla genera un colapso o catástrofe. Existen diferentes categorías para considerar la falla en un contexto general, asociado al grado de operatividad de la máquina o componente, como se indica a continuación:

Cuando el componente es operable pero no puede desempeñar la función para la cual fue diseñado. Por ejemplo, se realiza un diagnóstico a un cigüeñal y se determina que está fuera de tolerancias debido al desgaste en las zonas de contacto con los casquetes. Esta condición permite operar la máquina, pero no se puede llevar a su máxima capacidad de carga porque su eficiencia es inferior.

Cuando el deterioro del componente o máquina hace inseguro su uso u operación. Un ejemplo de esto es el desgaste en un cable de ascensor en el cual se observa que unos torones se encuentran rotos.

Cuando se considera que un componente falló, se debe establecer cuál es el origen y buscar alternativas para evitar que

vuelva a suceder, al tiempo que se investigan estrategias para mitigar o realizar seguimiento a la falla.

En cuanto al interrogante de por qué se debe estudiar una falla, nos debemos remontar en la historia y debatir sobre eventos considerados catastróficos que, a su vez, tuvieron una connotación económica y social. Para dar algunas referencias se mostrará a continuación unos ejemplos destacados que permitieron realizar avances importantes en el estudio de análisis de falla. Se busca presentar al lector argumentos sólidos que permitan comprender por qué es necesario el estudio del análisis de falla a través de escenarios y aplicaciones de ingeniería diferentes.

### *1.1.1. Falla en tanqueros*

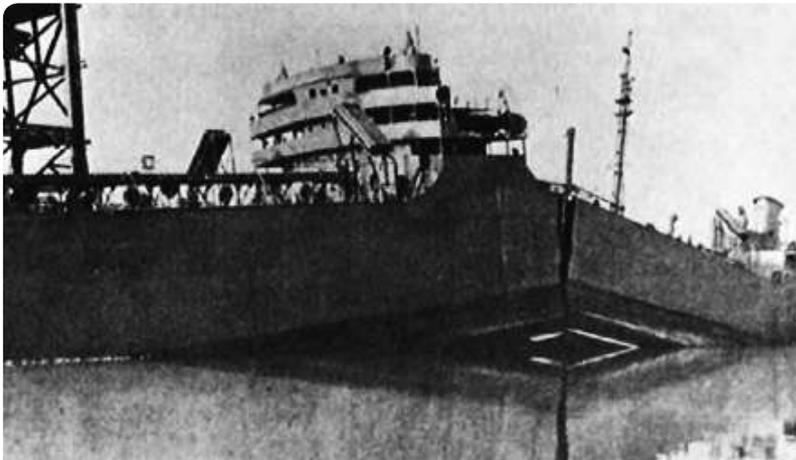


Figura 3. Rotura del petrolero Schenectady (Arana y González, 2003).

Uno de los ejemplos típicos del análisis de falla y la necesidad de conocer su causa se presentó durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se construyeron 3000 buques y 500 petroleros tipo T2 (figura 3), todos ellos soldados, lo cual era una innovación hasta ese momento, puesto que antes se hacían de forma roblonada. De todos los barcos construidos en su



época con este tipo de soldaduras, 1289 presentaron roturas importantes, 233 presentaron roturas frágiles y 12 se partieron por la mitad, como se muestra en la figura 3. Algunos barcos se rompieron en los muelles, sin ningún tipo de carga, simplemente por la acción del frío (Arana y González, 2003). Luego de realizar una investigación detallada, se determinó que la causa de falla estaba asociada a la calidad del acero y al proceso de soldadura, los cuales, para su época, no estaban estandarizados y presentaron deficiencias. Casos como el mostrado antes generaron la necesidad del estudio de estos fenómenos con el fin de dar soluciones a problemas en la industria creciente y al uso de nuevos procesos de manufactura.

### *1.1.2. Falla en transbordador espacial Challenger*

Sin duda, la catástrofe aeroespacial más recordada es la del Challenger, en la cual siete personas murieron el 28 de enero de 1986, entre ellos figuraba el primer maestro en el espacio: Christa McAuliffe. El final del Challenger sacudió la sociedad estadounidense y mundial, puesto que el suceso se transmitía en vivo y en directo para todo el mundo y marcó el comienzo de la decadencia del programa espacial tripulado estadounidense. Posterior al accidente, se realizó una investigación que involucró a la Nasa y al go-

Figura 4. Transbordador espacial Challenger (<http://bit.ly/2MDezL1>).

bierno. Durante seis meses se evaluaron condiciones de diseño, fabricación y mantenimiento. En el análisis de falla encontraron que una junta tórica que sellaba el cohete de la lanzadera se deformó por un cambio abrupto de temperatura, lo que provocó que el combustible se fugara a una zona de extrema temperatura y explotara.

### 1.1.3. Falla en reactores nucleares



17

Figura 5. Sala de control del reactor de la Central Nuclear V. I. Lenin de Chernóbil (<http://bit.ly/2LBPivk>).

La catástrofe nuclear más importante de la historia se presentó en la planta nuclear de Chernóbil (Ucrania), en 1986. Un fenómeno de estallido/fusión en el reactor principal (núcleo) causó la muerte directa de 25 personas, problemas en 18000 y 92000 fueron hospitalizadas. Otras consecuencias de la falla están asociadas a la profusión de cánceres, malforma-

ciones, contaminación de la flora y fauna de Bielorrusia desde Kiev hasta Gornel. En la actualidad, se estima que el área no será segura para la vida humana hasta dentro de 20000 años.

Como análisis de falla, en este accidente nuclear se considera que las fuentes fueron:

1. El mal diseño de la central nuclear, puesto que no disponía de un recinto de contención que le permitiera al personal aislar el núcleo en caso de emergencia.
2. Errores humanos, puesto que dejaron fuera de servicio voluntariamente varios sistemas de seguridad con el fin de realizar un nuevo experimento.
3. A su vez, la falta de entrenamiento (experticia en una disciplina específica).
4. Ausencia de una regulación estricta en el uso de este tipo de energía.
5. La competencia de las naciones del mundo por el progreso nuclear (el querer avanzar a cualquier costo).

#### 1.1.4. *Falla en puente de Tacoma*

El puente de Tacoma se usa como ejemplo de la suma de errores en el campo de la ingeniería. Los ingenieros del puente obviaron el efecto de la resonancia al pasar los vehículos sobre el puente (Billah y Scanlan, 1991) (usaron condiciones de evaluación por carga estática verticales y horizontales de viento), también obviaron lo



Figura 6. Puente de Tacoma (<https://bit.ly/2MkIOWT>).

que podía pasar con el viento como condición dinámica (esto debido a su condición de puente colgante), algo que se amplificó con la excesiva flexibilidad de los materiales utilizados (al recortar en la robustez de las vigas bajo condiciones de cargas laterales), que dejaron al puente a un tercio de la rigidez recomendada para este tipo de construcciones (que son tan dependientes del lugar en el que construyen). De hecho, por aquella época no se pensaba en que la aerodinámica también influía en estas construcciones y, desde entonces, construcciones a escala son sometidas a pruebas en túneles de viento y se añaden aberturas a los elementos de soporte para permitir el paso del viento. Aunque no se es único caso de falla en estructuras de este estilo a causa del viento, pero fue la primera que produjo la toma de conciencia de la profesión sobre los fenómenos aeroelásticos y que ha dado lugar a la tercera etapa de los puentes colgantes con importante influencia en su morfología (Manterola Armisen, 1984).

Luego de mostrar una serie de casos de falla en diferentes áreas de la ingeniería, como la naval (tanqueros), aeroespacial (tragedia del Challenger), nuclear (reactor nuclear Chernóbil) e ingeniería civil (puente Tacoma), es evidente que los errores humanos, la falta de conocimiento y los diseños inadecuados provocaron pérdidas humanas y económicas. En este punto, el análisis de falla se hizo obligatorio y la reglamentación y los controles sobre las máquinas o estructuras que las precedieron, como las mostradas, nacieron del estudio de falla particular.

Como aporte adicional, según un estudio realizado por el Departamento de Comercio en Washington, D. C., en 1978, las pérdidas por fracturas llegaron a 119 mil millones de dólares de la época, lo cual representó un 4% del producto interno bruto (*American Society for Metals & International*, 1986).

## 1.2. Fuentes de falla de componentes mecánicos en general

En este segmento del módulo se busca que el estudiante identifique las causas generales de falla de un componente, su incidencia con el funcionamiento general y la forma como se pueden corregir.

Las causas de la falla de un componente son muy diversas, sin embargo, todas están ligadas al error humano. Estas fallas se pueden reducir principalmente a siete: fallas por diseño, por selección inadecuada del material, por una fabricación defectuosa, fallas del transporte, montaje defectuoso, deficiencias de operación y mantenimiento deficientes (Dieter, 1997).

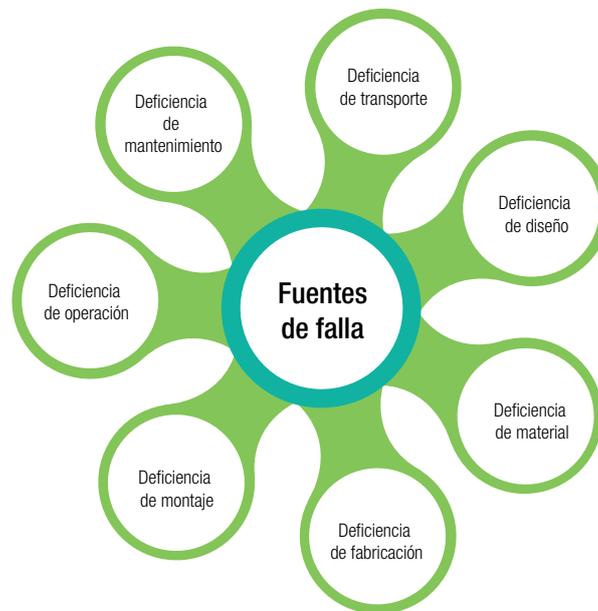


Figura 7. Tipos de fuentes de falla (Dieter, 1997).

### 1.2.1. Deficiencia de diseño

Se considera que un elemento, equipo o estructura tiene una falla de diseño cuando no es capaz de soportar las condiciones a las cuales deberá operar, ya sea por carga, temperatura, presión, entre otros (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017). Un ejemplo de esta causa de falla está en la construcción de los

primeros aviones tipo *jet* en la década de 1950, cuando no se tuvo en cuenta que, debido a la presurización y despresurización de la cabina, se podía generar en los vértices de las ventanas y láminas una alta concentración de esfuerzos, las cuales se agrietaron y fracturaron, produciendo fallas en la estructura de las naves en pleno vuelo, como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Fractura en la chapa del ala de un jet de pasajeros (Arana y González, 2003).

### *1.2.2. Deficiencia de material*

Este ítem está asociado con la imposibilidad de soportar carga, deformaciones y medio ambiente para los cuales fue diseñado inicialmente el componente. Dicha falla por lo general está ligada a una composición química deficiente, en la cual se presenta un exceso de inclusiones o segregaciones. Incluso su misma composición química puede llegar a generar bajas propiedades mecánicas. Un ejemplo para este tipo de falla se reporta en el módulo número 7 sobre cigüeñales, creado por la empresa Ferreyros, representante de la marca Caterpillar. En la figura 9 se muestra un caso de falla en un cigüeñal por una inclusión en el material.



Figura 9. Inclusión subsuperficial en cigüeñal (<https://bit.ly/2MmK7ov>).

Esta falla se debe a la fatiga producida por una inclusión cerca de un filete, la cual generó concentradores de esfuerzos en una zona con demasiada carga. Se demuestra que la falla se presentó debido a una condición causada por un defecto en el material y no por cálculos deficientes en el componente mecánico.

### 1.2.3. Deficiencia de fabricación

En el proceso de fabricación de un elemento se involucran muchos aspectos que inciden en el funcionamiento final. Para dar un contexto general, se citarán algunos de los procesos de fabricación o manufactura típicos en nuestro medio:

- Torneado
- Fresado
- Erosionado
- Corte (plasma, agua, laser)
- Soldado

Cada uno de los procesos mencionados puede provocar fenómenos de concentración de esfuerzos o también esfuerzos residuales que no estaban contemplados por el diseñador (Davis, 1989). Esto conlleva a una deficiencia del componente y una posible falla por falta de resistencia. El fenómeno antes mencionado se puede observar en la figura 10.

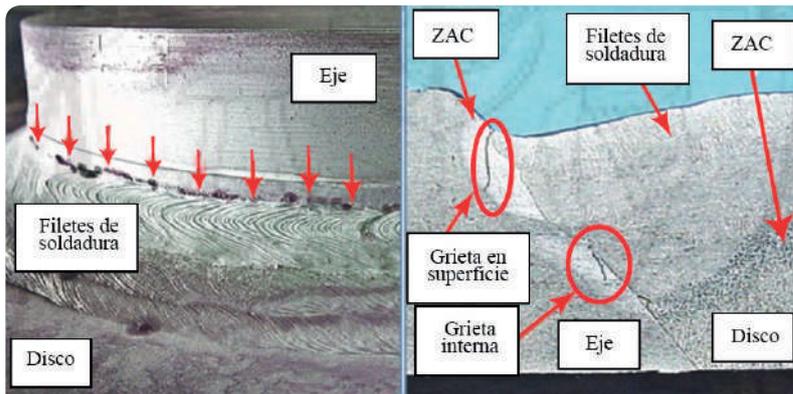


Figura 10. Falla en rodillo papelerero (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).

En la figura 10 se muestra una falla en una junta entre un disco de sujeción y el eje de un rodillo papelerero, donde una grieta se propagó hacia el interior del material en la junta soldada y más específicamente en la zona afectada por el calor (ZAC), haciendo que el componente fallara de forma prematura. La causa particular de falla en este caso está asociada a la deficiencia en el proceso de aplicación de soldadura (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).

#### 1.2.4. Deficiencia de montaje

Las fallas que se presentan por montajes defectuosos están asociadas a las inadecuadas prácticas realizadas por parte de personal poco calificado o falta de herramientas especializadas. La falla se presenta entre componentes que deben estar dentro de un rango de tolerancias en ensamble que no se garantiza. Esto genera desalineamiento, vibraciones y esfuerzos parásitos.

Un ejemplo típico es el ensamble de rodamientos, el cual requiere de herramientas especializadas y ajustes adecuados con el eje y componentes en los que se instale. Es bien conocido que por fallas en el montaje se han presentado problemas de funcionamiento en los equipos ya ensamblados y en operación.



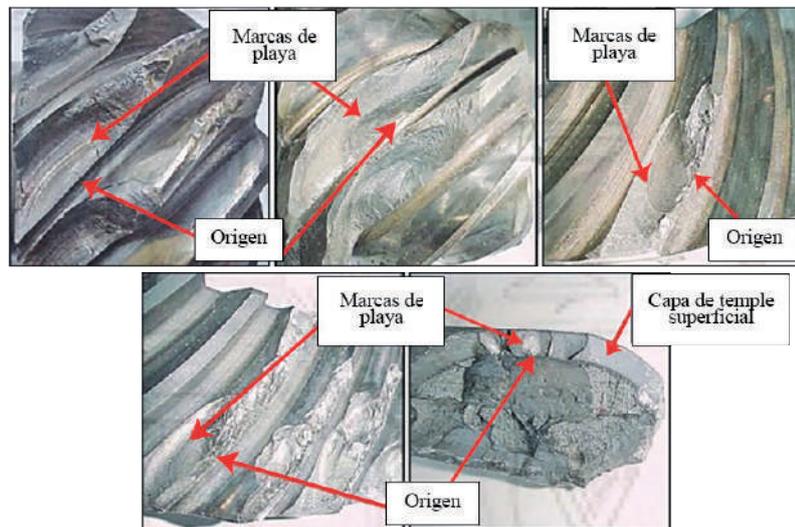
Figura 11. Falla en rodamiento por montaje incorrecto. Fuente: elaboración propia.

Según el fabricante de rodamientos FAG, en el 10% de los casos la falla se debe a un montaje incorrecto: montaje realizado de forma violenta, ajuste defectuoso, holgura inadecuada o fuerza excesiva al apretar el manguito cónico (FAG, 2018).

### 1.2.5. Deficiencia de operación

Este tipo de falla se presenta, por lo general, cuando se usa un equipo o componente con el fin de realizar labores para las cuales no fue diseñado, debido a que en una nueva condición de trabajo se puede ver sometido a solicitaciones superiores, condiciones severas de velocidad, temperatura, medio ambiente, etc.

Figura 12. Falla por sobre carga en engranes (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).



En la figura 12 se muestra una falla en un engrane ubicado en un reductor de velocidad, el cual, debido a una sobrecarga en su funcionamiento, produjo roturas por fracturas del tipo frágil.

### 1.2.6. Deficiencia en el mantenimiento

Las fallas en equipos debido a deficiencias en mantenimiento son muy frecuentes, se dan por falta de control de las

personas encargadas del departamento de ingeniería a cargo de las rutinas de lubricación, reparación y prevención. Las fallas más frecuentes son el cambio de aceite a superiores tiempos del estimado, uso de repuestos de baja calidad, el uso de referencias diferentes en componentes, entre otras.

### 1.2.7 Deficiencias en transporte

Este tipo de fallas se presenta por embalaje deficiente de los elementos, el tipo de transporte usado para el traslado de equipos y su manipulación. Un ejemplo típico de falla se presenta en el transporte marítimo, cuando productos que están sobre cubierta se ven expuestos al medio ambiente y se corroen.

## 1.3. ¿Qué son los modos y mecanismos en una falla?

Para citar los mecanismos que están inmersos en una falla, se debe iniciar por definir qué es un *mecanismo de falla*. Es el proceso o secuencia que ocurre en el elemento o pieza cuando deja de servir, en muchas ocasiones, no se puede evidenciar durante su funcionamiento puesto que no presenta ningún tipo de aviso previo o alarma que pueda indicar que la falla está en progreso. Puede existir en un mismo componente un mecanismo de falla o varios que se acoplan, como el mecanismo de pandeo, torsión, cortante o mecanismo de fractura. Así mismo, la forma física o química en la que un elemento o máquina se comporta al momento de una insuficiencia se denomina *modo de falla*, en otras palabras, es la forma en la que el componente se degrada hasta llegar al colapso o falla final.

Los mecanismos que intervienen en una falla están ligados directamente con las cargas a las que está siendo sometido, mientras que los modos de falla se asocian más a su funcionamiento, tipo de aplicación, ambiente, etc. Cuando se diseña un componente mecánico se consideran las sollicitaciones a las

cuales va a estar sometido (tensión, flexión o torsión), sin embargo, las condiciones de servicio o el mismo mantenimiento puede modificar la forma como el componente se comporta. Esto lleva a involucrar uno o más modos de falla, los cuales inician el proceso que terminará con el colapso o falla catastrófica del componente (González, 2004). La forma como se puede representar la relación entre las fuentes de falla y los modos de falla se muestra a continuación:

Figura 13. Relación entre fuentes, modos y mecanismo de falla (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).



En la figura 13, se puede establecer la relación entre las fuentes de falla y los modos de falla explicados con anterioridad. Con el fin de contextualizar la idea, se indica la relación entre las fuentes de falla y los modos de falla para el trasbordador espacial Challenger, mencionado en el numeral 1.1.2.

La figura 14 muestra que la fuente de la falla estuvo asociada con el diseño deficiente, en este caso en particular, la de una junta tórica, lo que permitió que los gases calientes presurizados eventualmente crearan una llama de «fuga» que, al hacer contacto con las juntas tóricas del tanque exterior adyacente, causó una falla estructural.

Figura 14: Relación entre fuentes, modos de falla para el trasbordador espacial Challenger. Fuente: elaboración propia.



Los modos de falla tienen múltiples combinaciones entre sí, esto amplía la probabilidad de que un elemento falle por combi-

nación de modos. A continuación, se muestra los modos de falla generales que se podrían dar en un elemento mecánico:

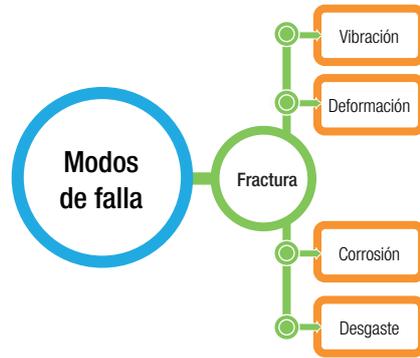


Figura 15. Modos de falla en elementos de máquina (ASM International, 1992, p. 729).

En la figura 15, se muestran los principales modos fallas presentes en un componente mecánico, sin embargo, cada una de ellas tiene una tipología y sus respectivas subclasificaciones, las cuales se abordarán con mayor profundidad en «Trayecto 2», por ahora, se especificará el concepto general de cada una de ellas.

- **Fallas por fractura**

Se presenta por modos de falla que logran separar o disgregar en varios segmentos el componente. Dicha condición por lo general se presenta en piezas bajo sollicitaciones que generan y propagan grietas hasta fallar. Este modo de falla en muchas ocasiones se da como consecuencia de condiciones de vibración, corrosión o desgaste. Por esta razón, en la clasificación se encuentra en un nivel jerárquico superior a las demás.

- **Fallas por desgaste**

Es un modo de falla que involucra el contacto directo entre dos o más componentes, lo que provoca cargas de rozamiento, pérdida de material y fatiga como condición crítica. Un ejemplo de este fenómeno es la falla producida en los dientes de dos engranes sometidos a ciclos de esfuerzo.

- **Fallas por corrosión**

La corrosión es una falla producto de un proceso químico, en el cual el material reacciona con elementos de su entorno. Esta condición afecta sus propiedades, reduce su dureza y su resistencia mecánica. Por lo general, esta falla se propaga a nivel microestructural, generando una fatiga, corrosión y esfuerzo asociados a la propagación de grietas a nivel intergranular y transgranular.

- **Fallas por deformación**

Es una condición que se da por acción de cargas excesivas sobre un componente, lo cual genera una modificación de su geometría de forma permanente o deformación plástica.

- **Fallas por vibración**

Dicha condición se presenta cuando el componente está sometido a velocidades o amplitudes de aceleración muy altas, lo cual produce grietas en el componente que se propagan a diferentes velocidades, dependiendo de la frecuencia y el tipo de material. En algunos casos se tipifica como una falla por deformación y se evalúa de dicha forma.

## 1.4. Estudio de caso

Para el presente módulo se contempla el uso de casos de estudio para mostrar las diferentes tipologías de falla, su seguimiento y control. Sin embargo, para poner en contexto la información referente a los casos de estudio, se debe empezar explicando qué es, cuál es su finalidad y su alcance.

### 1.4.1. ¿Qué es un estudio de caso?

Los casos son historias con un mensaje, no son simplemente narraciones para entretener, son historias para educar (Herreid, 1997). Los casos pueden ser utilizados en áreas tan

diversas como la economía, la medicina, las leyes, la ingeniería entre otros. En cada campo, los profesores que utilizan los casos no los presentan de la misma manera, es decir, no hay un método específico (excepto quizás en los negocios).

Los estudios de casos les permiten a los estudiantes abordar problemas situados en entornos realistas en el aula, utilizando sus habilidades cognitivas e intuitivas complementadas con sus habilidades verbales y aprendidas. Un caso se caracteriza por involucrar una descripción de un complejo entorno operativo, un problema de decisión difícil de definir, incompleta y quizás información ambigua, estructura insuficiente y la necesidad de tomar una decisión (Torres, 2010).

A su vez, se considera desde la perspectiva pedagógica de la universidad como un dispositivo, el cual es usado para la búsqueda de solución a problemas reales del mundo de la vida. Por su parte, se considera un tipo de investigación el cual busca realizar un estudio amplio a un sujeto o situación bien definidos en el espacio tiempo, lo que a su vez sirve de insumo para investigaciones más extensas o ampliadas, cuyas conclusiones requieren procesos iterativos para generar resultados más acertados.

#### *1.4.2. Caso colapso de estructura metálica*

Para el desarrollo de los diferentes conceptos asociados al análisis de falla, se plantea un caso de estudio relacionado con el sector metalmecánico. En este caso, una estructura tipo estantería o rack colapsó, causando pérdidas económicas en una compañía. A continuación, se describe de forma general el incidente con el fin de plantear ciertas hipótesis de la posible causa de falla. A medida que se avance en el módulo se van estableciendo ciertos criterios de evaluación de la falla y se generan nuevos conceptos a partir del caso de estudio. El esquema general del colapso se observa en la figura 16.



Figura 16. Colapso de estantería.  
Fuente: elaboración propia.

### 1.4.3. Descripción general del evento

Los problemas con la estantería mostrada en la figura 16, se remontan al año 2012, cuando se presenta un incidente con un tramo en la línea 40 por aplastamiento producido en un marco. La compañía encargada del mantenimiento reemplazó en su momento 8 marcos y, a su vez, realizó un informe en el que descarta cualquier tipo de falla en el diseño o en los cálculos estructurales, y manifiesta que es un evento inusual.

Seis días después del primer incidente, se vuelve a presentar aplastamiento en uno de los marcos, como se muestra en la figura 17. En este caso, ocurrió una reacción en cadena que generó el desplome de toda la estantería armada hasta el momento.



Figura 17. Columna de inicio de falla.  
Fuente: elaboración propia.

En esa misma imagen se muestra el punto exacto de inicio de falla (tomada de cámara de seguridad), lo cual evidencia un colapso por deformación de la estructura metálica en la base del rack.

Posterior a la falla, se realizó una inspección en la cual se pudo establecer una forma característica del colapso, así como los daños consecuenciales de la falla inicial, como se muestra en la figura 18.



Figura 18. Tipología de colapso de estanterías.  
Fuente: elaboración propia.

#### 1.4.4. Desarrollo del caso de estudio

En el desarrollo de un caso de estudio intervienen muchos factores, por tal razón, es necesario ser organizado y contemplar como mínimo la siguiente información:

- Planos del equipo afectado
- Historial de funcionamiento del equipo
- Rutinas de mantenimiento y cambio de componentes
- Manuales de operación y mantenimiento
- Listado de alarmas
- Códigos y estándares aplicables para la máquina o componente afectado
- Artículos de los fenómenos asociados a la falla

La información mostrada antes hace parte de un protocolo general para la investigación de accidentes, sin embargo, se puede usar para aplicaciones específicas y descartar la información que no aplica. Para mayor información sobre el uso y aplicaciones relacionadas, se recomienda al estudiante la lectura del artículo «*Modeling and accident reconstruction*» (*ASM Handbook Committee volume 11, 2002*).

En este trayecto se delimitará el caso de estudio con los respectivos conceptos tratados en esta sección y apoyados con las lecturas guía. Uno de los aspectos a evaluar es la o las posibles *fuentes de falla* que provocaron el colapso de la estructura. Para este caso y para todos los casos a evaluar por análisis de falla, es necesario conocer muy bien el funcionamiento, la forma como los componentes interactúan entre sí, sus solicitudes, el material con el que están contruidos, la forma como fueron manufacturados, la forma como se ensamblan, la forma como se utilizan y la normatividad local e internacional que están vigentes para dichos componentes. Dichas condiciones nos pueden llevar a filtrar los *modos de falla* que provocaron la falla final.

De manera similar a la figura 7, podemos filtrar para nuestro caso en particular las posibles fuentes de falla, como se muestra a continuación:



Figura 19. Posibles fuentes de falla para nuestro caso de estudio. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 19, se ha descartado como fuentes el transporte, mantenimiento y operación porque se pudo establecer, por medio de una inspección en estructuras, que no colapsaron, pero se habían instalado de forma simultánea a las falladas, las estructuras eran nuevas, de fabricación nacional y no mostraban golpes o errores de montaje, como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Estructura no colapsada.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 20, se muestra el ensamble de una estantería de 10 metros de altura por 40 metros de longitud instalada, adyacente a la zona de colapso. Con esta estructura se pudo descartar como fuentes de falla el montaje, se descartó el uso inadecuado de tornillos, el deficiente anclaje y la posible desalineación.

Para continuar descartando las fuentes de falla se debe empezar por verificar en detalle los cálculos realizados para este tipo de estructura en particular. En este caso, para la normatividad nacional se deben contrastar con lo establecido en el *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10* versión actual 2010, de acuerdo con la fecha del siniestro. Las deficiencias de material se deben evaluar, desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, con ensayos destructivos, los cuales se tratarán en secciones posteriores de este módulo. Las deficiencias de fabricación en este caso podrían estar aso-

ciadas al exceso de concentradores de esfuerzos y por operaciones o procesos en los cuales quedaron esfuerzos residuales en las piezas. Esto último se puede evaluar con ensayos no destructivos y se tratan en secciones posteriores. En cuanto al montaje, se puede establecer, a partir de secciones de estantería no afectadas por el colapso, que se siguieron todos los procedimientos de *Rack Manufacture Institut (RMI)* (RMI, 2012).

En cuanto a la falla, se puede realizar un filtro preliminar a los modos de falla con los antecedentes mostrados previamente y la aplicación específica, como se muestra en la figura 21.

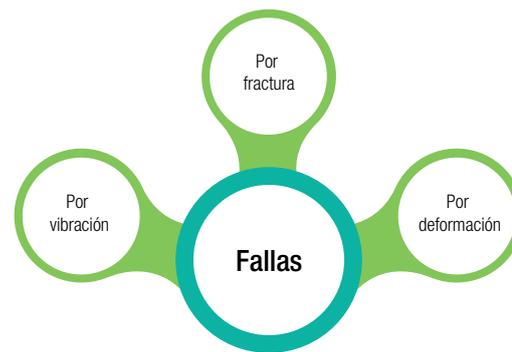


Figura 21. Posibles fallas para nuestro caso de estudio.  
Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 21, no se contemplan problemas asociados con la corrosión o el desgaste, puesto que la estructura no estaba expuesta a un ambiente corrosivo, por el contrario, contaba con una capa de pintura tipo electrostática (figura 20). Igualmente, el desgaste se presenta cuando dos cuerpos tienen movimiento relativo entre sí, de manera que, para el caso de estudio, no aplicaría.

En cuanto a la vibración, se pudo establecer que para la fecha en la cual se presentó el colapso no hubo ningún tipo de movimiento telúrico, no se realizaban trabajos de excavación en empresas vecinas y no se usaron equipos como estibadoras o trilaterales para realizar el proceso de cargue de la estantería, lo que hubiese podido generar algún tipo de vibración en la estructura por golpes.

### *1.4.5. Conclusiones del trayecto*

Una falla se puede presentar por múltiples causas. El ingeniero mecánico o grupo interdisciplinario asignado al caso debe preguntar el cómo, que lo llevará a verificar los modos de falla e iniciar un trayecto, en el cual se descartan modos y fuentes según el tipo particular de caso. Al tener claras las fuentes de falla se puede trazar una ruta al diseño de una estrategia que les permita establecer la causa raíz. Para esto, es importante analizar los siguientes trayectos y ver qué tipos de ensayos y metodologías se podrían usar.

Con este primer trayecto se buscó que el estudiante tuviera acercamiento a un caso de estudio particular, se citaron algunos aspectos generales de los modos y mecanismos de falla asociados y algunas de las técnicas que se deben llevar a cabo para el desarrollo del análisis de falla.

## Trayecto 2

Para el presente trayecto se evalúa en detalle los diferentes modos de falla y sus posibles variaciones a presentarse en casos reales. A su vez, se realiza una comparación directa entre el análisis a realizar desde el punto de vista de la mecánica de la fractura y la mecánica clásica, respecto al comportamiento de un elemento bajo unas solicitaciones determinadas (figura 22). Por último, como se mencionó en «Trayecto 1», se retoman los conceptos tratados para retroalimentar el caso de estudio.

### 2.1. Diagrama de flujo del trayecto

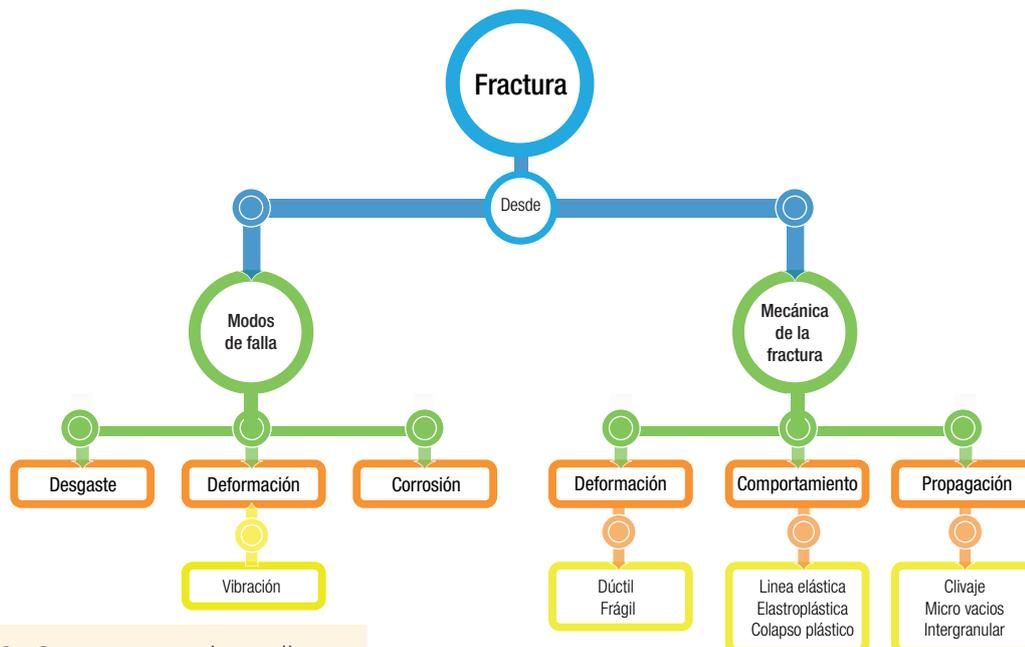


Figura 22. Conceptos por desarrollar en la unidad 2.  
Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Modo de falla por fractura

Como se mencionó en «Trayecto 1», las fallas por fractura se consideran cuando un componente se separa en dos a más fragmentos, sin embargo, este tipo de fallas ocurre como consecuencia de la generación y posterior propagación de grietas bajo la condición de una sollicitación o esfuerzo (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017). Las fracturas se ven precedidas de ciertas etapas que se citan a continuación:

- Nucleación de grietas
- Propagación de grietas
- Fractura del componente

La evolución de las etapas antes citadas definirá si se considera una falla súbita o progresiva, puesto que en una falla súbita el crecimiento o propagación de la grieta se da a alta velocidad, de modo que, en la mayoría de los casos, es indetectable. Por otro lado, cuando se habla de fallas progresivas se asocia con propagaciones de grietas durante un gran número de ciclos de esfuerzo, lo que hace que en algunos casos se pueda monitorear, controlar y estimar el tiempo de falla. A las fallas progresivas se les llama *de fatiga* o *dependientes del tiempo*.

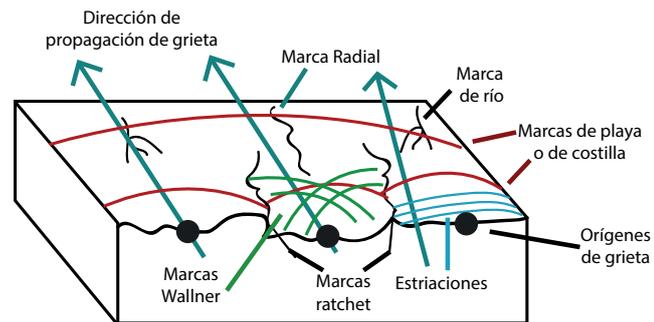
Para la clasificación de las fallas no existe un único criterio, puesto que las condiciones súbitas y progresivas se pueden ver afectadas por condiciones propias del material, como son sus propiedades de ductilidad y fragilidad, la capacidad que puede tener para soportar esfuerzo bajo la acción del medio ambiente (corrosión esfuerzo, corrosión fatiga, por hidrógeno para el caso específico de soldaduras) y por último el comportamiento bajo la acción de altas temperaturas (fluencia lenta y fatiga térmica).

Por lo general, la nucleación de la grieta y su propagación se ven influenciados por otros modos de falla, como la corro-

sión, deformación y desgaste. Su velocidad y el tiempo que tarda en llegar a la fractura del componente indica si se clasifica como súbita o progresiva.

Para determinar si una fractura fue súbita o progresiva, se debe conocer el funcionamiento del componente y evaluar las diferentes marcas que quedan posterior a la falla. A este estudio se le denomina *fractografía* (estudia el aspecto topográfico de cada modo de falla sobre la superficie fracturada formada), con el cual se determina, en función de las marcas, dónde inició, cómo se propagó y su comportamiento en el tiempo.

Figura 23. Marcas presentes en una superficie de fractura (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).



En la figura 23 se representan las marcas que se pueden encontrar en un elemento que falló. No siempre se pueden encontrar todas en una misma falla, sin embargo, cada una proporciona información acerca de qué modo y cuál fuente está propagando la falla. Los conceptos específicos de cada marca se describen a continuación.

### 2.2.1. Marcas de Ratchet

Permite localizar y determinar el número de puntos de orígenes de la falla, son marcas que se encuentran perpendicular a la superficie de origen. Es importante destacar que las marcas de Ratchet no son puntos de origen de grietas, por el contrario, separan dos fracturas adyacentes. La geometría característica para estas marcas es un diente de sierra, como se muestra en la figura 24.

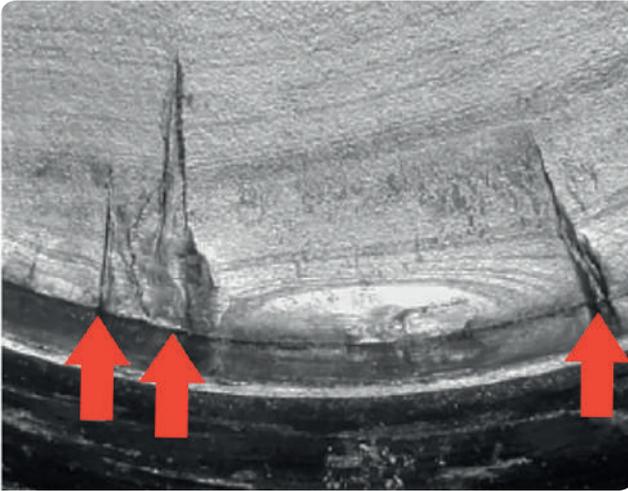


Figura 24. Marcas tipo Ratchet dividiendo un frente de grieta (Becker y Shipley, 2002).

### 2.2.2. Marcas radiales y de río

Se forman sobre la superficie de fractura en las zonas de propagación. En el caso de las marcas de río, se asocian a su geometría con el cauce de un río y van en la misma dirección de propagación de la grieta.

### 2.2.3. Marcas de playa o de costilla

Reciben el nombre debido a su forma y se producen en la superficie de fractura por cambios en la velocidad de crecimiento de grieta, cambios de estado de esfuerzos, por la acción del medio ambiente en la cabeza de grieta (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017) (figura 23).

### 2.2.4. Marcas Wallner

Las marcas Wallner se forman durante la propagación de una grieta inestable, por ondas de choque y frentes de grieta. Se pueden considerar micromarcas que forman líneas paralelas que se intersecan formando un patrón en «v», que indica la dirección de propagación de la fractura.

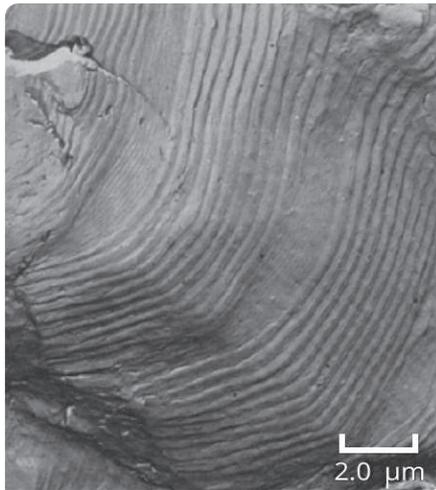


Figura 25. Marcas tipo estriaciones (Becker y Shipley, 2002).

### 2.2.5. Estriaciones

Son protuberancias pequeñas que solo son visibles con microscopio electrónico de barrido. Se diferencian de las marcas de playa o costilla, las cuales son apreciables en inspección de ojo desnudo o lupa. Las estriaciones en la zona e inicio de grieta son pequeñas y van aumentando su tamaño en la medida en que se aleja. Un ejemplo típico de este tipo de marcas se muestra en la figura 25.

El examen visual de una pieza fallada por fatiga muestra un patrón característico en el cual se observan las tres etapas ya mencionadas (figuras 26 y 27). Se aprecia una zona que origina una microgrieta (1), generada habitualmente en un concentrador de tensiones; seguidamente se aprecia una zona bruñida (2) por efecto del continuo frotamiento y, por último, se aprecia otra zona que aparece mate y áspera, con apariencia de fractura frágil (3).

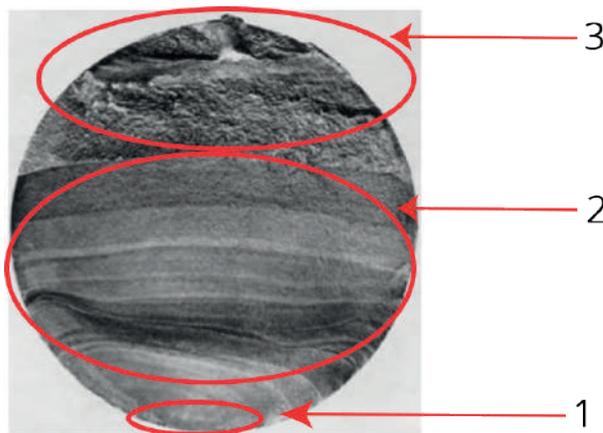


Figura 26. Rotura de eje bajo efecto de esfuerzos variables en el tiempo (fatiga). Fuente: elaboración propia.

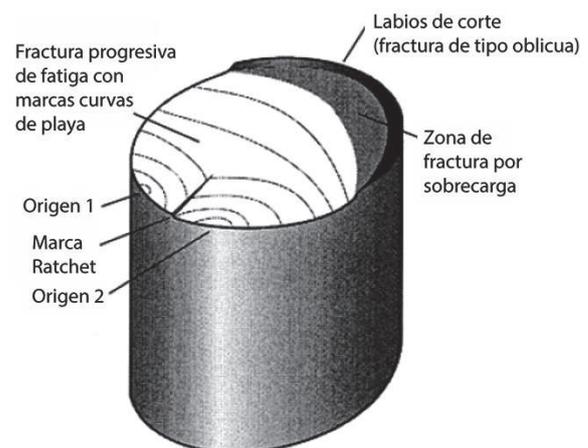


Figura 27. Características de una fractura por fatiga (Becker y Shipley, 2002).

### 2.3. Desgaste

Es un modo de falla que involucra el contacto entre dos componentes, o el contacto entre un componente y un fluido, que causa deterioro por interacción mecánica superficial. En las fallas por desgaste se presenta pérdida de material de forma progresiva, donde el material desprendido forma una serie de residuos o virutas que pueden causar una falla paulatina o acelerada, dependiendo de la condición de uso (ambiente corrosivo), la temperatura, la dureza de los materiales involucrados y el nivel de esfuerzos que se pueda generar.

El desgaste es una condición de servicio persistente en muchas aplicaciones de ingeniería con importantes consecuencias técnicas. En términos de economía, el costo del desgaste por abrasión se ha estimado en 1 al 4 % del producto nacional bruto de una nación industrializada. El efecto de la abrasión es particularmente las áreas industriales de agricultura, minería, procesamiento de minerales y movimiento de tierras. Asimismo, el desgaste es una preocupación en muchos tipos de componentes de la máquina; de hecho, es a menudo un factor importante en la definición o limitación de la duración adecuada de un componente. Un ejemplo importante es el desgaste de matrices y moldes. (Becker y Shipley, 2002, p. 1919)

Normalmente el desgaste no causa una falla catastrófica, pero trae consecuencias asociadas al mal funcionamiento del equipo, tales como el incremento de lubricante, baja eficiencia, incremento de temperatura, remplazo de componentes desgastados.

Existen diversos modos de falla por desgaste asociados a los materiales y el medio el medio donde se encuentran en contacto. Para el presente módulo y por el nivel de gravedad del modo de corrosión, se plantea una clasificación más general, como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Tipos de desgaste de componentes mecánicos.  
Fuente: elaboración propia.



En la figura 28, se muestran los principales tipos de desgaste presentes en un componente mecánico, según su condición de servicio y aplicación. Con el fin de contextualizar el concepto de cada uno y dar a conocer un ejemplo típico, se describirán sus características generales, cómo se presenta y cómo identificarlo.

### 2.3.1. *Desgaste adhesivo*

Este modo de falla se presenta por lo general bajo la condición de contacto entre dos piezas que se encuentran juntas y existe movimiento relativo entre ellas, cuya consecuencia es la pérdida superficial del componente más blando (material de sacrificio). Por lo general, el material más blando comprime su superficie al estar en constante movimiento y bajo presión, y sus irregularidades se fracturan quedando adheridas en el material más duro. La falla por modo de desgaste adhesivo se suele dar por la falta de lubricación entre dos componentes, puesto que las piezas deben estar separadas (lubricación por capa límite), sin embargo, la capa límite de lubricante puede cambiar en los arranques, en los sobreesfuerzos y paradas de una máquina. Por lo tanto, se tendrán dos escenarios de desgaste adhesivo: uno donde se logra la capa de lubricación estable entre los componentes, lo cual mantendrá un deterioro controlado de las piezas. Se caracteriza por unas superficies brillantes en las áreas de contacto, como se muestra en la figura 29.



Figura 29. Escenario 1: desgaste adhesivo en casquete de bancada.  
Fuente: elaboración propia.

El óvalo de color rojo de la figura 29 indica el desgaste adhesivo normal del producto debido al contacto entre el casquete de bancada y el cigüeñal de un motor generador, donde se destacan las zonas brillantes hacia la parte central del componente. Lo anterior indica que la superficie del casquete se comprime debido al contacto entre las piezas y su área superficial se deforma, mostrando una tonalidad más brillante en comparación con la demás superficie.

Un segundo escenario es la falta de lubricación entre componentes, lo que aumenta la temperatura entre ellos, aumenta la deformación del material más blando y dispara el agrietamiento, como se muestra en la figura 30.

En la figura 30, se muestra un casquete de un motor, en el cual el desgaste generó el arrastre de materiales y desprendimiento de las capas que componen el casquete. Es importante señalar que, en la zona resaltada de color rojo, se encontraron trazas de hierro y bronce, materiales que no hacen parte de ninguno de los dos componentes en contacto, pero sí aceleraron el deterioro del casquete, puesto que las partículas limitan la capa

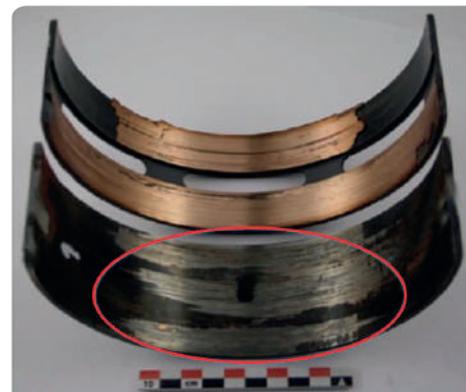


Figura 30. Escenario 2: desgaste adhesivo en casquete de bancada.  
Fuente: elaboración propia.

de lubricante en la junta, provocando el aumento de temperatura y el deterioro acelerado de los componentes en contacto.

### *2.3.2. Desgaste abrasivo*

Es un modo de falla que se presenta por la acción de corte entre dos o más materiales. Por lo general, tiende a formar ralladuras cuando las partículas o virutas del material más duro entran en contacto y se deslizan sobre la superficie más blanda, ocasionado deformación plástica y arranque de material.

Se considera que el fenómeno de desgaste adhesivo tiene una relación directa con el abrasivo, sin embargo, la diferencia está asociada a la presencia de partículas abrasivas que aceleran el desgaste entre componentes, como se muestra en la figura 31.

En la figura 31, se muestra un desgaste abrasivo excesivo sobre el cigüeñal de un motor generador. En este caso se debe verificar las partículas en el aceite para determinar qué tipo de residuos generaron la abrasión, al punto de pegarse el casquete al cigüeñal y causar un daño severo.

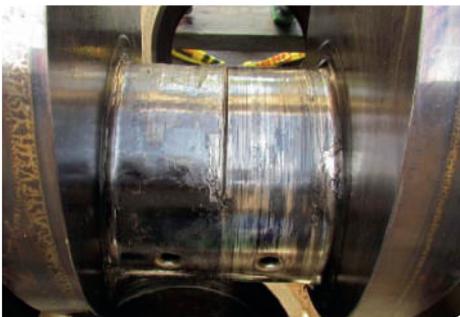


Figura 31. Desgaste abrasivo sobre cigüeñal de motogenerador.  
Fuente: elaboración propia.

### *2.3.3. Desgaste por fatiga superficial*

El modo de falla de desgaste por fatiga superficial es un fenómeno producido a partir de dos piezas en contacto cíclico por rodadura o deslizamiento, que genera la pérdida de material en forma de cavidades, consecuencia de la generación y propagación de grietas de fatiga que nuclean a nivel superficial o subsuperficial (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).

Este tipo de fenómenos se pueden observar en componentes que se encuentran en contacto y sometidos a esfuerzos de deslizamiento sobre la superficie, como los rodamientos y los piñones en todos sus tipos (rectos, cónicos, helicoidales, etc.).

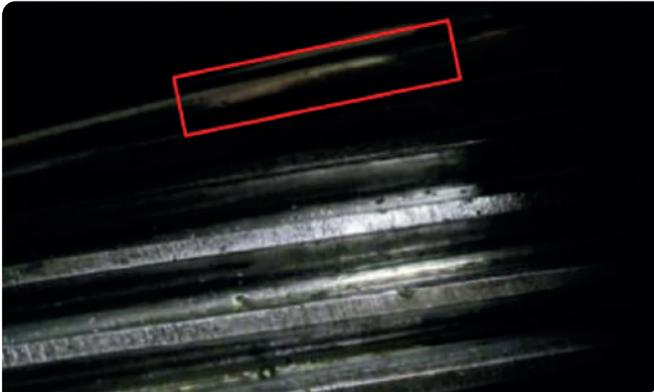


Figura 32. Desgaste superficial en diente de piñón helicoidal.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 32 se muestra una zona inspeccionada de un piñón helicoidal de una caja reductora que falló después de 50 horas de servicio. En el área resaltada con color rojo, se observa el desgaste superficial en un flanco de un diente. En este caso, el piñón presenta una falla superficial en un área específica del diente, lo cual hace pensar que no se trata de falta de lubricación porque se tendría dicha condición en toda la extensión del diente, sin embargo, el fenómeno de micropicaduras está presente por la relación de durezas de los dos piñones en contacto y por la falta de alineación entre ellos.

#### *2.3.4. Desgaste por cavitación*

El desgaste por cavitación es un modo de falla en el cual se presenta pérdida de material, causando la formación de cavidades sobre una superficie en la cual golpean burbujas de vapor que implotan de forma consecutiva durante la variación de presiones. Este fenómeno está ligado directamente a tuberías o sistemas de bombeo en donde estas burbujas chocan con



Figura 33. Desgaste por cavitación en bombas (Avellan, 2002).

las paredes y generan agrietamiento superficial y, en el peor de los casos, fatiga por agrietamiento.

En la figura 33, se muestra las consecuencias del fenómeno de cavitación en el impulsor de una bomba centrífuga. Para impedir este tipo de fenómenos, se debe evitar la formación de burbujas de vapor en el líquido transportado manteniendo bajas las temperaturas y evitando realizar cambios de presión de manera súbita.

## 2.4. Corrosión

La corrosión es un proceso creado por la interacción (reacción) entre un material, a menudo un metal o una aleación, y su entorno (por lo general el medio ambiente u otro material), cuya consecuencia es la degradación de ese material (*ASM International & Committee*, 1992, p. 477). La corrosión se da por las propiedades del metal o aleación en contacto con el medio ambiente. Algunas de las variables que modifican dicha condición se citan a continuación:

- PH (acidez)
- Potencial oxidante (potencial electroquímico)
- Temperatura y transferencia de calor
- Velocidad (movimiento del fluido)
- Componentes de la solución y su concentración

Debido a la cantidad de variables que pueden modificar y generar un tipo de corrosión, en el presente módulo solo se realiza un resumen general de las más destacadas, dentro de las cuales está la corrosión general, por celdas de concentración, galvánicas, con cooperación, corrosión desgaste y cooperación corrosión fractura.

En la figura 34, se muestra la falla de una estructura de una máquina que estaba expuesta al contacto con agua dulce, a temperatura ambiente, en este caso se observa que el equipo cuenta con una muy buena apariencia externamente porque se encontraba protegida con pintura epóxica, sin embargo, al ser diseñada con perfiles cerrados (tubos cuadrados), el agua ingresó y empezó un proceso de corrosión general donde se genera disolución del material y productos de la corrosión, como lo indica la zona resaltada en color rojo.



Figura 34. Falla en estructura por corrosión general.  
Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Modo de falla por deformación

Este modo de falla evalúa la deformación que puede tener un componente de máquina bajo el efecto de una sollicitación. Por lo general, se habla de elementos que se deforman en el rango elásticos (por debajo del límite de fluencia) o plásticamente (por encima del límite de fluencia), lo que produce que se distorsionen (deformación plástica). La condición de deformación se presenta bajo condiciones de carga estática o variables en el tiempo (dinámicas). Las fallas por deformación se pueden presentar por deflexiones fuera de rango, vibraciones fuera de rango, carga cíclica o termofluencia.



Figura 35. Estructura con deformación plástica como consecuencia de una falla por corrosión. Fuente: elaboración propia.

Por lo general la deformación, como modo de falla, está ligada al término *rigidez*, que es la resistencia que tiene un componente a doblarse (soportar esfuerzos normales) o torcerse (soportar esfuerzos de corte) por la acción de fuerzas externas que actúan sobre su superficie.

Es importante establecer si el principal modo de falla es por deformación o si estuvo comprometido otro modo de falla que generó, como «consecuencia de», la deformación del componente. A continuación, se muestran dos ejemplos en los cuales se puede contextualizar la situación mencionada.

En la figura 35 se muestra el mismo componente citado en el numeral 2.4, el cual presentó una falla por la corrosión de la tubería, sin embargo, presenta unas deformaciones (área resaltada), las cuales podrían indicar que el modo de falla principal es por deformación. Para este caso, se descarta, como modo principal, la deformación porque el tubo presentaba una corrosión uniforme a lo largo de toda la sección interna. A su vez, donde se muestra la deformación, se midió el espesor, de manera que se encontró solo al 30% del que tendría la tubería en estado de suministro (primero se presentó corrosión, como consecuencia de la misma se redujo el espesor de la sección transversal de tubo, causando la deformación).

## 2.6. La mecánica de la fractura

En este trayecto el estudiante comprenderá la forma como se generan las grietas dentro de un material y su posterior propagación, así como la

forma como este tipo de fenómenos modifican la capacidad de un componente para soportar las sollicitaciones a las que está sometido.

Para dar inicio a este trayecto, el estudiante debe recordar algunos principios fundamentales y conceptos básicos del comportamiento de los materiales, especialmente dentro de la subclasificación de los aceros, los cuales contribuyen en gran parte del estudio del presente módulo.

La mecánica tradicional nos muestra el estudio de las fuerzas que actúan en un cuerpo y las reacciones que se producen como resultado de dichas acciones. Este estudio se realiza sin tener en cuenta las causas que produce el material y mucho menos las alteraciones de la materia. Si se evalúa desde el punto de vista de la segunda ley de Newton —toda acción se tiene una reacción—, dicha reacción estaría asociada con un esfuerzo y una deformación del material. En la medida en que se aplique una carga con una magnitud constante o variablemente superior, los esfuerzos internos aumentan y da como resultado las deformaciones.

En la mecánica de sólidos se evalúan los esfuerzos producidos y sus respectivas deformaciones, se compara con parámetros conocidos de los materiales, como la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tensión. Dichos valores pueden llegar a ser imprecisos puesto que están asociados directamente con condiciones de metalurgia y manufactura de los materiales que no son necesariamente comunes para todos.

Inicialmente, al aplicar una carga a un sólido, se produce un cambio de dimensiones, el cual es proporcional a la magnitud de la carga aplicada. Este es reversible pues, al retirar la carga, el cuerpo recupera su forma y dimensiones originales. A este fenómeno se le denomina *elasticidad*. En la mayoría de los materiales y, en especial los metales, cuando el esfuerzo producido por la carga sobrepasa un valor límite, conocido como

*límite elástico*, el cambio de forma se vuelve permanente, esto es una condición conocida como *plasticidad*. Finalmente, cuando el material no puede continuar deformándose, se produce la fractura o rotura final.

Para analizar el comportamiento mecánico de un sólido, es necesario simplificar su descripción, ya que estos materiales se componen de arreglos complejos de átomos, con defectos cristalinos, fases, heterogeneidades. En general, la mecánica de sólidos considera que los cuerpos bajo análisis cumplen las siguientes condiciones (Arana y González, 2003):

- Continuo. El material ocupa la totalidad del volumen y no hay huecos, vacíos ni interrupciones. Se puede definir entonces un volumen infinitesimal que tiende a cero. Dicho límite siempre existirá.
- Homogéneo. Todo el volumen está ocupado por el mismo tipo de material.
- Isotrópico. Las propiedades mecánicas del componente se mantienen constantes en todas las direcciones que se evalúen.

Un ejemplo tradicional de esta suposición es el círculo de Mohr, en el cual se asume un diferencial de área que representa los esfuerzos a los cuales está siendo sometido un componente, como se muestra en la figura 36:

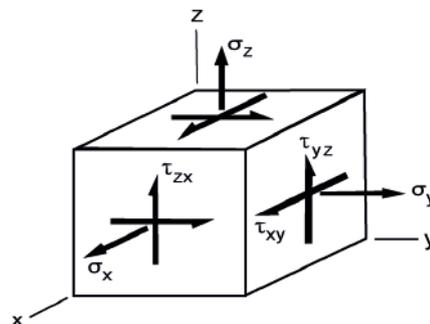


Figura 36. Componentes unitarios de esfuerzo (Hosford, 2007).

El resultado de evaluar los esfuerzos de un cuerpo a nivel tridimensional, o simplemente en dos dimensiones, busca establecer los esfuerzos principales y el criterio de diseño. En muchos casos en los que se está trabajando bajo condiciones de carga estática, este criterio de diseño considera a Von Mises o a Tresca (Budynas y Nisbett, 2016, p. 216).

Los elementos de máquinas se deben diseñar con secciones transversales variables para sujetar, evitar deslizamientos, disminuir peso o adaptar a una forma determinada, lo que favorece los concentradores de esfuerzo en algunas zonas críticas de transmisión de esfuerzo como se muestra a continuación:

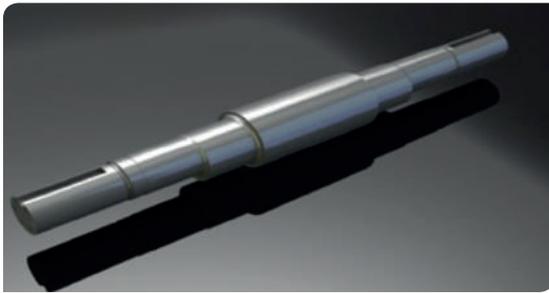


Figura 37. Geometría de eje con sus respectivos concentradores de esfuerzo.  
Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 37, la geometría de un eje puede tener múltiples concentradores de esfuerzo, tales como cambios de sección, cajas para anillos tipo Seeger, cuñeros o chaveteros, etc. Para considerar los efectos producidos por dichos concentradores, se usan coeficientes empíricos mayores a la unidad, los cuales se multiplican por las tensiones normales o de corte que actúan en el componente en la zona más crítica como se expresa a continuación:

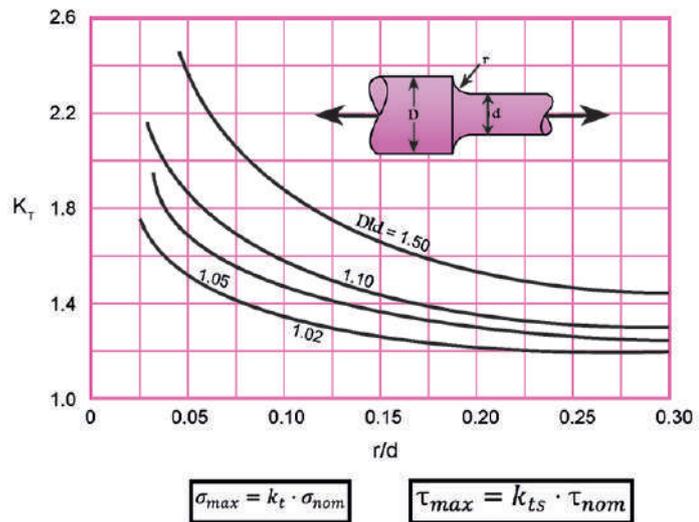


Figura 38. Factor de concentración de esfuerzo para un cambio de sección (Budynas y Nisbett, 2016).

En la figura 38, se observa la aplicación de dicho factor de concentración de tensiones ( $K_t$ ), para modificar la capacidad de un elemento sometido a una carga de tensión, en una geometría circular con cambio de sección. En los libros de diseño se pueden encontrar dentro de sus apéndices los concentradores de esfuerzo para diferentes geometrías y sollicitaciones. El diseñador, en la etapa de dimensionamiento y selección de geometría define la geometría más adecuada y considera dicho factor para minimizar la probabilidad de falla. Lo anterior no es enteramente suficiente, puesto que no se consideran las fallas a nivel microestructural en el material.

La necesidad de verificar la causa de falla en los materiales llevó a evaluar la fractura de los componentes y sus diferentes tipos de mecanismos, lo cual nos lleva a los primeros experimentos en fractura realizados por Leonardo da Vinci. Este inventor e intelectual nació en el año 1452 en el pequeño pueblo de Vinci, situado en la orilla derecha del río Arno, entre Florencia y Pisa. Leonardo proporcionó varias reglas que establecían los indicios de la causa de la fractura (Arana y González, 2003). Leonardo midió la resistencia de alambres de hierro que fabricaba en su trefiladora y encontró que la resistencia variaba de forma inversa a la longitud de los alambres. Este resultado implicaba que los defectos del material gobernaban la resistencia de los alambres; un alambre más largo correspondía a una mayor longitud de material y, consecuentemente a una mayor probabilidad de encontrar una zona defectuosa del alambre. Aunque estos resultados eran meramente cualitativos, Griffith estableció la conexión entre la fractura y el tamaño de los defectos en su primer trabajo publicado en el año 1920, aplicando el análisis de tensiones a un agujero elíptico, previamente tratado por Inglis siete años antes. Griffith utiliza el primer principio de termodinámica para formular la teoría de la fractura, basada en el balance simple de energía.

De acuerdo con esta teoría, una grieta se hace inestable y se produce la fractura cuando el cambio de la energía tensional que resulta de un incremento de la grieta es suficiente para superar la energía superficial del material (Anderson, 2005).

## 2.7. Fractura desde la perspectiva de la mecánica de la fractura

La fractura es la fragmentación o separación de un sólido (componente mecánico) bajo la acción de una carga externa (tensión, compresión, flexión, torsión o combinadas). En muchas ocasiones los esfuerzos a los cuales falla un componente se encuentran por debajo de la resistencia a la tensión o incluso a la resistencia a la fluencia. Dicho fenómeno es necesario analizarlo con conceptos de ciencia de los materiales de mecánica de la fractura. Al evaluarlo desde la mecánica de materiales y considerar un material homogéneo, isotrópico y continuo, se puede establecer que la resistencia es diferente en comparación al mismo escenario de carga con un material que tiene algún tipo de fisura, como se muestra en la figura 39.

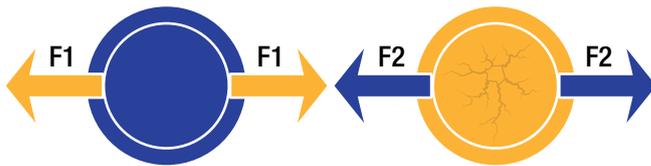


Figura 39. Comparación de carga de un elemento con y sin fisura.  
Fuente: elaboración propia.

La capacidad de soportar esfuerzos bajo una sollicitación específica en un componente se ve modificada debido a su comportamiento anisotrópico. En el caso del elemento mostrado en la imagen 39 (lado izquierdo), tiene una capacidad de transferir mayor carga, en comparación con el elemento que tiene defectos en su estructura (figura 39 costado derecho), el cual reduce su vida útil en función de varios aspectos como lo estableció Marín con sus factores de carga y resistencia y la modificación de carga en función de los ciclos de esfuerzo (Budynas y Nisbett, 2016, p. 279).

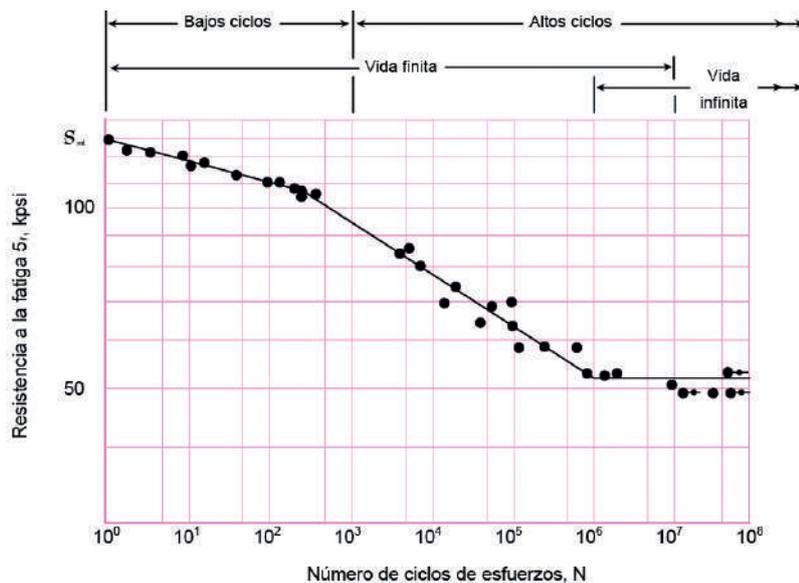


Figura 40. Relación esfuerzo vs. número de ciclos de carga (Budynas y Nisbett, 2016).

En la figura 40, se muestra la gráfica que relaciona la resistencia de un material en función de la cantidad de ciclos de esfuerzo. En una primera instancia, se observa una zona de bajo ciclaje, de 0 hasta 10 000 ciclos, una zona intermedia y una condición en vida infinita bajo condiciones ideales. Es evidente que, en la medida en la que un componente se somete a más ciclos de esfuerzo, puede llegar a fallar a un valor de esfuerzo inferior, que es incluso menor al límite de fluencia. La gráfica está relacionada con un ensayo en viga rotativa y muestra cómo el comportamiento bajo condiciones de esfuerzos variables en el tiempo modifica la capacidad de un material. El fenómeno de propagación de la falla en el material debería asociarse directamente a una condición microestructural, lo cual es más sencillo visualizarlo desde la mecánica de la fractura.

La mecánica de la fractura estudia el comportamiento de los materiales con fisuras o pequeños defectos cuando se le aplican cargas. Por tanto, el material ya no es homogéneo, pero sí cumple la ley de Hooke, a pesar de realizar diferentes correcciones por varios investigadores, como Gryffith, Paris e Irwin, quienes encontraron algunas relaciones matemáticas que permiten

establecer la capacidad que tienen los materiales para soportar carga con fisuras o grietas (Knoxville, 2014, p. 70).

La aplicación de carga en el tiempo genera el crecimiento de grietas en un elemento de máquina, en la medida en que van creciendo estas grietas logran alcanzar un tamaño crítico y finalmente desencadenan una falla. Una forma de clasificar las fracturas es desde el comportamiento de los materiales, dependiendo su deformación permisible plástica (figura 41).



Figura 41. Fallas por deformación.  
Fuente: elaboración propia.

### *2.7.1 Fractura frágil*

La deformación sufrida por el componente es elástica, por lo que, si se desea unir las dos partes posteriores a la falla, no se mostrarán cambios significativos en su geometría. En algunos casos las fallas por fatiga se consideran fracturas de tipo frágil porque la zona de rotura no sufre deformaciones apreciables.

### *2.7.2. Fractura dúctil*

Es una falla que se presenta luego de una deformación plástica apreciable, entendiéndose que la zona de deformación plástica cumple con la relación de Poisson y que el esfuerzo presente en dicha zona superó como mínimo la resistencia a la fluencia. La diferencia en aspecto de los dos tipos de falla se muestra en la figura 42.

Al tener en cuenta solo dos formas de fractura, se estaría dejando de lado la condición en que los materiales frágiles pueden tener una zona de deformación plástica pequeña en la cabeza de grieta, lo que nos llevaría a considerar una fractura frágil con mecanismo de falla dúctil, como se muestra a continuación (González, 2004).

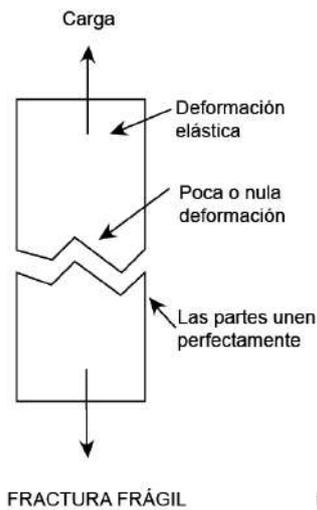


Figura 42. Modo de falla desde el punto de vista de deformación ingenieril (González, 2004, p. 22).

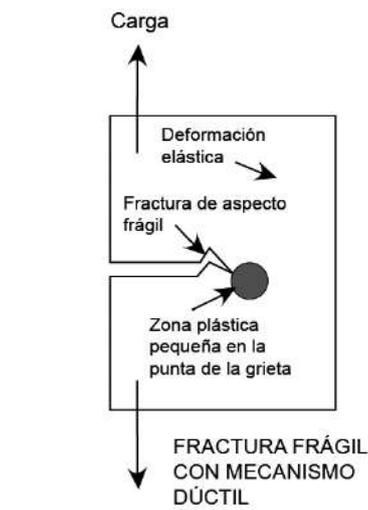
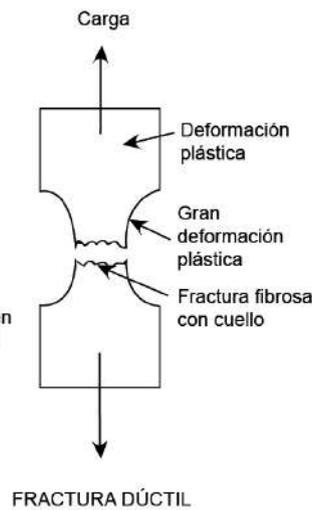


Figura 43. Mecanismo de falla frágil con deformación plástica (González, 2004, p. 27).

## 2.8. ¿Por qué estudiar las grietas?

Las grietas, al ser una discontinuidad, representan un riesgo que puede llegar a generar fallas inesperadas y catastróficas. Esto causaría pérdidas humanas, equipos parados, pérdidas de producción que conllevan a pérdidas monetarias, entre otros. Desde el punto de vista del medio continuo, no es aplicable el análisis de un cuerpo agrietado, por tal razón, de la mecánica de fractura tendría como propósito resolver dos condiciones importantes:

- Determinar la resistencia de un cuerpo posterior a la detección de grietas, que en el medio de la mecánica de la fractura se denomina *resistencia residual*.
- La predicción de la velocidad de propagación de la falla, lo cual se considera *vida residual*.

Para determinar los factores citados antes, se deben contemplar diferentes metodologías de análisis que se han creado

con el tiempo, los cuales se establecieron en función de la forma, el tamaño de la grieta y la deformación plástica en cabeza de grieta. Dada la condición expuesta, se podría realizar una clasificación general de la forma de fractura, como se muestra a continuación:

- Lineal elástica
- Elastoplástica
- Colapso plástico

Cada uno de los comportamientos antes mencionados están ligados al material y las solicitaciones presentes. En cualquier caso, este tipo de comportamientos modifica la vida residual del componente.

### 2.8.1. Fractura lineal elástica

Es un fenómeno de falla en el cual se observa una región muy pequeña en cabeza de grieta que presenta plastificación. Es producido generalmente por endurecimiento, por deformación (figura 44). El resto de la pieza se considera que está en una condición de elasticidad (*ASM Handbook Committee*. Volume 11, 2002).

### 2.8.2. Fractura elastoplástica

Este tipo de fractura está asociada la deformación extendida en el frente de la grieta a lo largo de toda la sección transversal (figura 45). Por lo general, este tipo de fracturas se observan en materiales dúctiles.

En este caso, se debe considerar el estudio de los dos parámetros fundamentales de análisis que son: la apertura del frente de grieta (CTOD) y la integral de contorno  $J$  que describen la situación en el frente de grieta y pueden ser usados como criterio de fractura.

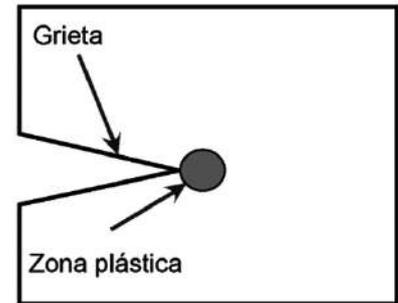


Figura 44. Representación de un elemento sometido a una falla lineal elástica (González, 2004, p. 27).

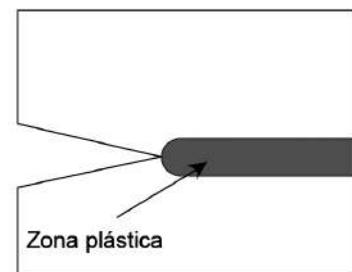


Figura 45. Representación de la zona plástica en frente de grieta (González, 2004, p. 27).

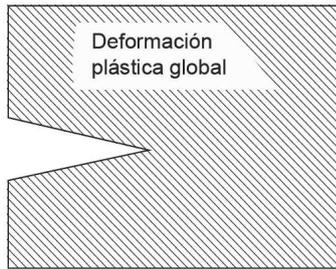


Figura 46. Zona de total plasticidad en frente de grieta (González, 2004, p. 27).

### 2.8.3. Fractura de colapso plástico

Es una fractura que es precedida por una deformación completa de su sección transversal. Este tipo de fracturas es común en polímeros (figura 46).

De las tres consideraciones antes evaluadas, se establece que todos los componentes mecánicos son diseñados para soportar sus esfuerzos nominales por debajo del límite elástico  $S_y$ . La aproximación más cercana es trabajar con la mecánica de la fractura lineal elástica (MFLE).

Para cuantificar cuánto resiste un material considerando MFLE, se debe definir el factor de intensidad de esfuerzo, el cual se representa con la letra  $K$ . Dicho valor se define matemáticamente así:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

Ecuación 1. Factor de intensidad de esfuerzos (González, 2004).

Donde:

$F$  = Factor geométrico, dependiendo directamente de la fuerza aplicada y la geometría del defecto.

$\sigma$  = Esfuerzo nominal aplicado.

$a$  = Tamaño de defecto

$K$  = Factor que define la magnitud de los esfuerzos en cabeza de grieta, si la deformación en el cuerpo es elástica.

El primer inconveniente desde el punto de vista matemático es conocer el factor  $f$ , puesto que, al depender de la geometría y la carga, se tendrían infinitas formas. Existen ciertas geometrías genéricas que nos pueden acercar a la falla que estamos evaluando. Esta información se encuentra en la norma ASTM E-399-81, la cual rige los ensayos de mecánica de la fractura, o en el libro *Fracture mechanics. Fundamentals and applications* (Anderson, 2005), en sus apéndices. Un segundo inconveniente es definir el tamaño de grieta porque generalmente no se en-

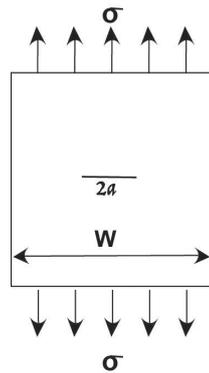
cuentra a nivel superficial y sería imposible de detectar a simple vista. Esto se estudia más adelante en este módulo, cuando en el siguiente trayecto se traten los ensayos no destructivos.

Es de esperar que si el valor obtenido con  $K$  (Factor de intensidad de esfuerzos) supera un valor permisible se considere que el elemento va a fallar. Esta magnitud se le conoce en la mecánica de la fractura como *la tenacidad de fractura* y se representa como  $K_c$ . La tenacidad de fractura es un valor medible en los materiales y por tal razón se considera una propiedad del material.

Un ejemplo en el cual se pueden establecer dichas relaciones se cita a continuación:

Calcule el factor de intensidad de esfuerzos en una placa infinita, la cual presenta una grieta central de 10 cm. La placa tiene un esfuerzo uniforme de tensión de 100 Mpa.

Nota: el término *placa infinita*, en el ejercicio, está asociado al comportamiento de esfuerzo plano y deformación plano en cabeza de grieta. Así mismo, se debe tomar en la ecuación la mitad de la longitud de la grieta por nomenclatura que se usa en los libros y que se muestra a continuación:



Solución:

$$2a = 10 \text{ cm}$$

$$a = 0,05 \text{ m}$$

$$K = 100 \text{ Mpa} \sqrt{\pi 0,05}$$

$$K = 39,6 \text{ Mpa} \sqrt{\text{m}}$$

### Conclusiones:

Por sí solo, el valor de  $K$  no indica si el elemento falla o se propaga la grieta, es por tal razón que se debe considerar los valores de KIC mostrados en la ecuación 2 (numeral 2.8). Sin embargo, se puede comparar con respecto a valores de KIC teóricos que permiten establecer si el material evaluado está en una condición crítica o no.

## 2.9. Aportes de la mecánica de la fractura al análisis de falla

El principal aporte desde el punto de vista de análisis de falla es que, desde el concepto de la MFLE, se puede determinar la carga a la cual se fractura un componente y el tamaño máximo tolerable. Partiendo de la ecuación 2, si se iguala con la carga máxima (resistencia residual), se puede llegar a obtener el tamaño crítico de grieta. Al igualar esta condición se tendría:

$$P_c = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

Ecuación 2. Carga de fractura (González, 2004).

Como se especifica en la ecuación 2, a partir de datos conocidos, como tamaño de grieta y el factor de intensidad de esfuerzos, se podría llegar a determinar, si no es conocida, la tenacidad de la fractura (KIC) y, por ende, la vida residual del componente (Kokcharov, 2013).

## 2.10. Propagación de grietas

La propagación de grietas se considera un daño acumulativo en el tiempo. En esta condición, un elemento se somete a esfuerzos fluctuantes o cíclicos. Este concepto se validaría a través del término *fatiga*. Para que se genere el fenómeno de fatiga se deben dar tres condiciones en el tiempo, conocidas como las etapas de fatiga:

- Nucleación y crecimiento de grieta
- Propagación estable
- Propagación rápida y falla final

Cada una de estas etapas mostradas depende de como factores, como la geometría, tipo de sollicitación, material y frecuencia de la carga. Los esfuerzos en la punta de grieta en condición lineal elástica dependen de la constante  $K$ . Durante cada ciclo de carga varían de cargas máximas a mínimas y, en las mismas proporciones, varía el factor de intensidad de esfuerzos, como se observa en las siguientes gráficas:

El investigador Paris, en 1962, realizó estudios relacionados con el crecimiento de grieta en función de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos y la vida útil de un componente. Se determinó que es posible predecir el comportamiento de un elemento sujeto a condiciones de fatiga si este tiene una grieta propagándose a velocidad lenta en condición lineal elástica. Dentro de sus aportes se destacan la formulación de la ecuación de Paris, la cual se cita a continuación:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Ecuación 3. Crecimiento de grieta postulada por Paris (González, 2004).

En la ecuación 3,  $da/dN$  es el incremento de longitud de la grieta por cada ciclo de fatiga y  $\Delta K$  corresponde al intervalo cíclico del factor de intensidad de tensiones (figura 48).  $C$  y  $m$  son constantes que dependen del material y se determinan experimentalmente. El exponente  $m$  está situado entre dos y cuatro para aleaciones dúctiles. Estas constantes de-

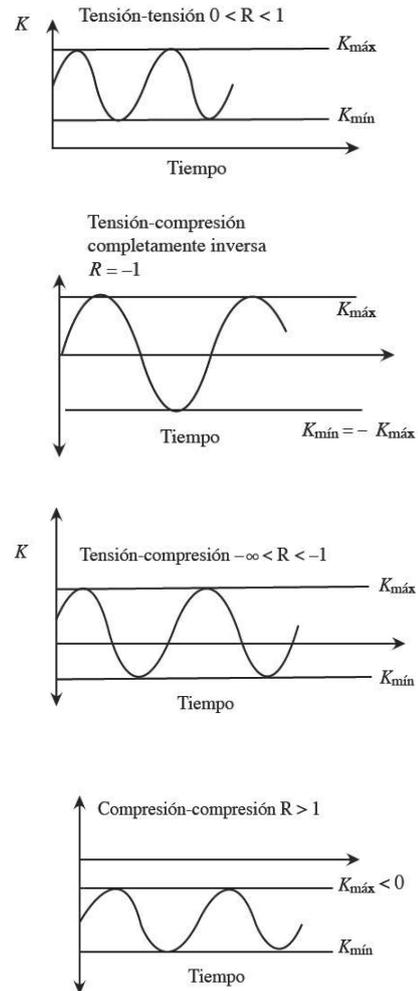


Figura 47. Modificación del factor de intensidad de esfuerzo en el tiempo (González, 2004).

penden de valores propios del material —como la microestructura y las condiciones ambientales, es decir su temperatura— y  $C$  puede depender de la relación de carga.

La formulación de Paris por lo general es representada en una gráfica en escala logarítmica, la cual da una recta dependiente de  $m$ , como se muestra en la figura 48.

En la figura 48 se puede observar la fase 1 (parte izquierda de la imagen), en donde la propagación de la grieta está influenciada por el nivel de esfuerzos o por la variación de los  $K_{min}$  y  $K_{max}$  mostrados en la figura 47. La trayectoria de la fractura es cristalina, pues se propaga a lo largo de los planos cristalinos del material (de mayor preferencia dependiendo el empaquetamiento del material (BCC, FCC, etc.). En esta etapa se considera que el avance es influenciado directamente por la microestructura (*ASM Handbook Committee*. Volume 11, 2002).

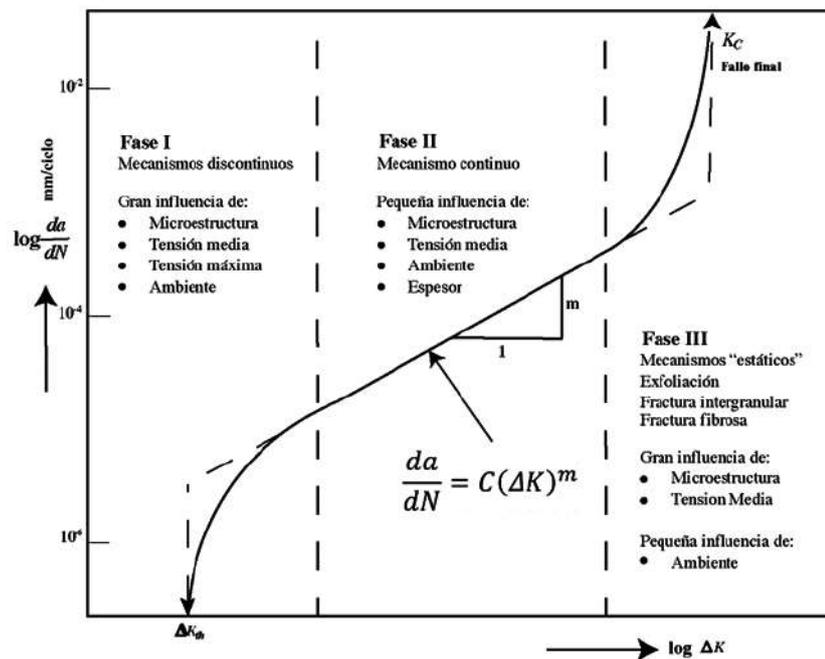
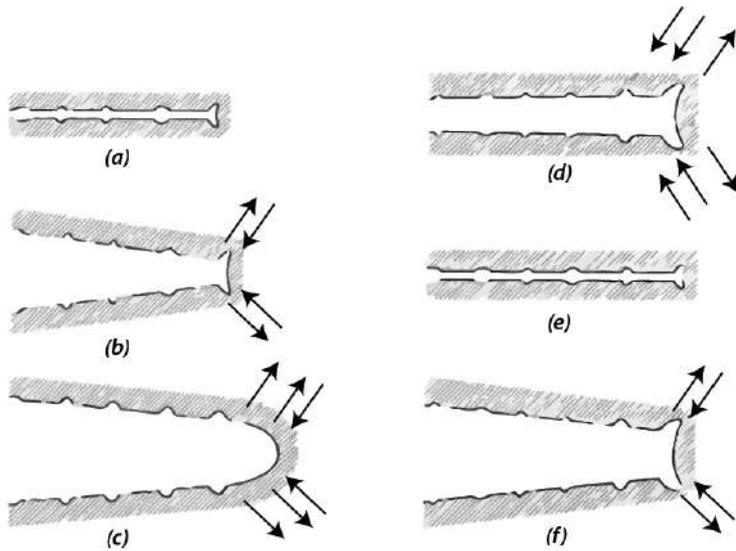


Figura 48. Curva característica de la propagación de una grieta en un material dúctil (González, 2004).

La fase 2 (parte central de la figura 48), se relaciona con el postulado propuesto por Paris, quien encontró que la gran mayoría de materiales lo cumplen. En esta región, la propagación de la grieta es influenciada por el ambiente y es independiente de la microestructura, de manera que, en este caso, hay una falla transgranular. Al ir creciendo la grieta, el factor de intensidad de esfuerzos aumenta en la misma proporción, creando deslizamiento de planos. Estos, a su vez, generan ondas llamadas *estriaciones definidas* (numeral 2.1.5), las cuales teóricamente representan la cantidad de ciclos de esfuerzos a los cuales fue sometido un componente. Su forma depende del tipo de aplicación de carga, como se muestra a continuación:

En la fase tres de la gráfica de Paris (figura 49, costado derecho), los modos estáticos de fractura van cambiando a las estriaciones de la superficie de fractura y, cuando se iguala o supera el esfuerzo crítico, el componente falla.



Esquema del proceso de plastificación y enromamiento del fondo de grieta en la fase II.  
a) Mínima tensión, b) tensión de tracción creciente, c) tensión de tracción máxima, d) inicio del descenso de la tensión, e) tensión mínima del nuevo ciclo, f) tensión de tracción creciente en un nuevo ciclo

Figura 49. Formación de estriaciones según el tipo de esfuerzo (Anderson, 2005).

## 2.11. Comportamiento de los materiales metálicos en fractura

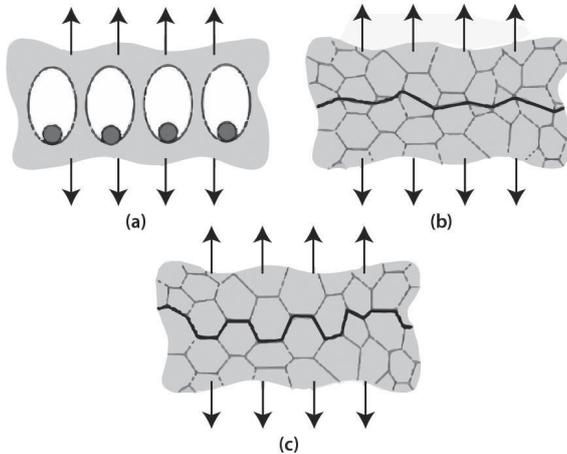


Figura 50. Mecanismos de fractura en metales: (a) fractura dúctil, (b) clivaje y (c) fractura intergranular (Anderson, 2005).

Es evidente que las zonas de falla de un componente coinciden con lo expresado por Paris, dentro de sus curvas características, sin embargo, no se ha dado a conocer cómo se comportan los materiales (en este caso metálicos) bajo la presencia de una grieta. En el presente apartado se darán a conocer los mecanismos que conllevan a la fractura de un componente y cómo estos mecanismos dejan huellas que pueden ser de ayuda para el investigador en un análisis de falla.

### 2.11.1. Fractura por clivaje

La fractura por clivaje está asociada con la propagación extraordinariamente rápida de una grieta, por la simple separación de los enlaces atómicos a lo largo de un plano cristalográfico determinado. Los planos preferentes de clivaje son aquellos que tienen la menor densidad de empaquetamiento, por tal razón depende del tipo de estructura cristalina del material: son más vulnerables las BCC o *estructura cúbica centrada en el cuerpo*. La justificación para este comportamiento está asociada con que el número de enlaces a separar es menor y la distancia interplanar es mayor.

Desde el punto de vista de la fractografía, una grieta puede crecer en un grano simultáneamente en dos planos cristalográficos paralelos. Las dos grietas paralelas crecen a lo largo de una línea, tanto como consecuencia de un clivaje secundario, como por cortadura, formando un escalón característico, como se muestra en la figura 51.

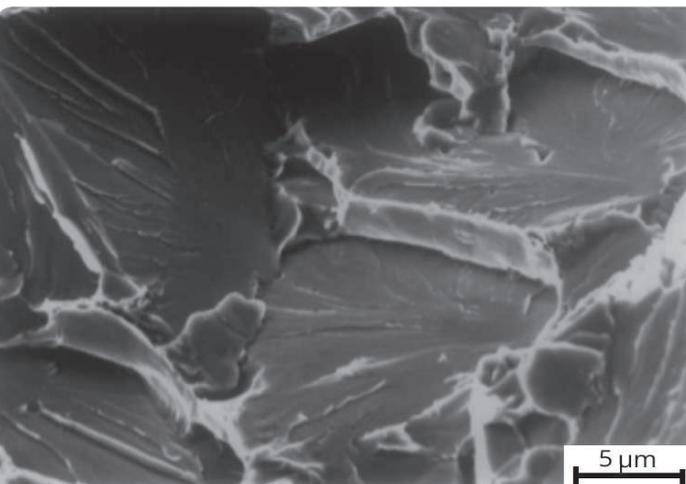


Figura 51. Fractografía por SEM de una aleación de acero (Anderson, 2005).

Un número de estos escalones de clivaje se pueden juntar para formar una especie de río con sus respectivos afluentes (figura 52) y, también, porque los modelos de ríos se forman a su paso por los límites de grano.

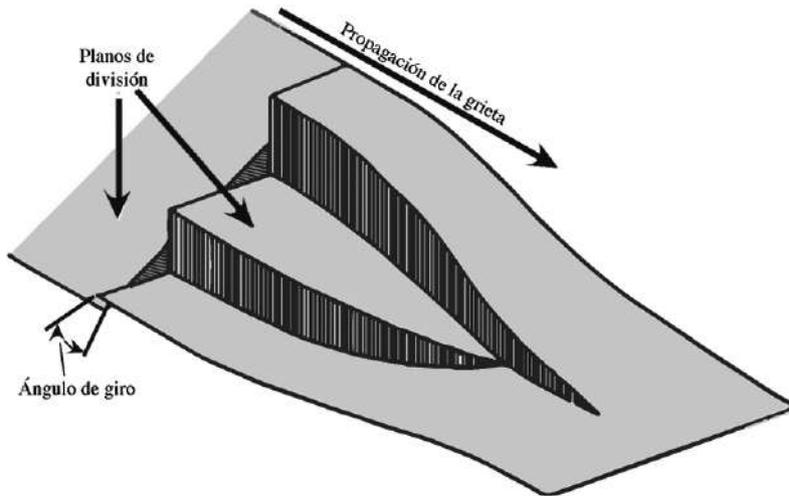


Figura 52. Formación de clivajes con forma de ríos al pasar a través de un límite de grano (Anderson, 2005).

### 2.11.2. Agrietamiento dúctil

Desde el punto de vista de la fractura dúctil, se mencionó en otro apartado que está asociado con una alta deformación. En este apartado se enuncia la forma como se presenta su crecimiento. La formación de microhuecos ocurre por crecimiento y coalescencia en frente de grieta.

Al asumir una pieza con una grieta y se somete a cargas, se inducen en el frente de grieta tensiones y deformaciones suficientes para que se produzca la nucleación de microhuecos (figura 53a). Estos microhuecos crecen con el enromamiento de la grieta (figura 53b), que en determinadas circunstancias se unen con la grieta principal (figura 53c). Este proceso es cíclico con la repetición continua de sollicitaciones.

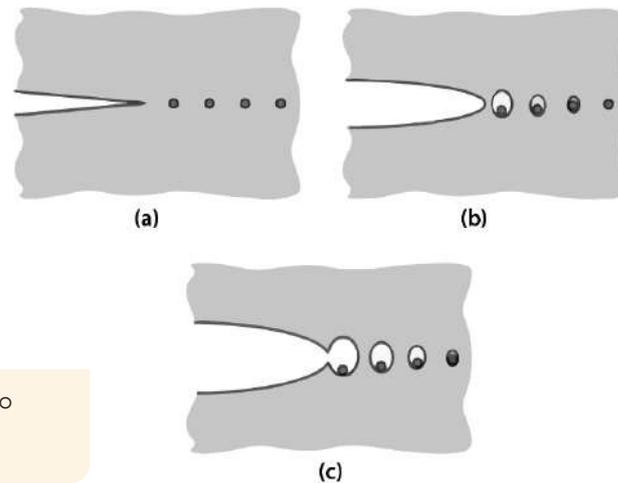


Figura 53. Mecanismo de crecimiento dúctil de grietas (Anderson, 2005).

### 2.11.3. Agrietamiento intergranular

En la mayoría de los casos, los metales no fallan a lo largo de los límites del grano. Los metales dúctiles generalmente fallan por la coalescencia de los huecos formados en las inclusiones y las partículas de segunda fase, mientras que los metales frágiles típicamente fallan por coalescencia transgranular. En circunstancias especiales, las grietas pueden formarse y propagarse a lo largo de los límites de grano. No existe un mecanismo único para la fractura intergranular, más bien, hay unas situaciones que pueden conducir a grietas en los límites de grano, tales como:

1. Precipitación de una fase frágil en el límite del grano.
2. Agrietamiento causado por el ambiente.
3. Corrosión intergranular.
4. Cavitación de los límites de los granos y agrietamiento a altas temperaturas

En la figura 54 se observa una falla de tipo intergranular en un elemento soldado en un tanque, donde fue sometido a un ambiente corrosivo por la presencia de amoníaco.

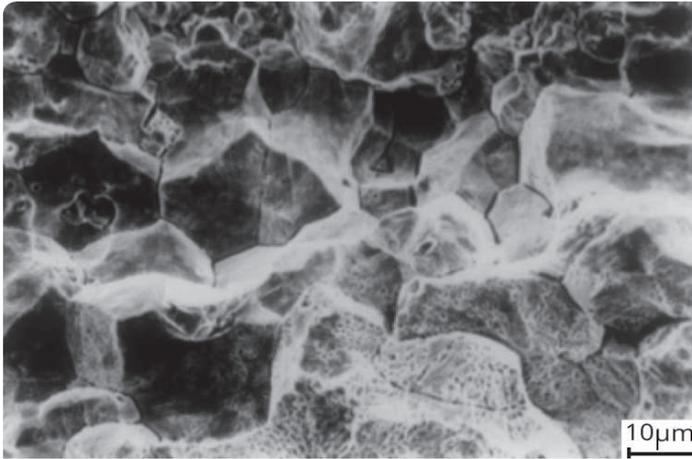


Figura 54. Falla intergranular (Anderson, 2005).

## 2.12. Aportes a los casos de estudio

Para este trayecto, se puede establecer el modo de falla principal y los modos de falla secundarios del colapso de la estructura. Para determinar dicha condición, se debe empezar con la inspección de la columna que inició la falla (figura 55).

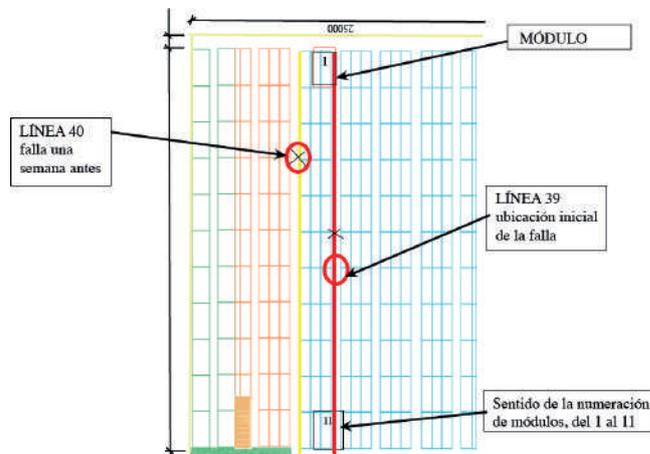


Figura 55. Plano en planta de la distribución de las estanterías. Fuente: elaboración propia.

En la figura 55, se muestra en un plano la distribución de las estanterías. En este caso se pudo establecer que el punto de inicio del colapso se sitúa en la línea 39 (parte central de la figura 55). Dicha información se verificó y corroboró con el video de seguridad y la figura 18 del presente documento. En dicha



Figura 56. Aplastamiento en columna de estantería. Inicio del colapso. Fuente: elaboración propia.



Figura 57. Columna línea 39, inicio del colapso. Fuente: elaboración propia.

posición se verificó la columna y los elementos que la componen, como se muestra en las figuras 56 y 57.

Posterior a la inspección de la columna afectada (figura 56), se verificó los anclajes, la tolerancia entre la viga (elemento amarillo) y la columna (elemento verde), los tipos de tornillos usados, la cantidad y el torque aplicado.

En la figura 57 se muestra desensamblada la columna afectada en la línea 39. Por inspección visual se puede observar un exceso de deformación plástica por compresión en la lámina, lo cual nos lleva a establecer el mecanismo de falla principal la deformación plástica. A su vez, se descarta el montaje inadecuado (desalineación) en esa línea de inicio de colapso y coloca este mecanismo de falla (figura 18) como consecuencia de la deformación plástica.

La falla se puede considerar súbita y como particularidad no presenta fractura (varios fragmentos de una sola pieza), por esta razón, no se requiere hacer fractografía sobre superficies de falla.

### 2.13. Conclusiones del trayecto

Desde el punto de vista de la mecánica clásica, el comportamiento de los materiales no cambia según la dirección de aplicación de carga. Su comportamiento mecánico estaría definido por la resistencia a la fluencia y la resistencia última a la tracción. Al estimar el comportamiento de un componente con discontinuidades o grietas, su comportamiento cambia y se estaría sujeto a factores como la tenacidad de fractura. Con esto se debe estimar el tiempo de falla del componente y los niveles de esfuerzo de falla correspondientes, los cuales están muy por debajo de los asumidos por la mecánica clásica.

## Trayecto 3

En el presente trayecto se abordan las técnicas que se pueden usar para el diagnóstico, seguimiento, control o evaluación de una falla. Con los conceptos tratados se contextualiza sobre el caso de estudio. La relación directa de los conceptos se muestra en el diagrama a continuación.



Figura 58. Relación de los conceptos del trayecto 3.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.1. ¿Cómo evaluar una falla?

Como se mencionaba en el trayecto anterior, una falla se puede propagar por muchos factores, que en ciertas ocasiones son muy difíciles de predecir y detectar a tiempo. Existen dos escenarios en los cuales se puede involucrar el ingeniero en esta instancia. En primer lugar, se puede detectar una



Figura 59. Secuencia general de análisis de falla. Fuente: elaboración propia.

anomalía en el funcionamiento del componente, por lo que se requiere determinar la técnica más apropiada para inspeccionar el elemento mecánico, establecer un procedimiento para la inspección por técnicas de ensayos no destructivos y determinar cuánto más puede soportar antes de que falle (tolerancia al daño). En segundo lugar, el profesional se puede enfrentar a un caso en el cual la máquina o componente falló y se debe determinar la causa de falla real. Para este propósito, el uso de técnicas de ensayos destructivos y no destructivos constituye la columna vertebral del análisis. En el presente trayecto se especifica la secuencia que debería llevar el investigador y las normas más frecuentes a usar en determinados casos.

En una primera instancia se dará a conocer las generalidades de las técnicas más conocidas para la detección de fallas destructivas y no destructivas, posteriormente se mostrarán algunas metodologías que se pueden implementar en caso de detección o determinación de una causa específica de falla.

## 3.2. Ensayos no destructivos

### 3.2.1. Definición y reglamentación

El uso de ensayos que permitan evaluar un componente sin necesidad de desensamblar o remover alguna parte ha llevado a la implementación de técnicas que, dependiendo la forma de aplicación, el método y la técnica, permiten determinar si un componente cuenta con las propiedades de integridad o debe ser reemplazado.

Un ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés *non-destructive testing*) es una prueba realizada al material de un componente sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, mecánicas, químicas o dimensionales.

Los END toman como base los principios físicos. De su aplicación se obtiene un diagnóstico del estado de aceptación

o rechazo del objeto inspeccionado. Los resultados por sí solos no constituyen un dictamen único y, por tal razón, deben ser interpretados por un profesional debidamente certificado en la técnica usada.

Con el fin de normalizar la forma como se realiza cada uno de los ensayos y los equipos usados en los ensayos no destructivos, instituciones a nivel local como el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), la Asociación Colombiana de Soldadura y Ensayos no Destructivos (Acosend), e internacionales como American Society for Testing and Materials (ASTM), la Asociación Española de Ensayos no Destructivos (AEND) o el Comité Internacional para Ensayos no Destructivos (ICNDT), han establecido normas y parámetros referentes a los ensayos no destructivos. Dentro de las más destacadas a nivel nacional se encuentran la NTC-3777, NTC-4179, NTC-2034, NTC-2120, entre otras. A continuación, se resumen algunas de estas técnicas y sus limitaciones.

### ***3.2.2. NTC-3777. Guía para la realización del ensayo radiográfico***

Esta norma considera el examen radiográfico satisfactorio con rayos X y rayos gamma, según se aplica en el registro con película radiográfica industrial. Cubre los tipos de materiales por inspeccionar, las técnicas de ensayo radiográfico, los métodos de producción, la selección, el procesamiento, la visión y el almacenamiento de película radiográfica.

### ***3.2.3. NTC-4179. Ensayos no destructivos de revestimientos por oxidación anódica sobre aluminio puro y aleaciones de aluminio, por medición de la admitancia***

Especifica un método para evaluar la calidad de los revestimientos por oxidación anódica sellados sobre aluminio puro

y sustratos de aleaciones de aluminio. Contiene la expresión de los resultados del ensayo e informe del ensayo.

#### *3.2.4. NTC-2034. Ensayos no destructivos. Calificación y certificación de personal*

Esta norma especifica la calificación y certificación del personal involucrado en ensayos no destructivos (END). Es aplicable a la competencia en uno o más de los siguientes métodos:

- Ensayos de emisiones acústicas
- Ensayos de corrientes de Eddy o Foucault
- Ensayos termográficos infrarrojos
- Ensayos de fugas (se excluyen los ensayos de presión hidráulica)
- Ensayos de partículas magnéticas
- Ensayos de líquidos penetrantes
- Ensayos radiográficos
- Ensayos de deformación
- Ensayos de ultrasonido

Ensayos visuales (se excluyen los ensayos visuales directos sin ayudas y los ensayos visuales realizados durante la aplicación de otro método de END).

#### *3.2.5. NTC-2120. Soldadura. Guía para la inspección de soldadura mediante ensayos no destructivos*

En esta norma se identifica el método principal de inspección que permite evaluar soldaduras y materiales relacionados sin perjudicar su utilidad, teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones del método de inspección, estándares de aceptación y sus costos asociados.

### 3.3. Tipos de ensayos no destructivos (NDT)

Una primera clasificación general de los ensayos NDT está relacionada con el tipo de falla que detecta. Se pueden encontrar discontinuidades superficiales y discontinuidades internas (subsuperficiales), cuyo resultado es la siguiente clasificación general:

#### 3.3.1. Inspección visual

Es el método más común con el que es posible obtener información inmediata de la condición superficial de los materiales, se relaciona con las dimensiones y con la presencia de discontinuidades, fallas dimensionales, de ensamble o de fabricación dentro de las piezas. El ensayo o inspección visual consiste en recorrer detenidamente la superficie con la ayuda de ciertos instrumentos, como lupa, linterna, espejo tipo odontológico, robots adecuados con cámaras, galgas e instrumentos de medición aplicables.

A pesar de ser el ensayo no destructivo más básico e intuitivo, es necesario tener cierta experiencia para su realización. Esto se puede lograr con la debida capacitación sobre el equipo a inspeccionar, saber el modo de funcionamiento, las cargas a las cuales está siendo sometido y los planos detallados de montaje. Un ejemplo para este tipo de ensayos es el evaluado en el numeral 2.3, figura 31, en la cual se especifica qué es una falla por corrosión debido a la forma típica de la falla y los residuos mostrados en la parte interna del tubo.



Figura 60. Clasificación de ensayos no destructivos usados en la detección de fallas. Fuente: elaboración propia.



Figura 61. Inspección visual en turbinas de aviación (<http://bit.ly/2LT8pkQ>).

### 3.3.2. Líquidos penetrantes

Esta técnica analiza una pieza a nivel superficial, obteniendo resultados sobre discontinuidades que la pieza presenta desde el exterior hacia el interior, como se muestra en la figura 58. El procedimiento general para el uso de esta técnica conlleva cuatro pasos a seguir:

1. Inicia con la limpieza y secado de la superficie: consiste en limpiar perfectamente la zona de interés a ser ensayada dejando las posibles discontinuidades libres de suciedad o materiales extraños y su posterior secado.
2. Aplicación del líquido penetrante (LP) y tiempo de penetración: cubrir la superficie de interés con el LP y dejar transcurrir el tiempo necesario para permitir que el LP se introduzca por capilaridad en las discontinuidades (el tiempo varía dependiendo de la humedad presente en el ambiente).
3. Limpieza intermedia: se removerá el exceso de LP de la superficie, evitando extraer aquel que se encuentra dentro de las fallas. Esta remoción podrá hacerse, según la técnica empleada, mediante lavado con agua, aplicando un emulsionante y posterior lavado con agua.
4. Aplicación del revelador: sobre la superficie ya preparada se colocará el revelador en forma seca o finamente pulverizada en una suspensión acuosa o alcohólica que, una vez evaporada, deja una fina capa de polvo. El resumen se puede mostrar en su respectivo orden en la imagen siguiente:

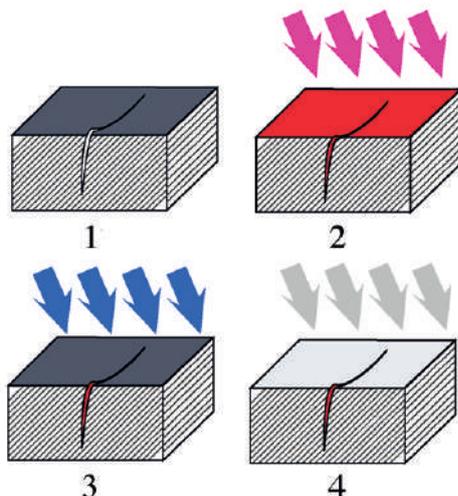


Figura 62. Fases en la aplicación de tintas penetrantes (<http://bit.ly/2LT8pkQ>).

La inspección y evaluación: esta fina capa de revelador absorberá el LP para mostrar las discontinuidades. Lo lleva a la superficie para hacerlo visible, ya sea por contraste o por fluorescencia (según la técnica empleada) las indicaciones podrán registrarse y evaluarse, como se muestra en la siguiente figura:

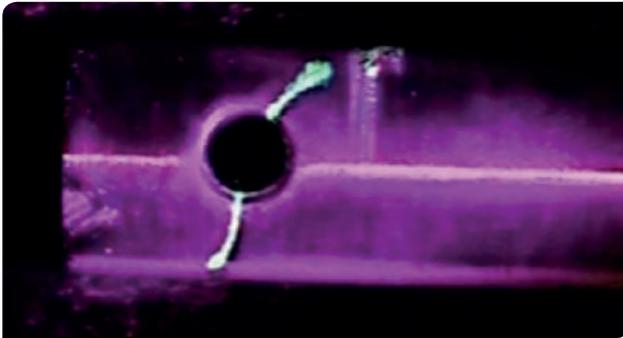


Figura 63. Falla detectada al contorno de un agujero por método de tintas penetrantes (<https://bit.ly/2MyuKsc>).

### 3.3.3. *Partículas magnéticas*

Es un método usado como técnica no destructiva en el sector industrial, con una gran aceptación por su versatilidad y su facilidad de aplicación en superficies amorfas. Permite la detección de discontinuidades en materiales ferromagnéticos de cualquier tipo, en la superficie o cerca de esta (fallas subsuperficiales), utilizando el flujo magnético dentro de la pieza para la detección de discontinuidades. Con este ensayo se puede lograr la detección de defectos superficiales y subsuperficiales (de hasta 3 mm debajo de la superficie del material).

El procedimiento usado para esta técnica inicia con generar un campo magnético en la pieza a inspeccionar. Posterior a esto, el componente se comporta como un imán, es decir, se crean en él dos polos magnéticos, sur y norte. Estos polos determinan la dirección de las líneas de flujo magnético, las cuales viajan de norte a sur. Al tener la pieza magnetizada (magnetización residual) y/o bajo la presencia constante del campo magnético externo (magnetización continua), se aplica el polvo de limadura de hierro seco o suspendido en un

líquido. Donde se encuentre una perturbación o una fuga en las líneas de flujo magnético, las pequeñas partículas de hierro se acumularán y formarán la indicación visible o fluorescente, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 64 Campo magnético en una pieza con grietas abiertas sobre la cara (<http://bit.ly/2LT8pkQ>).

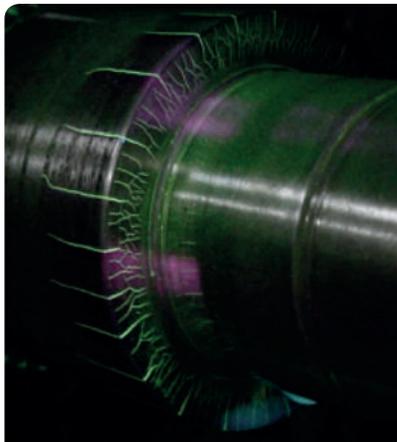
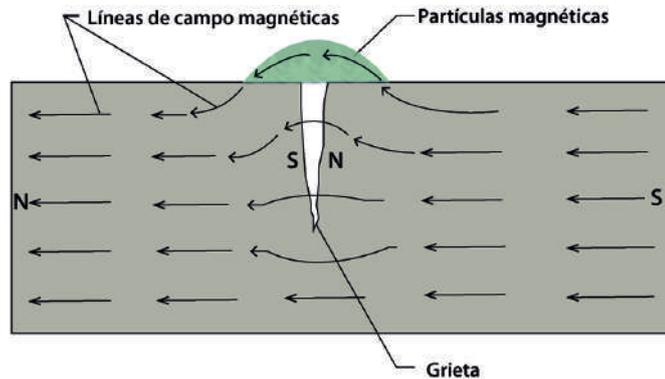


Figura 65. Falla detectada por partículas magnéticas en un cambio de sección de un eje (<https://bit.ly/2MyuKsc>).

En el caso particular de una pieza sometida a este tipo de ensayos, se podría obtener un resultado como se muestra en la figura siguiente:

Para el caso mostrado en la figura 60, se observa cómo las grietas se encuentran a nivel superficial, partiendo desde la superficie de contacto axial del eje y propagándose hacia el interior, todas en dirección axial. Es de destacar que como método de detección es muy eficiente y, a su vez, nos puede indicar qué tipo de esfuerzos puede estar causando la falla por la dirección de propagación.

### 3.3.4. Ultrasonido

Esta técnica de ensayos no destructivos se basa en la transmisión de longitudes sonoras de alta frecuencia en el interior del material para detectar imperfecciones. Se busca comparar las ondas emitidas y el desplazamiento en el tiempo para detectar las reflejadas. El resultado es la visualización de posibles alteraciones que indican imperfecciones.

Una de las grandes ventajas de este método es que se puede usar con cualquier tipo de material y el equipo usado para realizar la prueba es completamente portátil.

### 3.3.5. Corrientes de Eddy

El principio de funcionamiento son las corrientes eléctricas, las cuales son generadas en un material conductor por un campo magnético alterno. Posterior a esto, las interrupciones en las líneas de corriente eléctrica (corrientes de Eddy) que se deben a la existencia de imperfecciones producirán cambios en el campo magnético inducido.

Este método de ensayo no destructivo es muy útil y eficiente para materiales conductores, puesto que puede detectar fallas internas. Un ejemplo típico de este tipo de ensayos puede ser consultado en el siguiente enlace: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Graphics/Flash/WheelMovie.html>.

### 3.3.6. Rayos X

Los rayos X son una forma de transferencia de energía. La energía que viaja a la velocidad de la luz en el vacío puede penetrar en los materiales que absorben o reflejan luz. Los rayos X pueden producir una imagen en películas fotosensibles que pueden visualizarse mediante el revelado, como se muestra a continuación:

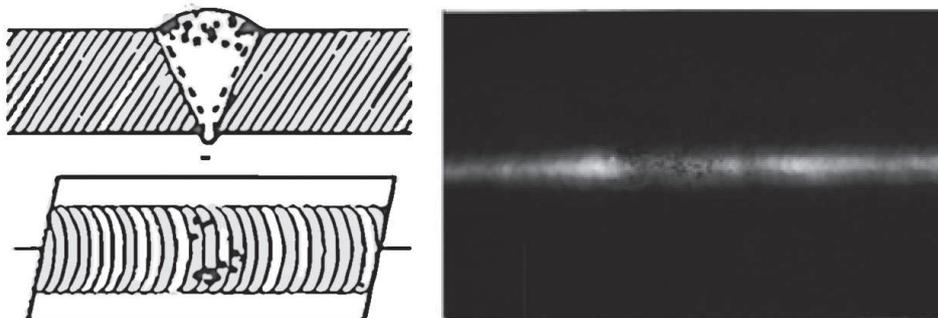


Figura 67. Visualización de ensayo no destructivo por rayos X en un cordón de soldadura (<https://bit.ly/2OkyZsn>).



Figura 66. Equipo de ultrasonido usado para la medición de espesores en tuberías de petroleras (<https://bit.ly/2xjWp9O>).

El uso de esta técnica es común en la inspección de soldaduras en la actualidad debido a sus amplias ventajas, las cuales se relacionan a continuación:

- Es apta para casi todo tipo de materiales.
- La dirección del haz no es afectada por la geometría de la pieza.
- No requiere patrón de calibración.
- Se puede usar en campo.

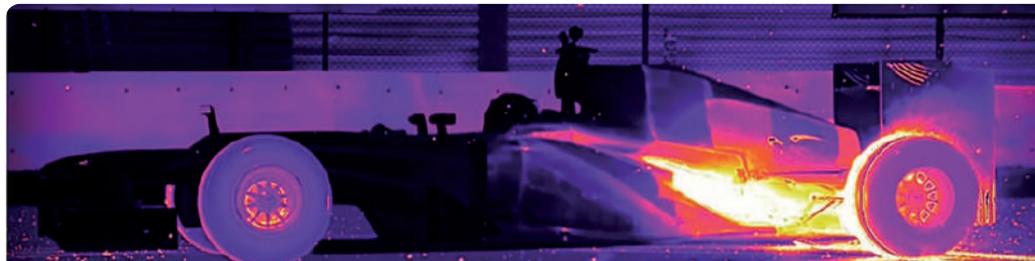
La técnica puede tener ciertas limitaciones con la identificación de la falla y su aplicación, tales como:

- Peligro de irradiación.
- No indica la profundidad del defecto.
- Profundidad de penetración limitada.
- Requiere acceso de ambos lados.

### 3.3.7. Termografía

Es una técnica no destructiva que permite medir, a través de una cámara termográfica, la temperatura de una superficie y localizar con precisión las pérdidas y demandas de energía. Extiende la visión humana al espectro infrarrojo y permite la obtención a distancia de imágenes térmicas o termogramas de la superficie de los objetos examinados, como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 68. Inspección por cámara termografía sobre vehículo Formula 1 (<https://bit.ly/2x99qAJ>).



Algunas de las ventajas más importantes de este tipo de ensayo son:

- Reducir riesgos (a personas, equipos, infraestructuras).
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Mejoras en la calidad.
- Proporciona imágenes y datos en tiempo real.

### 3.4. Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos son aquellos en los cuales el material de prueba no se podrá utilizar posteriormente. Este tipo de ensayos se suelen realizar para comprobar las condiciones de un material antes de construir una pieza y tener la certeza de que va a soportar las sollicitaciones a las cuales fue diseñado. Se puede usar también para corroborar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza que ya falló y se debe buscar el origen de la falla.

En la evaluación de los ensayos destructivos encontramos una primera clasificación por el tipo de carga recibida:

- Ensayos estáticos
- Ensayos dinámicos

El ensayo estático es aquel en el cual la fuerza que actúa sobre la pieza en estudio es constante y la velocidad de aplicación es muy baja. Los ensayos de dureza, tracción, fluencia, torsión, compresión, flexión y pandeo son ejemplos de lo anterior. Cada uno de dichos ensayos se realiza sobre una norma en la cual se fijan las velocidades de aplicación de carga, la geometría y la interpretación de los datos.

En el caso de los ensayos dinámicos se busca realizar variaciones de carga en el tiempo, lo que permite evaluar esfuerzos fluctuantes y la modificación de su capacidad en el tiempo.

Dentro de los ensayos más conocidos existe el ensayo de fatiga y el de desgaste.

Para cada caso de análisis es probable que se requieran cantidades y tipos de ensayos diferentes, puesto que, dependiendo del mecanismo y sus modos de falla, se deben verificar diferentes aspectos, como las propiedades mecánicas, térmicas, etc. A continuación se mencionan algunos de los ensayos destructivos más usados en la industria para la solución de casos de falla:

### 3.4.1. *Ensayo de tensión*

Consiste en someter a una probeta de un material determinado a un esfuerzo perpendicular a la sección transversal (esfuerzo normal), provocando un alargamiento de las fibras. Este tipo de ensayo está normalizado según el documento ASTM E-8, en donde se especifican las dimensiones de las probetas, su geometría (cilíndrica y plana), las características de la máquina a realizar el ensayo y las variables a medir, como se muestra en la figura 68.



Ensayos destructivos más usados.  
Fuente: elaboración propia.

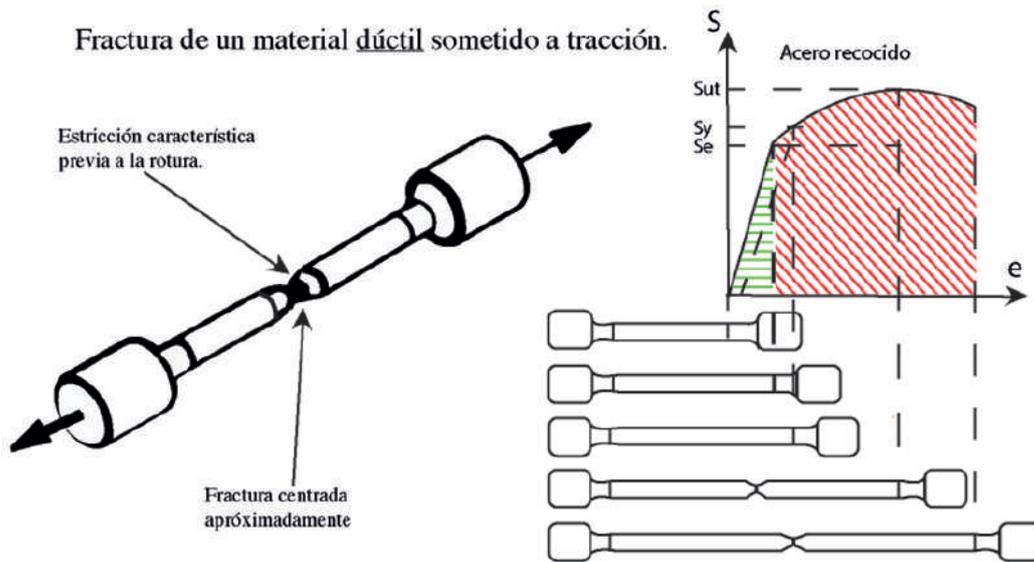


Figura 70. Comportamiento de un material dúctil en un ensayo de tensión (Marín, 2008).

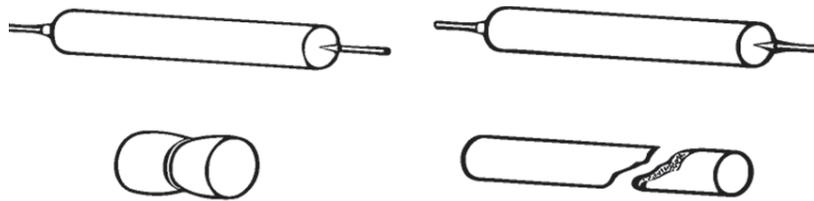
Por medio de este ensayo se pueden definir muchas propiedades del material, tales como resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, ductilidad, límite elástico, entre otros, como se muestra en la gráfica anterior.

### 3.4.2. Ensayo de compresión

En teoría, la prueba de compresión es simplemente lo opuesto a la prueba de tensión con respecto a la dirección de carga. En un ensayo de compresión se comprime la muestra mientras se registra la carga y el desplazamiento, en busca de las propiedades mecánicas que incluyen la tensión de fluencia en compresión ( $s_{yc}$ ), el esfuerzo final compresivo y el módulo de elasticidad en compresión.

La mayor parte de los materiales dúctiles tienen una resistencia a compresión similar a la de tracción (uniforme), como los aceros al carbono, las aleaciones del cobre, las aleaciones ligeras, etc.

Figura 71. Comportamiento de un material dúctil y frágil sometido a un ensayo de compresión (Marín, 2008).



Aunque no es un ensayo típico practicado a los metales, es útil conocer la forma como falla un material dúctil (izquierda de la figura 71) y la falla mostrada por un material frágil (derecho de la figura 71). Puesto que, al evaluar una falla, puede mostrar huellas claras que nos indica el comportamiento final antes de colapsar.

### 3.4.3. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se considera un ensayo no destructivo porque existen diferentes métodos y equipos que no modifican el componente estudiado para realizar la prueba. Sin embargo, en este trayecto se considera un ensayo destructivo porque se relaciona con el análisis de falla de un componente. En este escenario se pretende evaluar en muchos casos la condición de los procesos posteriores a la fabricación, como el endurecimiento por deformación, la profundidad de un temple o la dureza superficial obtenida en un cementado. Por lo anterior, se considera destructivo puesto que es necesario remover un segmento de la pieza y realizar varias mediciones, a fin de determinar la curva de dureza.

El ensayo de dureza se realiza con el fin de verificar la resistencia de un material a ser penetrado, por lo que se debe usar un equipo que permita el uso de diferentes escalas dependiendo la clase de material. La dureza Rockwell, o ensayo de dureza Rockwell, es el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de indentadores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. Un equipo asociado a esta práctica se muestra a continuación.

La ASTM E10 está diseñada como método de prueba estándar para la dureza en materiales metálicos. En dicha norma se especifican los criterios para la prueba de dureza Brinell, la cual es otra escala usada comúnmente en la industria. Dicha escala permite obtener datos claves de las propiedades mecánicas de un componente, como la resistencia a la tracción, resistencia al desgaste y la ductilidad.

#### 3.4.4. *Ensayo de fatiga*

El ensayo de fatiga consiste en someter a una probeta de dimensiones y condiciones de fabricación normalizadas (ASTM E466, E467, E468) a unas cargas que varían en el tiempo, durante un número determinado de ciclos (N) hasta lograr su colapso o falla. Este tipo de ensayos se realizan en equipos como el que se muestra en la figura 73.

Como se observa, es un equipo para realizar ensayos de fatiga en viga rotativa, consiste en ubicar una serie de pesas en el extremo de un eje que se encuentra en rotación con el fin de cambiar su condición de carga en el tiempo.

Cabe destacar que este tipo de ensayos se realiza con el objetivo de obtener el límite de resistencia a la fatiga teórico ( $S_e$ ), el cual difiere de las condiciones reales de un componente de máquina, puesto que no se tienen en cuenta condiciones



Figura 72. Durómetro universal para ensayos de dureza en escala Rockwell (<https://bit.ly/2Ps3rhM>).



Figura 73. Máquina de ensayos de fatiga en viga rotativa (<https://bit.ly/2Lh3t98>).

asociadas a la temperatura, forma, fluctuaciones de carga o condiciones climáticas (corrosión).

Es por tal motivo que se aconseja realizar ensayos de fatiga con elementos, componentes o máquinas a escala real, evaluando condiciones de funcionamiento hasta fallar, como se muestra en el siguiente video: [https://www.youtube.com/watch?v=B74\\_w3Ar9nI](https://www.youtube.com/watch?v=B74_w3Ar9nI).

Por tanto, el ensayo de fatiga bajo condiciones reales es considerado muy costoso e involucra una infraestructura muy amplia en términos de instrumentación y sensorica. Por tal razón se recomienda tomar en consideración los datos de ensayos teóricos y ajustarlos según las condiciones propias del componente a diseñar o analizar.

### 3.4.5. *Ensayo metalográfico*

Es un ensayo destructivo que parte de una probeta o varias, dependiendo del análisis en el que se pretende visualizar la estructura cristalina del material, a través del microscopio. Para lograr esta visualización se requiere llevar la muestra a un acabado *tipo espejo* y atacar con ácido en una proporción específica. La norma que rige este tipo de ensayos es la ASTM E3 y dentro de la documentación de referencia está *ASM Handbook. Volume 9. Metallography and microstructures (ASM International, 2004)* y *ASM Handbook. Materials characterization*.

Es importante destacar que este tipo de ensayos busca caracterizar el material a nivel microestructural y, por tal razón, es necesario conocer de antemano la forma cristalina o la matriz esperada. Cuando no se conoce el tipo de material ensayado, se puede acudir al *ASM Handbook. Volume 10. Materials characterization (ASM International, 1986)* y comparar con las fractografías de referencia.

### 3.4.6. Ensayo de fractura

El ensayo de fractura se realiza con el fin de determinar las condiciones críticas que permiten la fractura súbita de una pieza que se somete a tensión uniaxial. Este tipo de ensayo se puede realizar con el mismo equipo con el que se hacen los ensayos de tensión, sin embargo, se deben considerar unas dimensiones especificadas en la norma ASTM E399-81, en la cual se caracteriza el espécimen y se define cómo se debe realizar una muesca mecanizada y una ampliación de la grieta, mediante fatiga axial, lo que define una dimensión de grieta inicial de ensayo de un valor  $a$ .

En la figura 74 se muestra la probeta del ensayo a fractura, así como su montaje (en este caso, para realizar apertura de grieta por flexión). Este tipo de ensayo requiere una probeta mucho más elaborada en comparación con los otros ensayos y es obligatorio realizar un preagrietamiento (*precracking*).

## 3.5. Aportes al caso de estudio

En este caso en particular es necesario conocer en primera instancia el comportamiento de los materiales con los que fue construida la estructura, por tal razón, se debe buscar las normas locales e internacionales que rigen la construcción de estanterías de lámina delgada y el tipo de ensayos que se recomiendan. A nivel local está la norma NTC 571 y a nivel internacional se cuenta con RMI 2008 (por la fecha en la cual sucedió el colapso). En estas normas se establecen las características mecánicas mínimas de comportamiento de los aceros. En el presente apartado se describe una serie de ensayos.

Cabe destacar que los ensayos que se muestran en la figura 75 son en su totalidad destructivos, puesto que, debido a las grandes deformaciones que tuvieron las estructuras afectadas, no se justifica realizar ningún tipo de ensayo no destructivo. Es

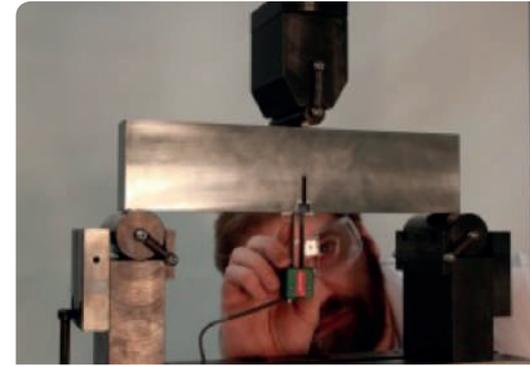


Figura 74. Ensayo de tenacidad de fractura (<https://bit.ly/2wismvE>).

posible que los resultados obtenidos se afectaran como consecuencia del evento y no como falla antes del suceso. Los resultados que se muestran a continuación fueron realizados con materiales que hicieron parte del colapso de zonas afectadas y no afectadas.



Figura 75. Ensayos realizados a la estantería. Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1. Ensayo de composición química

Elemento	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
wt%	99,42	0,1483	0,1026	0,1311	0,0289	0,0133	0,0273	0,0000	0,0000	0,0208
	99,40	0,1412	0,0984	0,1285	0,0260	0,0137	0,0257	0,0000	0,0000	0,0225
	99,41	0,1333	0,1001	0,1257	0,0257	0,0127	0,0259	0,0000	0,0000	0,0243
	99,43	0,1559	0,1004	0,1289	0,0244	0,0143	0,0259	0,0000	0,0000	0,0196
	99,43	0,1527	0,1012	0,1320	0,0304	0,0139	0,0256	0,0000	0,0000	0,0197
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio	99,41	0,1463	0,1005	0,1292	0,0271	0,0136	0,0261	0,0000	0,0000	0,0214
Desvest	0,01	0,0091	0,0015	0,0025	0,0025	0,0006	0,0007	0,0000	0,0000	0,0020

Figura 76. Composición química de tramo de estantería fallada. Fuente: elaboración propia.

En la figura 76 se muestra la composición química obtenida de un tramo de acero de la zona más afectada de la estantería. Se seleccionó un tramo de dicha zona con el fin de tomar la condición más desfavorable del lote. Como se puede observar, es un acero al carbono de baja aleación porque el promedio del contenido de carbono es de 0,15 % y no contiene porcentajes elevados de aleantes, como Cr, Ni o Mn, el cual se equipará con un acero ASTM A36.

Nota: cuando no se tiene claro la relación de los aleantes y el tipo de material que se está examinando, se pueden usar herramientas en línea como la siguiente: <http://www.totalmaterial.com/page.aspx?ID=TotalMetals&LN=ES>. Allí se puede realizar un filtro de los diferentes materiales normalizados en función de la composición química, de esta forma se pueden filtrar los resultados y obtener de manera precisa el material que se está examinado.

Se concluye que es un acero apto para este tipo de aplicaciones, puesto que la norma RMI, citada en el Trayecto 1, menciona el uso de este tipo de materiales en la manufactura de estanterías.

### 3.5.2. *Ensayo de tensión*

Para este caso en particular, la ASTM E8 (normas para el ensayo de tensión) especifica unas dimensiones de acuerdo con el tamaño de probeta disponible (para este caso, la más pequeña). Posterior a esto, se puede realizar la prueba en una máquina de ensayos universales, cuyos datos se exponen en la figura 77.

Los resultados de este ensayo muestran que la resistencia a la fluencia, el porcentaje de elongación y la resistencia última a la tensión están dentro de los rangos esperados para un acero ASTM A36.

Resultados							
Probeta	Diámetro o ancho (mm)	Espesor (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Carga máxima (kN)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Reducción de área (%)	Ductilidad (%)
1	12,490	1,963	440,169	10,792	275,927	49,286	32,450
2	12,531	2,003	435,386	10,928	282,273	51,043	28,452
3	12,129	2,001	425,997	10,339	274,738	45,427	27,145
4	12,158	1,973	446,061	10,700	285,819	49,833	21,284
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
Promedio:	12,327	1,985	436,903	10,690	279,689	48,897	27,333
Desv. Estd.							
Coef de Var (%)	0,213	0,020	8,481	0,252	5,257	2,427	4,621
Incertidumbre con 95 % de confiabilidad	1,727	1,011	1,941	2,356	1,880	4,964	16,907
	(+/-):0,025	(+/-):0,025	(+/-):3,156	(+/-):0,005	(+/-):3,568	(+/-):0,652	(+/-):0,002

Figura 77. Resultados de ensayo de tensión en probeta plana.  
Fuente: elaboración propia.

El anterior argumento se basa en la comparación con las propiedades encontradas en los libros de diseño o resistencia de materiales y que se muestran a continuación:

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS nro.	SAE y/o AISI nro.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 in, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	CD	330 (48)	280 (41)	20	55	86
		HR	300 (43)	170 (24)	30	45	95
G10100	1010	CD	370 (53)	300(44)	28	50	95
		HR	320 (47)	180 (26)	20	40	105
G10150	1015	CD	390 (56)	320 (47)	28	50	101
		HR	340 (50)	190 (27.5)	18	40	111
G10180	1018	CD	440 (64)	370 (54)	25	50	116
		HR	400 (58)	220 (32)	15	40	126

Figura 78. Propiedades de los materiales (Budynas-Nisbett, 2016).

### 3.5.3. *Ensayo de compresión sobre perfil armado*

Se realizó un ensayo de compresión en máquina universal, con el fin de determinar el comportamiento del perfil armado. Este tipo de perfiles pueden sufrir diferentes modos de falla por su tipología de lámina delgada y su geometría, por tal razón es necesario conocer su forma de falla y su carga máxima. El montaje realizado es el mostrado en la figura 79.

### 3.5.4. *Conclusiones al caso de estudio*

Con los ensayos destructivos se pudo establecer el comportamiento mecánico del perfil de la estantería y corroborar el material con el cual se construyó. Se pudo establecer que cada columna puede soportar una carga máxima de 7,4 KN bajo condición de compresión y que el material coincide con lo establecido en la norma.

En esta etapa del estudio se estaría cubriendo la caracterización del material y se podría empezar a formular hipótesis de falla preliminares, pero, para efectos del presente ejemplo, no se efectuarán.

### 3.5.5. *Conclusiones del trayecto*

Hay diferentes tipos de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, para determinar una falla o su alcance. Es criterio del ingeniero delimitar el uso de unos u otros, dependiendo de la aplicación específica, el alcance del estudio y la facilidad para efectuarlos.

Es evidente que ningún ensayo por sí solo puede definir la aceptación o el rechazo de un componente. Por tal razón se debe comparar y tener una base sólida teórica sobre la forma de funcionamiento, las sollicitaciones a las cuales está sometido y la forma como se comportan los materiales con que está construido (caracterización).



Figura 79. Comportamiento del perfil de estantería en compresión.  
Fuente: elaboración propia.

Para realizar los ensayos destructivos y no destructivos, se debe seleccionar dos puntos de referencia en lo posible, pueden ser de la zona afectada y un elemento de referencia, o de un componente fallado y uno nuevo.

## Trayecto 4

En este trayecto se explican las técnicas para el desarrollo de un análisis de falla (evaluación del mecanismo de falla) y un análisis causa raíz (RCA). El lector encontrará en este trayecto la descripción de los pasos que se deben realizar para entregar un informe final, con la información que sustenta por qué se presentó la falla o quién la causó. Las relaciones de los conceptos a tratar se expresan a continuación:

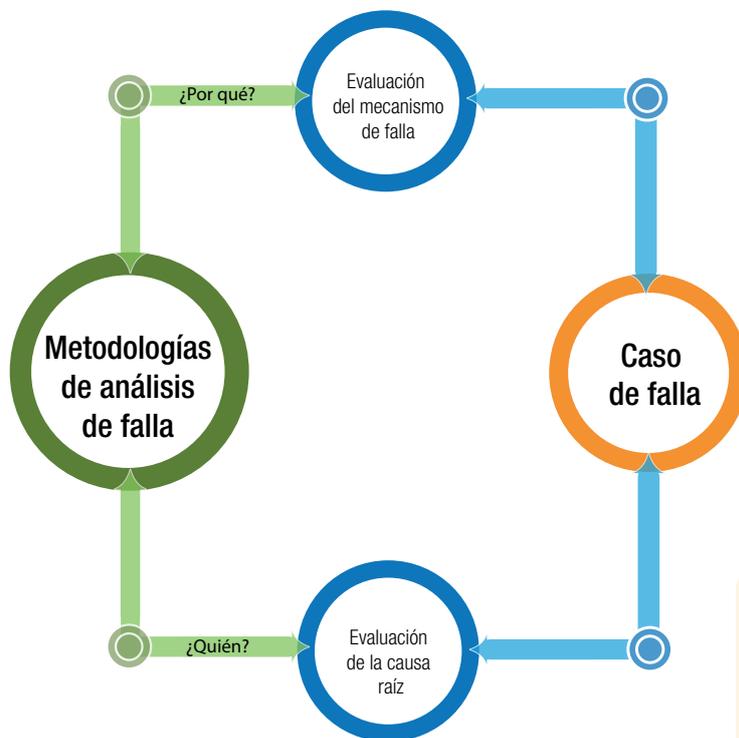


Figura 80. Diagrama de los conceptos a tratar en el trayecto 4. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1. Metodologías en el análisis de fallas

En este trayecto se explican algunas técnicas para el desarrollo de un análisis de falla. No existe un único método para dar respuesta a un análisis de falla. Se pueden tener enfoques diferentes de los análisis realizados por personas de diferentes compañías sobre un mismo caso, teniendo en cuenta la preponderancia de factores técnicos y económicos.

La metodología aplicable también depende del acceso que se tenga a la información, a los equipos de ensayos para realizar el estudio o el costo de todo ello para un caso en particular. Un ejemplo típico de esta situación se da cuando se trata de dar soluciones en sitio y es imposible retirar el componente para hacer ensayos especializados, por lo que se debe confiar en la experticia del ingeniero que realice una buena inspección visual y busque anomalías asociadas al montaje u operación. Es claro que existe la posibilidad de que en este proceso de investigación se omitan elementos que a simple vista no se vean y pudieren haber incidido en la falla.

Existen metodologías complementarias que permiten llegar a un resultado más confiable y que consideran un orden específico para la recolección y el análisis de la información. Una consideración inicial es el *análisis del mecanismo de falla*, el cual busca encontrar el dispositivo físico y los modos de falla presentes. Una segunda metodología es el análisis de causa raíz, la cual busca los orígenes fundamentales de la falla (Scutti, Mcbrine y Corporation, 1990)

Por lo general, las dos metodologías son complementarias. La primera requiere de equipos y ensayos especializados para determinar los modos y los mecanismos, y es un proceso que involucra áreas interdisciplinarias. El segundo caso es un proceso interno en el que se toman los datos y los cálculos realizados en la primera metodología.

### 4.1.1. Análisis del mecanismo de falla



Figura 81. Etapas y actividades en un análisis de mecanismo de falla.  
Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que cada una de las fases mostradas en la figura 81 hacen parte de los trayectos que se han desarrollado en el transcurso del módulo y con ellos se busca enlazar los conocimientos adquiridos en las primeras etapas y generar una estrategia que le permita al profesional afrontar un análisis de falla y llevarlo a buen término.

### 4.1.2. Recopilación de información

Es una de las etapas más importantes del análisis de fallas. En ella se define el punto de partida y el alcance del análisis. Por lo general, se podría llegar a obtener información desde dos puntos de vista, la información relacionada con el diseño y la información del usuario final.

En el caso de la información relacionada con el diseño, se buscaría obtener como mínimo la ficha técnica del equipo y el *dossier* de fabricación, donde se especifiquen los materiales con los cuales fue construido, las memorias de cálculo y los procedimientos de manufactura, montaje y manual de mantenimiento. En cuanto a la información del usuario final, se deben obtener las bitácoras de operación, la carga a la cual fue

sometida y el manual de mantenimiento con las acciones correctivas y preventivas realizadas en el equipo, en un periodo mínimo de seis meses previos a la falla.

La información antes mencionada haría parte de un estándar para la ejecución de un análisis de falla y no siempre aplica el mismo tipo de información. El profesional encargado debe verificar inicialmente el alcance del análisis y la información que se debería pedir en función del tipo de caso.

#### *4.1.3. Determinación de los modos de falla presentes*

Para la determinación de los modos de falla de la máquina, componente o estructura, es necesario realizar diferentes ensayos, los cuales van desde el más básico (inspección visual) hasta el uso de equipos especializados, como microscopios de fuerza atómica o espectrografías. Es importante destacar que el tiempo inmediatamente posterior a la falla se considera como el momento más importante para la recolección de evidencia. La inspección visual aquí podría ofrecer información valiosa que se podría perder en el momento de desensamble o limpieza del área de la falla.

En muchas ocasiones el uso de instrumentos que permitan lograr maximizar la visualización de la falla se hace imposible en campo (lupas, microscopios, estereoscopios), por lo que se recomienda realizar un registro fotográfico detallado de la zona de falla y de los lugares adyacentes con el fin de tener un punto de comparación al momento de verificar toda la información.

En las fallas que involucren corrosión se debe tener especial cuidado en la recolección de muestras, puesto que los residuos en la zona de falla se deben recoger para realizar un ensayo de composición química. Por lo general, este tipo de residuos se pierden luego de una limpieza a la zona de falla.

En casos en los cuales no se puede realizar la inspección en sitio y se deban desplazar las piezas afectadas, es necesario que se realice un protocolo de cadena o custodia de evidencia; se debe especificar la forma de embalaje y almacenamiento de las muestras, con el fin de evitar golpes que afecten detalles importantes para el estudio o que el medio ambiente modifique la superficie. Es común que tenga que realizar un levantamiento dimensional para comparar con las memorias de cálculo y los planos de fabricación, o realizar ensayos destructivos y no destructivos. Dichos procedimientos se describen a continuación.

#### *4.1.4. Levantamiento metrológico*

En este procedimiento se busca dimensionar las zonas en las cuales se considera relevante, con el fin de comparar posteriormente con los planos detallados. Es posible que, para el momento en el cual se realiza el levantamiento dimensional, no se cuente con planos detallados de la pieza, máquina o estructura afectada, por lo que es necesario colocar instrumentos de medición al lado de las piezas afectadas y tomar fotografías para obtener un factor de escala.

#### *4.1.5. Ensayos no destructivos*

Como se especificó en otro trayecto del presente módulo, hay diferentes tipos de ensayos no destructivos. Su uso está limitado según su condición, geometría y tipo de falla a inspeccionar. Es importante destacar en este punto que el uso y selección de cualquier técnica de ensayo está también limitado por la facilidad de acceso, pues las posiciones de la pieza, las condiciones de montaje o las condiciones de falla afectan la recolección de las muestras. Esto puede requerir en algunos casos el corte de piezas para la extracción de muestras.

#### 4.1.6. *Ensayos destructivos*

Los ensayos destructivos se realizan en las zonas de interés de la falla. Se debe tener un punto de comparación y, para ciertos ensayos, se debe tomar una zona no afectada para obtener las condiciones normales del material. Un ejemplo de esto son los ensayos de tensión.

Una de las preguntas frecuentes que se puede hacer el investigador es ¿en dónde realizar los cortes para los ensayos? Es importante destacar que se debe tener un punto de comparación para los resultados y por esto se puede seleccionar una zona de referencia (no afectada por la falla) y el área fallada. La cantidad de ensayos puede variar dependiendo del material disponible y los recursos económicos asociados al estudio.

### 4.2. Validación de materiales y procesos de manufactura

Para la validación de materiales es común usar probetas, las cuales son pulidas y atacadas químicamente con el fin de hacer metalografías y detectar ciertos aspectos propios del comportamiento del material a la falla. Las microgrietas o picaduras por corrosión son fenómenos que no se pueden detectar mediante ensayos no destructivos, pero por metalografía se pueden evidenciar estos fenómenos y su forma de propagación. Las fallas intergranulares, transgranulares o la generación de microvacíos son fenómenos que se pueden observar usando esta técnica, la cual definirá el comportamiento del material y las sollicitaciones a las que estuvo expuesto.

#### 4.2.1. *Determinación de los mecanismos de falla*

En esta etapa el investigador o grupo interdisciplinario debe correlacionar los resultados obtenidos en los numerales anteriores para determinar el mecanismo de falla completo. La técnica común es encadenar los modos de falla detectados

y asociarlos al primer modo de falla que apareció, como deficiencias en diseño, material, fabricación, transporte, montaje o mantenimiento.

Con los hallazgos encontrados se debe realizar la verificación de las solicitaciones teóricas y reales, las geometrías contempladas en el diseño y las encontradas en el momento de la falla, las propiedades mecánicas, las teorías asumidas en las memorias de cálculo y las encontradas en los ensayos de los materiales (tensión, flexión, etc.), lo cual permite determinar el factor de seguridad real con el que estaba trabajando la pieza o componente.

#### *4.2.2. Elaboración de informe*

Aunque no existe una plantilla definida para la presentación de un informe de falla, se deberían considerar como mínimo los siguientes aspectos:

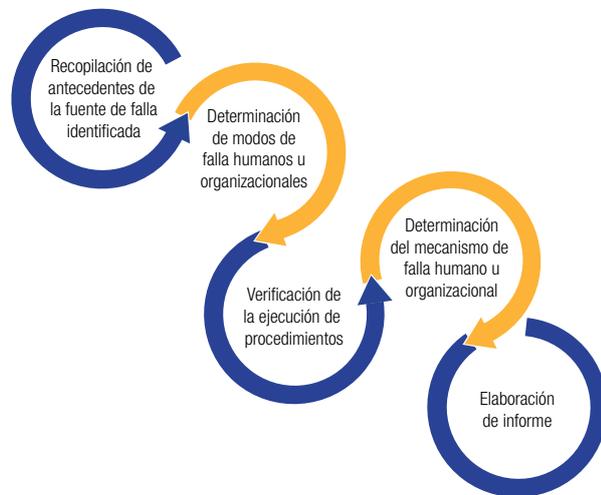
- Identificación del componente fallado: por lo general se realiza una descripción general del evento de falla, se agregan fotografías del equipo antes y después de la falla y la placa de identificación.
- Antecedentes: un resumen del historial de mantenimiento preventivo y correctivo realizado, así como información relevante del funcionamiento del equipo.
- Modos de falla detectados en el estudio: se consignan los resultados de los ensayos practicados a la pieza, así como un registro detallado de las áreas inspeccionadas y los hallazgos encontrados.
- Cálculos realizados en donde se compare las condiciones de diseño y reales.
- Conclusiones
- Recomendaciones

### 4.3. Análisis de causa raíz

El análisis de causa raíz o *root cause analysis* (RCA) es una metodología que busca identificar el mecanismo de falla humano u organizacional (ASM International, 1986).

Para realizar el análisis de causa raíz a fondo, se debe ir más allá de los componentes físicos de la falla o raíces físicas y analizar las acciones humanas o raíces humanas que desataron la cadena causa-efecto que llevó a la causa física, lo cual puede estar relacionado con procedimientos incorrectos, especificaciones equivocadas o a la falta de capacitación, lo cual puede sacar a la luz raíces latentes, es decir deficiencias en el gerenciamiento que, de no corregirse, pueden hacer que la falla se repita nuevamente ([www.mantinimientomundial.com](http://www.mantinimientomundial.com)). Algunos aspectos para tener en cuenta en la realización de un estudio de este tipo son:

Figura 82. Etapas y actividades en un estudio de causa raíz (Espejo Mora y Hernández Albañil, 2017).



Es evidente que las etapas que se muestran en la figura 82 tienen el mismo consecutivo que el mostrado en la figura 81, sin embargo, las presentadas en la figura 82 están enfocadas a determinar los modos y mecanismos a nivel de la organización, donde las fallas siempre están asociadas a la negligencia de un departamento, una unidad o un directivo.

#### *4.3.1. Determinación de los modos de falla humanos u organizacionales*

Para realizar este trabajo es necesario realizar una serie de entrevistas a los encargados directos e indirectos de la falla. Un ejemplo de este procedimiento se da con claridad en el sector aeronáutico. Cuando una aeronave sufre algún tipo de problema en vuelo, posterior a un mantenimiento, se realiza entrevista al piloto, al jefe de mantenimiento y al técnico que realizó el trabajo específico (de ser necesario). Con estas entrevistas se busca reducir el espectro de falla y detectar el área específica donde se está originando la falla.

#### *4.3.2. Verificación de ejecución de procedimientos*

En esta etapa se busca determinar si los procedimientos de calidad que deberían garantizar que el componente o equipo no presentara anomalía se llevaron a cabo o se omitieron por cuestiones organizacionales o simplemente por error humano.

#### *4.3.3. Determinación del mecanismo de falla humano u organizacional*

Con la información de los dos ítems antes mencionados, los investigadores contrastan la información para detectar las deficiencias en el proceso de calidad y establecer las causas raíz de falla.

#### *4.3.4. Elaboración de informe*

Para la elaboración de este informe tampoco existe un tipo de plantilla genérico que permita a los investigadores mostrar todos los hallazgos de la investigación. A diferencia del informe de los mecanismos de falla, se deben mostrar las deficiencias de la organización o de un área específica, los costos que enmarcaron la falla y un detallado plan de mejora con sus respectivas recomendaciones de implementación.

## 4.4. Herramientas para mostrar los resultados de análisis de falla de forma gráfica

Existen muchas herramientas para ayudar en la realización de RCA. El elemento más importante, sin embargo, es la preservación de una mente abierta por el investigador o el equipo investigador. Las ideas preconcebidas o la existencia de un sesgo de investigación a menudo obstruyen las investigaciones efectivas de la causa-raíz. Una representación visual de una RCA es más fácil de entender que una larga descripción narrativa. Se han desarrollado muchos métodos gráficos que facilitan la organización lógica de la información, como una ayuda en la realización de una RCA. Aunque tales técnicas pueden ser invaluable para la exhaustividad y el análisis logístico, no se debe inhibir la creatividad y la mente abierta. Los párrafos siguientes describen una descripción breve y algo simplificada de varios métodos comunes de gráficos que pueden ser útiles para realizar una RCA (Becker y Shipley, 2002; ASM Handbook Committee. Volume 11, 2002).

### 4.4.1. Diagrama de árbol

Un análisis de árbol de fallas es un análisis deductivo que identifica un evento superior, en este caso un fallo, y luego evalúa todas las maneras creíbles en las que este evento podría haber ocurrido, identificando las interrelaciones de eventos o condiciones básicas que conducen al fracaso. El árbol se organiza identificando todas las cadenas de eventos que se conectan al evento superior y una «compuerta» que representa la relación lógica. En la figura 83 se muestra el concepto en términos generales.

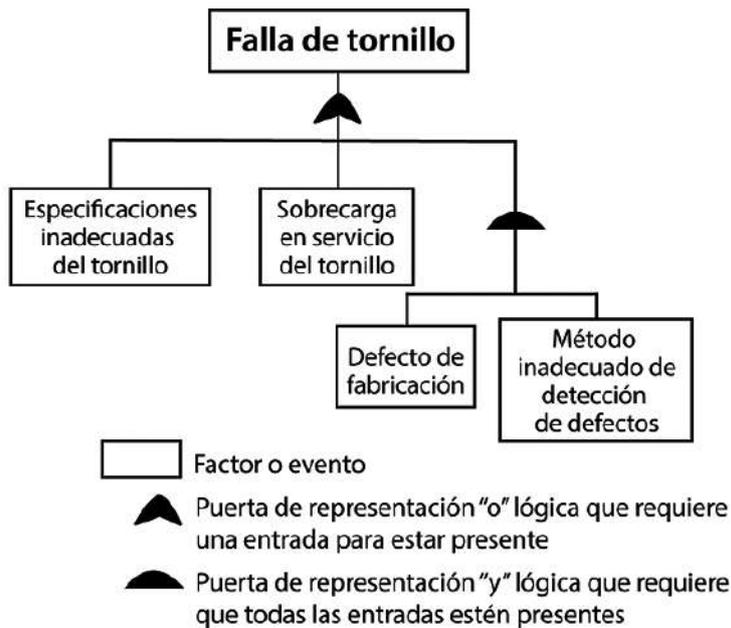


Figura 83. Árbol de falla (Scutti et al., 1990).

#### 4.4.2. *Análisis de eventos y factores casuales*

El análisis de eventos y de factores causales es una herramienta muy flexible que es útil para realizar un análisis lógico de la secuencia cronológica de eventos y factores comunes en una falla. La construcción comienza con un cronograma básico y la adición de condiciones relacionadas, eventos secundarios y presunciones. Para construir el gráfico, se deben colocar los eventos en rectángulos y en secuencia, de izquierda a derecha, usando flechas sólidas. El evento terminal debe ser listado en el extremo derecho dentro de un círculo. En óvalos se enumeran las condiciones, los factores causales y los factores contribuyentes y se muestra la relación entre los eventos con flechas discontinuas (Becker y Shipley, 2002, p. 47).

Se pueden agregar barreras al gráfico para identificar donde fallaron, permitiendo que los eventos ocurran. Una barrera puede tomar muchas formas, incluyendo una barrera física, como una puerta de armario o una barrera de procedimiento que no se implementó correctamente. Los elementos básicos

del evento y la tabla de factores causales con eventos primarios, eventos secundarios y condiciones se muestran en la figura 84. Los acontecimientos constituyen la columna vertebral del gráfico, mientras que las condiciones son circunstancias pertinentes a la situación. El objetivo del análisis es identificar los fallos clave del equipo, fallos del proceso o errores humanos que permitieron que ocurriera el evento de pérdida. Una vez establecida la tabla, se identifican los factores causales. Estos se identifican como los factores que si se eliminaran hubieran evitado.

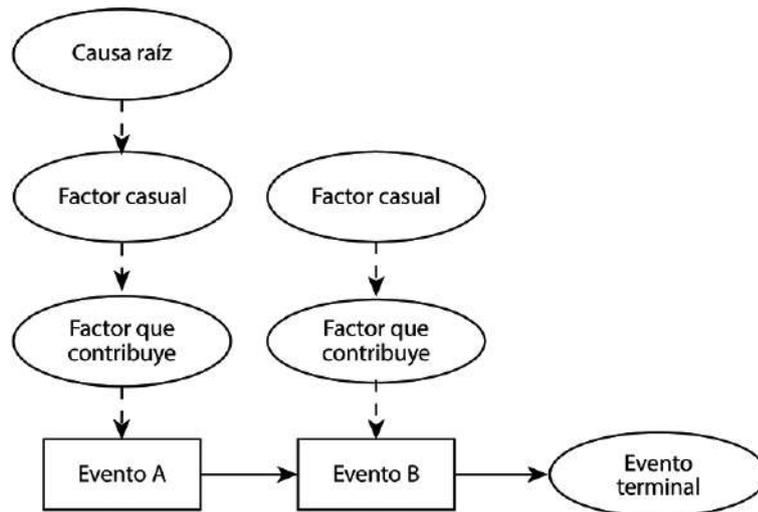


Figura 84. Gráfico de eventos simplificados y factores causales (Becker y Shipley, 2002).

#### 4.4.3. Diagrama de espina de pescado

Un análisis de causa y efecto es una forma de relacionar las causas con un daño particular en un intento por encontrar la causa raíz. Las causas pueden ser problemas de diseño, rendimiento humano, mala fabricación, etc. Un simple análisis de causa y efecto puede tomar la forma de un diagrama de espina de pescado, que puede construirse de la siguiente manera:

- Describa claramente el fallo en el lado derecho del diagrama.

- Identifique las principales categorías de causas, como ramas que convergen en la falla
- Haga una lluvia de ideas y enumere todas las causas en cada rama.
- Analice los datos hasta que se identifiquen las causas raíz.

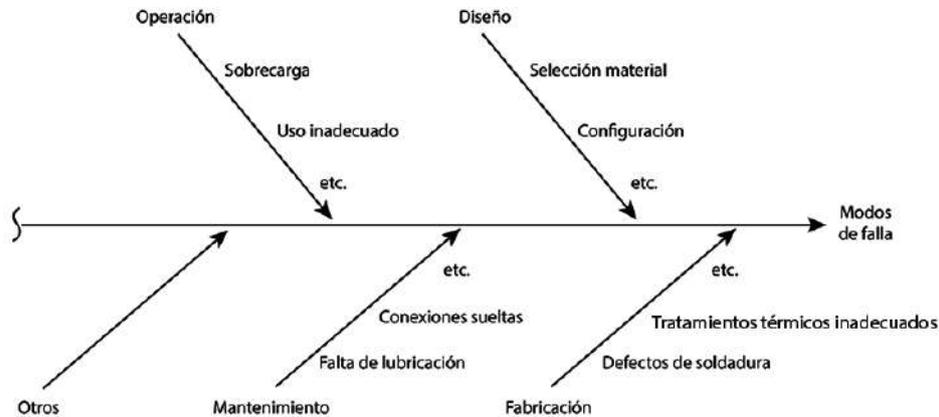


Figura 85. Diagrama de espina de pescado (Becker y Shipley, 2002).

#### 4.5. Análisis del caso de estudio

En los trayectos anteriores se evaluaron las propiedades mecánicas de los materiales usados en la construcción de la estantería y se descartaron algunas fuentes y mecanismos de falla. En este trayecto se mostrará el análisis del mecanismo de falla y se citarán algunas labores adicionales que se ejecutaron para descartar modos de falla. Para esto se tomará el mismo orden enfocado al caso en particular:



Figura 86. Modos de falla para la estantería (Castelblanco, 2017).

#### *4.5.1. Recopilación de antecedentes y determinación de modos de falla*

En esta etapa se solicitó formalmente a la compañía afectada la siguiente información:

- Ficha técnica del equipo
- Memorias de cálculo de la estantería
- Certificados de los materiales usados en la fabricación
- Procedimiento de montaje de la estructura
- Manual de mantenimiento de la estantería
- Protocolo de cargue y descargue de la estructura
- Distribución de carga en la estructura en el momento de falla

De los documentos antes mencionados, solo se tuvo acceso a las memorias de cálculo, las cuales fueron suministradas por el diseñador y constructor de la estructura. Adicional a esto, el afectado especificó en un correo electrónico que no tenía un protocolo de cargue y descargue y no se contaba con manual de mantenimiento porque hasta ahora se estaba realizando el montaje de la estructura nueva. Para la distribución de carga, la compañía afectada suministró los pesos y las ubicaciones que se encontraban.

Nota: es importante dejar por escrito y de manera formal la información que se solicitó y la que entregaron finalmente, puesto que limita el alcance de cualquier tipo de estudio y los resultados finales.

Dentro de las memorias de cálculo presentadas por parte del diseñador, se pudo establecer que no coincidían con lo instalado en sitio, como se muestra a continuación:

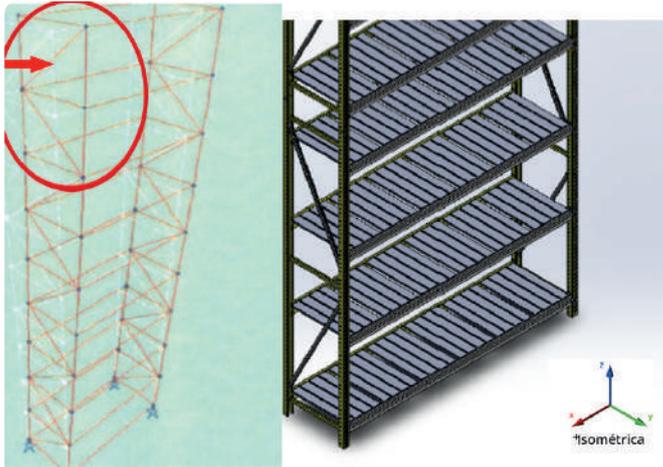


Figura 87. Comparación de geometrías de estanterías calculadas e instaladas. Fuente: elaboración propia.

En la figura 87, se observa la geometría calculada (izquierda) y la geometría que se encontraba ensamblada en el momento de la falla (derecha). Desde este punto de vista, los cálculos no son válidos y constituyen una falta grave porque indica que la estructura no cuenta con un soporte matemático. A su vez, se observa que unieron dos estanterías para aumentar la capacidad de almacenamiento, de manera que esta condición modificó por completo la forma de distribución de carga, como se muestra a continuación:

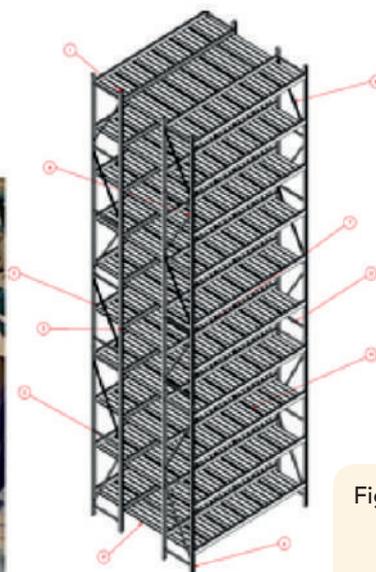


Figura 88. Estantería instalada. Fuente: elaboración propia.

En la figura 88 se muestra la forma como se unieron las estanterías para la aplicación. Es evidente que el diseño contemplado no coincide con lo instalado, sin embargo, se deben descartar otros errores asociados al comportamiento de la estructura. El sobrepeso en cada uno de los módulos y sus respectivos entrepaños (divisiones de la estantería) se deben contemplar y cuantificar en un modelo virtual. Para este tipo de aplicaciones se realiza un análisis FEA (análisis por elementos finitos), como se muestra a continuación:

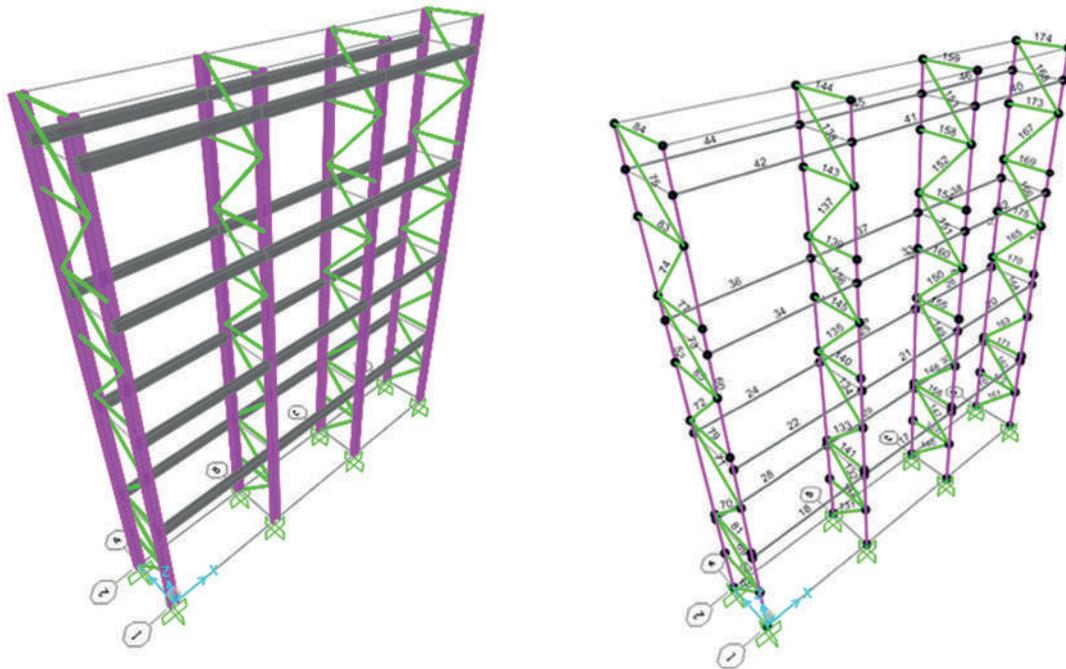


Figura 89. Análisis FEA para la estructura afectada.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 89 se muestra el análisis de carga simulado para determinar los puntos críticos de la estructura. En este caso, en las zonas que se muestra de color rojo se pudo establecer que contaba con una resistencia cercana a la obtenida en los ensayos mostrados en trayectos anteriores.

Nota: el análisis por elementos finitos FEA es una técnica de simulación por computador usada para determinar las condiciones críticas de esfuerzos y deformaciones sobre un componente o estructura.

Los pasos que llevaron al planteamiento de la hipótesis de falla están enmarcados por el siguiente diagrama:

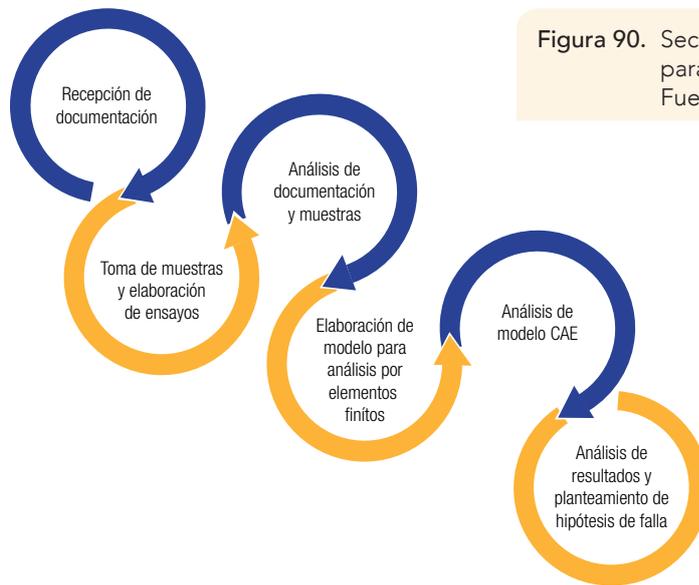


Figura 90. Secuencia de análisis para el caso de estantería. Fuente: elaboración propia.

El resumen de los modos de falla para la estructura se puede realizar con el diagrama causa-efecto o espina de pescado, en el cual se observan las causas que llevaron a la estructura a fallar, en este caso por aplastamiento.

Como se muestra en la figura 91, las causas que originaron la falla se centran en la etapa de diseño, ya que no se contemplaron condiciones de carga y su distribución. Se usó una geometría dentro de los cálculos diferente a la que fue instalada, lo cual modificó la capacidad de carga y generó la falla final.

El diagrama causa-efecto permite visualizar toda la información analizada y es funcional para mostrar el fenómeno a personas que no tienen conocimientos específicos en el tema. Si

se desea mostrar todos los escenarios evaluados se puede emplear un diagrama de árbol, como se muestra a continuación:

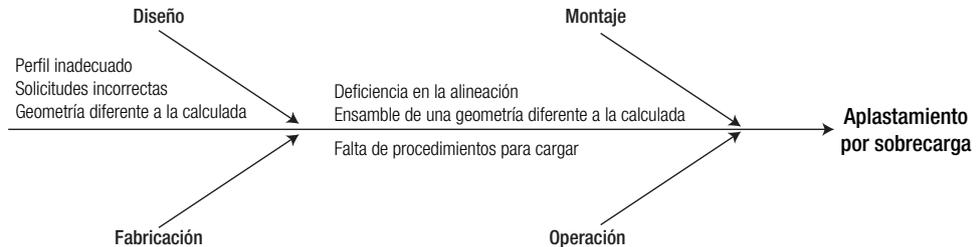


Figura 91. Diagrama causa efecto para la estructura afectada. Fuente: elaboración propia.

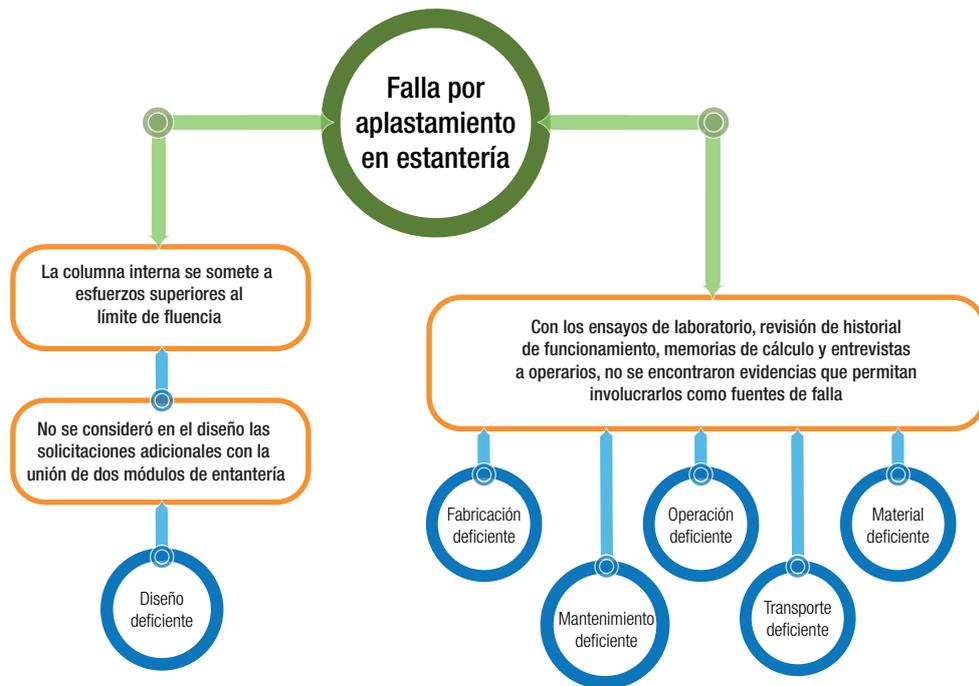


Figura 92. Diagrama de árbol para el caso (Castelblanco, 2017).

En el diagrama de árbol se pueden mostrar otras fuentes de falla que fueron evaluadas y posteriormente descartadas por falta de evidencia. Por otro lado, la fuente de diseño muestra que hubo consideraciones erróneas que desencadenaron la falla final.

#### 4.6. Conclusiones del caso de estudio

Luego de un recorrido por cuatro trayectos, en los cuales se recopiló la información relacionada con los factores que pudieron provocar la falla, se descartaron fuentes y mecanismos, se practicaron ensayos de tipo destructivo y simulaciones mecánicas. Gracias a esto, se puede establecer con mayor precisión la fuente principal de la falla y se pueden plantear recomendaciones para evitar a futuro fallas semejantes. Es imperativo que el ingeniero o grupo interdisciplinario considere todos los escenarios posibles para no limitar la investigación a un solo tipo de fuente y mecanismo de falla.

En el caso en particular de análisis de falla en estantería, se pudo establecer que las propiedades mecánicas de los componentes y los materiales seleccionados cumplían con lo establecido en la norma, sin embargo, la estructura instalada no coincidía en los cálculos, lo cual invalida todas las memorias de cálculo antes presentadas y constituye la fuente de falla principal (diseño deficiente).

#### 4.7. Conclusiones del trayecto

En el último trayecto del módulo de análisis de falla se busca recopilar y organizar toda la información del caso. Se sigue un orden cronológico y de identificación paulatina de los modos y los mecanismos de falla. También se evidencia

cómo se validaron o descartaron cada uno de ellos, a través de ensayos destructivos, no destructivos y simulaciones. Toda la secuencia busca presentar de manera clara y sucinta un informe con la suficiente claridad y argumentos sobre el fenómeno presentado en el elemento o máquina analizada.

Existen varias formas de mostrar la información dentro de un análisis de falla, como el diagrama de árbol, la espina de pescado, los eventos y factores casuales, etc. Cada uno de ellos busca representar de manera gráfica las fuentes y mecanismos que llevaron a un componente o equipo a la falla. A su vez, las representaciones evidencian todos los caminos que el ingeniero o grupo interdisciplinario evaluó en una secuencia lógica para descartar o validar una determinada teoría de falla.

- Adams, B. L. (1986). *ASM Handbook Volume 10: Materials Characterization*. Clibeland, Estados Unidos: ASM International.
- AMS International. (2004). *Metallography and Microstructures* (Volume 9). USA: Ohio, Estados Unidos: Materials Park.
- Anderson, T. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (Third Edit).
- Arana, L. y González, J. (2003). *Mecánica de la fractura*. Bilbao, España: Universidad del País Vasco. Recuperado de <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/pdf/UCWEB024559.pdf>
- ASM Handbook Committee (1989). *ASM Handbook. Volume 16. Machining*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- ASM Handbook Committee (1997). *ASM Handbook. Volume 20. Materials Selection and Design*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- ASM Handbook Committee (2002). *ASM Handbook. Volume 11. Failure Analysis and Prevention*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- Avellan, F., Ciocan, G. y Kvivinsky, S. (2002). Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Lausana, Suiza: Laboratoire de machines hydrauliques.
- Billah, K. Y. y Scanlan, R. H. (1991). Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics text-

- books. *American Journal of Physics*, 59(2), 118–124. <https://doi.org/10.1119/1.16590>
- Budynas, R. y Nisbett, K. (2016). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Espejo Mora, E. y Hernández Albañil, H. (2017). *Análisis de fallas de estructuras y elementos mecánicos*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- FAG (2018). Failure Diagnosis Guide to troubleshooting wheel bearing failures and malfunctions Commercial Vehicles.
- González, J. (2004). *Mecánica de fractura*. México: Limusa.
- Herreid, C. F. (1997). What is a case? Bringing to Science Education the Established Teaching Tool of Law and Medicine. *Journal of College Science Teaching*, 27(2), 92-94.
- Hosford, W. y Caddell, R. (2007). *Metal Forming. Mechanics and Metallurgy*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- ASM International (1992). *ASM Handbook. Corrosion*. Clibeland, Estados Unidos: ASM International.
- Knoxville, T. (2014). Fracture mechanics.
- Kokcharov, I. (2013). Fracture mechanics. En I. Kokcharov y A. Burov (ed.), *Structural Integrity Analysis*.
- Manterola, J. (1984). *Evolución de los puentes en la historia reciente*. *Informes de la Construcción*, 35(359-360), 5-35. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/ic.1984.v35.i359-360.1949>
- Marín, J. M. (2008). *Apuntes de diseño de máquinas* (2a ed.). máquinas. Quito, Ecuador.
- RMI (2012). Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. *RMI Specification*.
- Scutti, J. J., Mcbrine, W. J. y ASM Corporation (1990). *Introduction to Failure Analysis and Prevention*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.

Torres, G. (2010). El estudio de casos y su aplicación en el curso introducción a la ingeniería mecánica en la Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia Et Technica*, XVI (44). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917316010>



La preparación editorial del módulo  
*Análisis de falla: Conceptos y contextos*  
*en estudios de casos* estuvo a cargo  
de la Coordinación Editorial  
de la Universidad Central.

Se utilizaron en su composición las fuentes  
Charter, Rockwell, Helvetica Neue LT Std  
y Avenir. En septiembre de 2018, en la ciudad  
de Bogotá, D. C., Colombia.



# Análisis de falla

## Conceptos y contextos en estudios de casos

Este módulo tiene como finalidad entregar a los lectores las herramientas básicas para la verificación, diagnóstico, seguimiento y control de una falla de un componente mecánico. Con el fin de establecer un orden específico para los conceptos, está dividido en cuatro capítulos, que llevan al lector a indagar desde el punto de vista teórico las fuentes y mecanismos de una falla, la evaluación de esta, las técnicas para examinarla y una metodología de seguimiento y control.

El objetivo fundamental es apropiarse de los conceptos de la mecánica clásica y comprender el comportamiento de los materiales desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, con el fin de fortalecer conceptos específicos y comprender el comportamiento de una falla en una pieza. En este sentido, los conceptos, teorías y metodologías aquí descritas pretenden generar una secuencia lógica para la determinación de la causa de falla en un componente o equipo. Como apoyo general al módulo, el lector cuenta con un estudio de caso que se desarrolla durante los diferentes capítulos; dicho caso tiene por finalidad contextualizar los conceptos abordados en cada instancia.