

***Máster interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

TRABAJO FIN DE MASTER

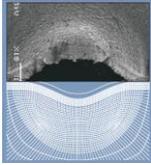
Título de trabajo: Análisis de fallos en elementos mecánicos.

Tutor académico: Inés Peñuelas Sánchez

Departamento: Construcción e Ingeniería de Fabricación

Universidad de Oviedo

07/2014



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo: Análisis de fallos en elementos mecánicos.

Firma

Javier Belzunce

Firma

Inés Peñuelas

Firma

Ignacio Canal

Universidad de Oviedo

07/2014



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 OBJETIVO	5
2. EL PROCESO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS FALLOS	6
3. MECANISMOS DE FALLO	9
3.1 MECÁNICA DE LA FRACTURA	9
3.2 FATIGA	21
3.3 CORROSIÓN.....	34
3.4 FLUENCIA	44
4. CAUSAS MÁS FRECUENTES DE FALLO	53
4.1 CAUSAS HABITUALES EN LOS EJES	57
4.2 CAUSAS HABITUALES EN LOS RODAMIENTOS	63
4.3 CAUSAS HABITUALES EN BOMBAS HIDRÁULICAS	66
4.4 CAUSAS HABITUALES EN ENGRANAJES.....	69
5. CASOS PRÁCTICOS	77
CASO 1.....	77
CASO 2.....	79
CASO 3.....	81
CASO 4.....	82
CASO 5.....	84
CASO 6.....	87
CASO 7.....	88
CASO 8.....	90
CASO 9.....	91
CASO 10.....	92
CASO 11.....	94
6. CONCLUSIONES.....	98
7. PRESUPUESTO	99
RESUMEN COSTE TOTAL DEL PROYECTO	101



1. INTRODUCCIÓN

Una de las ramas más interesantes de la ingeniería por su inherente valor académica e industrial es la mecánica forense. Esta se encarga de establecer e investigar las causas de fallos o accidentes en componentes mecánicos y civiles de todo tipo, que van desde agujas para coser hasta componentes utilizados en la industria aeroespacial y biomecánica. Dichos análisis de fallos son importantes para poder establecer de una manera adecuada y sistemática las causas de los fallos y poder tomar los correctivos necesarios para evitar la repetición de accidentes que, además de causar pérdidas materiales, pueden conllevar a pérdidas humanas irreparables.

En la investigación de fallos intervienen ramas de la ingeniería tan variada como materiales de ingeniería, mecánica del medio continuo, mecánica de la fractura, metalurgia, procesos de manufactura, termodinámica y transferencia de calor, tribología, corrosión y fractografía, entre otras.

En la ejecución de un análisis de fallos se deben tener en cuenta factores tales como la historia previa del elemento a analizar, tipo de material y estructura, temperatura de trabajo, planes de mantenimiento y hasta la hoja de vida de los operarios del equipo o maquina llegan a ser importante en algunos casos.

Se considera que una pieza, máquina ó equipo ha fallado cuando ocurre una de las siguientes condiciones:

- I. Cuando se vuelve completamente inoperable.
- II. Cuando el componente aún es operable pero no es capaz de cumplir la función para la cual fue concebido, diseñado y manufacturado.
- III. Cuando el deterioro del componente ha llegado a una condición seria que lo hace no fiable o inseguro para continuar su utilización.

Causas comunes de fallo:

- Mal uso o abuso
- Errores de montaje
- Errores de fabricación
- Mantenimiento inadecuado
- Errores de Diseño
- Material inadecuado
- Tratamientos térmicos incorrectos
- Condiciones no previstas de operación
- Inadecuado control o protección ambiental
- Discontinuidades de colada
- Defectos de soldadura
- Defectos de forja

Códigos y Normas utilizados

AISI: Normas de composición de aceros

ASTM: Normas para materiales y su manufactura



API: Normas para la industria del petróleo que son usadas por muchas otras industrias

ASME: Responsable de los códigos para recipientes a presión

NACE: Códigos para materiales expuestos a ambientes corrosivos.

SAE: Normas para la industria automotriz usadas por muchas otras industrias.

UNS: Clasificación de metales y aleaciones metálicas

Tres principios básicos a respetar:

- Localizar el origen del fallo
- No presuponer una causa determinada
- No realizar ensayos destructivos sin un análisis previo cuidadoso

1.1 OBJETIVO

Este proyecto el cual ha sido elaborado por Ignacio Canal Sánchez, tiene como objetivo proporcionar una visión general de la disciplina del Análisis de Fallos (AF), disciplina de la ingeniería que estudia las causas de los fallos de estructuras civiles y componentes industriales, así como de las herramientas (caracterización de materiales, mecánica de la fractura, análisis tensional,...) que lleva asociado y su aplicación a casos prácticos.

Debido a que los fallos tienen componentes económicos, humanos y medioambientales que en muchos casos se dan de forma simultánea.

Desde el punto de vista humano, los fallos pueden llegar a tener la peor de sus consecuencias, como es la pérdida de vidas humanas. Desde el punto de vista medioambiental, muchos fallos pueden ocasionar daños catastróficos en el medio ambiente como por ejemplo: fugas de petróleo en el mar o en oleoductos, fugas de gases químicos o de emisiones radioactivas han sido numerosas a lo largo de la historia más reciente.

Vistas las consecuencias, resulta evidente la necesidad de ahondar en la disciplina del Análisis de Fallos. Dicho análisis implica la mecánica, física, mecánica de la fractura, metalurgia, química, corrosión, procesos de fabricación, análisis tensional (incluyendo técnicas numéricas como los elementos finitos), las evaluaciones no destructivas, la evaluación estadística de riesgos, etc.

Además se llevarán a cabo el análisis de diferentes mecanismos que han sufrido diferentes fallos y fracturas, las cuales serán estudiadas y se dará a conocer cuáles son los motivos de dichos fallos.



2. EL PROCESO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS FALLOS

Dado un determinado fallo, el analista o equipo de análisis, que necesariamente ha de ser parte no implicada en el caso, debe responder a las siguientes preguntas:

- ¿Qué ha pasado?
- ¿Cómo ha pasado?
- ¿Dónde ha pasado?
- ¿Qué o quién es el causante de lo ocurrido?
- ¿Quién es el responsable de lo ocurrido?
- ¿Cuáles son los costes de sustitución o reemplazo?
- ¿Cuáles son los daños padecidos por cada una de las partes implicadas?

Esto significa que es importante estudiar la historia previa al fallo.

Para responder a estas preguntas es recomendable seguir una metodología bien definida, que en su versión más completa comprendería:

1. Evidencia documental

Es necesario recolectar información relacionada con la evidencia documental, tales como certificado de ensayo de los fabricantes o vendedores, especificaciones, planos que indiquen la forma y las dimensiones del equipo o del componente, las garantías y los aspectos legales.

2. Condiciones de servicio

Recopilar información relacionada con la operación actual del equipo o del componente. Datos sobre niveles de temperatura, presión, velocidad de operación, para compararla con las especificaciones. Datos sobre el mantenimiento del equipo, sobre las condiciones ambientales, fluidos que lo rodean, datos sobre humedad, contaminación, condiciones de limpieza, etc.

3. Entrevistas

Ninguna investigación es completa sin el testimonio de las personas que tienen información sobre la fallo. El investigador deberá utilizar esta información como herramienta de análisis y no enfatizar irrazonablemente la información recolectada en las entrevistas sin analizarlas juiciosamente.

4. Examen preliminar del componente o del equipo que falló

Inspección visual de las superficies de fractura y trayectoria de las grietas. Presencia de desgastes severos. Sobre estas inspecciones se deberá realizar la documentación fotográfica pertinente.

5. Selección de las muestras para ensayo

El investigador deberá seleccionar las localizaciones de las muestras que se van a someter a los ensayos, indicando la forma y el tamaño de las muestras. Asimismo se debe especificar el procedimiento para tomar las muestras.



6. Ensayos no destructivos

Son muy útiles en la investigación del fallo, particularmente las inspecciones con líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, corrientes de Eddy, para detectar grietas y discontinuidades superficiales. También la radiografía y la gammagrafía para el examen interno.

7. Ensayos mecánicos

De acuerdo a la carga predominante de servicio y al tipo de material, pueden requerirse probetas para el Ensayo de Tensión, compresión, flexión ó impacto. Los Ensayos de Dureza son muy útiles y económicos.

8. Selección, preservación y limpieza de las superficies de fractura

La selección adecuada, la preservación y la limpieza de las superficies de fractura, son importantes para impedir que se destruyan ó se oscurezcan detalles y evidencias importantes para el análisis del fallo.

9. Examen y análisis macroscópico

Del estudio de las superficies de la fractura, se puede observar la presencia de grietas secundarias y otros fenómenos superficiales tales como corrosión, desgaste, erosión, etc. Este examen se realiza con ayuda del estereomicroscopio, pero puede emplearse también Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

10. Examen microscópico de la estructura

Para este examen se puede utilizar el Microscopio Óptico, el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) ó el Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM). Es necesario seleccionar las muestras y seguir los procedimientos convencionales de corte, montaje, pulido en papeles de esmeril de grado decreciente y pulido final con Alúmina o con pasta de diamante. Finalmente el ataque con reactivos específicos dependiendo del material.

11. Determinación del tipo de fractura (fractografía).

Es importante para el análisis determinar el tipo y las características de la fractura (tipo de rotura, morfología de fatiga, torsión, etc.).

12. Análisis de composición

Con el fin de verificar que el material se corresponde con el especificado y es el adecuado, es necesario realizar el análisis de composición del material del componente que presentó el fallo. En fallos por corrosión es importante el análisis de los productos de corrosión. Para tal fin se pueden emplear Métodos Espectrográficos, de Espectrofotometría de absorción atómica, colorimetría, fluorescencia de Rayos X, difractómetro de Rayos X o métodos gravimétricos o volumétricos de análisis químico convencional.

13. Ensayos simulados de servicio

En las etapas finales de una investigación, se puede requerir la realización de ensayos que simulen las condiciones que produjeron la ocurrencia del fallo. Por ejemplo, probetas de corrosión para uso en planta con el fin de monitorear el ataque corrosivo.



14. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

La etapa final de toda investigación sobre análisis del fallo termina con un informe, en el cual se formulan los análisis de toda la información recolectada en las etapas y ensayos anteriores y se consignan las conclusiones sobre la causa del fallo. Además se acostumbra formular las recomendaciones pertinentes para evitar que en el futuro se presente nuevamente el mismo tipo de fallo.



3. MECANISMOS DE FALLO

3.1 MECÁNICA DE LA FRACTURA

El análisis de fallos mediante la mecánica de la fractura está teniendo un enorme auge en la actualidad al estudiar los procesos catastróficos de rotura en estructuras, mediante dicho análisis lo que se pretende es determinar el tipo de fractura y motivo de dicho fallo. A través de ese análisis lo que se pretende es evitar que se vuelva a reproducir en otras ocasiones y determinar cuáles han sido las causas de dicho fallo.

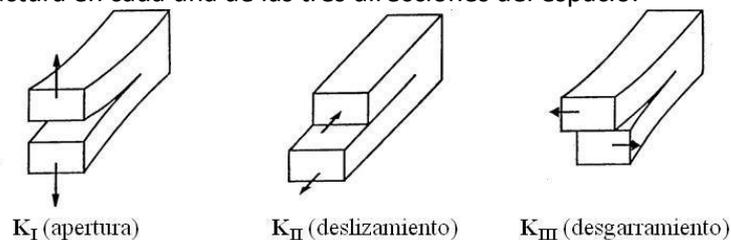
La **mecánica de fractura** es una rama de la mecánica de sólidos deformables ocupada del estudio de la estabilidad estructural de materiales, considerando la formación y propagación de grietas o defectos en materiales y analizando condiciones tensionales con la concentración de tensiones debida a dichos defectos.

Utiliza métodos analíticos derivados de otras ramas de la mecánica y la ciencia de materiales para estudiar los mecanismos de formación y propagación de defectos, y métodos experimentales relativos a la mecánica de sólidos para determinar las resistencias relativas del material a la fractura.

La mecánica de fractura permite mejorar el diseño de productos, así como procesos de fabricación e inspección para controlar la propagación de defectos que podrían llevar al fallo de sus componentes, pero sin la necesidad de usar coeficientes de seguridad injustificados. Aplica las teorías de elasticidad y plasticidad, a los defectos cristalográficos microscópicos de los materiales para predecir la fractura macroscópica mecánica en los cuerpos. La fractografía es altamente utilizada en la mecánica de fractura para entender las causas de fallo y verifica las predicciones teóricas identificando los fallos reales.

Modos de fractura

Para comenzar el estudio de la mecánica de la fractura de Irwin, conviene identificar la existencia de tres modos de fractura, que se corresponden con la separación de las dos superficies de fractura en cada una de las tres direcciones del espacio:



Modo I. Apertura: El desplazamiento relativo de las superficies de fractura es normal a las paredes de la fisura. Es evidente que este modo de fractura se debe a tensiones de tracción.

Modo II. Deslizamiento: Desplazamiento tangencial de las paredes de fisura en dirección perpendicular al frente de fisura. Obviamente producido por tensiones de cizalladura.

Modo III. Desgarramiento: Desplazamiento tangencial de las paredes de fisura en dirección paralela al frente de fisura. Producido por tensiones de cizalladura pura (no hay tensiones normales).

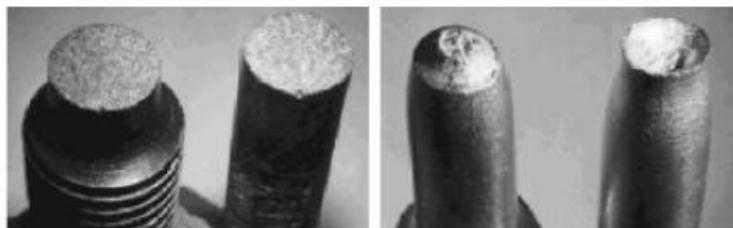


El modo de fractura dominante depende de la orientación del defecto respecto al campo de tensiones pero también del tipo de material. Así, por ejemplo, en materiales frágiles domina el modo I hasta el punto de que las fisuras rotan si es necesario para propagarse según este modo. En materiales dúctiles (metales y polímeros) prevalecen los modos de cizalladura II y III. En geología, el modo I está completamente suprimido, incluso en materiales frágiles, porque las rocas rompen siempre por compresión.

Comportamiento ante la fractura: Ductilidad y fragilidad.

Conviene recordar el concepto de ductilidad, que definiremos al estudiar las curvas tensión deformación. La ductilidad de un material se define como la cantidad de deformación plástica máxima que es capaz soportar un material antes de romper. Los parámetros principales utilizados para medir la ductilidad son la deformación a fractura o la reducción de área a fractura. Esta magnitud, la ductilidad, determina el tipo de fractura que se produce en el material: fractura frágil o fractura dúctil. Las principales características de estos dos tipos de fractura se resumen en la siguiente tabla.

Fractura frágil	Fractura dúctil
Apenas hay estricción	Estricción apreciable
Las superficies de fractura son macroscópicamente planas . La fractura se produce a un ángulo de 90° con la carga aplicada y es originada por tensiones normales	La fractura adopta la forma típica copa-cono . Por tanto, la fractura se produce formando un ángulo de 45° con la carga aplicada y se origina por tensiones de cizalladura .
Las superficies de fractura son microscópicamente lisas en monocristales (clivaje) o amorfos y estriadas en policristales	Microscópicamente se observa la formación de microcavidades en la superficie de fractura (fractura por desgarro)
Apenas se produce deformación plástica entorno a la grieta	Deformación plástica apreciable entorno a la grieta



Todos los materiales pueden presentar uno u otro tipo de comportamiento a fractura (frágil o dúctil) dependiendo de la temperatura. Existe para todos ellos una temperatura de **transición frágil-dúctil**, de forma que si la temperatura es mayor que dicha temperatura crítica, el comportamiento es dúctil, y si es menor, frágil. Esto es lo que le ocurrió al acero del barco “Liberty”, que al botarlo al agua se enfrió por debajo de su temperatura de transición y se agrietó el casco.

Además de la clasificación anterior, la fractura en policristales puede clasificarse en *intergranular* o *transgranular*, según la ruta de propagación de la fisura sea a través de las fronteras de grano o atravesando (rompiendo) los propios granos.



Mecánica de Fractura Elástica-Lineal

Introducción

Los conceptos de Mecánica de Fractura, establecidos con anterioridad a 1960, son solamente aplicables a materiales que cumplen la Ley de Hooke. A pesar de las correcciones introducidas a principios de 1948, incluyendo la plasticidad a pequeña escala, estos análisis están restringidos a estructuras en las que el comportamiento es elástico lineal.

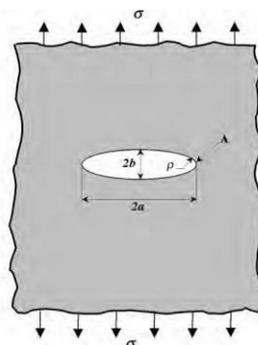
Desde 1960, las teorías de mecánica de fractura se han desarrollado teniendo en cuenta varios tipos de comportamiento no-lineal (plasticidad, viscoplasticidad y viscoelasticidad) así como los efectos dinámicos. No obstante, todos estos resultados recientes son extensiones de la mecánica de fractura elástica lineal (MFEL). Por lo tanto un sólido conocimiento de los fundamentos de la MFEL es esencial para entender los conceptos más avanzados de la Mecánica de Fractura.

En primer lugar contemplaremos los antecedentes del planteamiento energético, llevados a cabo por Inglis (1904) y Griffith (1924) para continuar con el planteamiento energético más moderno para los metales.

El balance de energía de Griffith

De acuerdo con el Primer Principio de Termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado de no-equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de la energía del sistema. A partir de este principio, Griffith estudió las condiciones de fractura de cuerpos sólidos frágiles con grietas y estableció en el año 1923 la teoría inicial en la que se sustenta la Mecánica de la Fractura. *Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante.*

La primera evidencia cuantitativa del efecto de la concentración de tensiones en las grietas fue enunciada por Inglis, el cual analizó los agujeros elípticos en placas planas. Inglis analizó una placa plana con un agujero elíptico, de longitud $2a$ y de ancho $2b$, a la que se le aplica una tensión perpendicular al eje mayor de la elipse. Inglis asumió que el agujero no está influenciado por las condiciones de contorno de la placa; i.e. la anchura de la placa $\gg 2a$ y la altura $\gg 2b$.





A partir de este enunciado la tensión en el extremo del eje mayor está dada por:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right)$$

La relación σ_A/σ se define como el factor de concentración de tensiones, k_t . Cuando $a = b$, el agujero es circular y en este caso $k_t = 3$, cifra bien conocida y que aparece en gran número de manuales.

Cuando el eje mayor a , aumenta respecto a b , el agujero elíptico comienza a tener la apariencia de una grieta aguda. Para este caso, Inglis encontró más conveniente que la expresión anterior una nueva ecuación en función del radio de curvatura:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$

Supongamos una placa de grandes dimensiones (infinita) de espesor B , sometida a una tensión constante, que contiene una grieta pasante de longitud $2a$. Griffith establece que para que esta grieta introducida en el sólido, cargado elásticamente, aumente de tamaño, la energía potencial disponible para la propagación en la placa debe ser suficiente para superar a la energía superficial del material, de forma que se establece un equilibrio entre la disminución de la energía elástica almacenada en el cuerpo y el incremento de la energía superficial total, como consecuencia de la formación de la superficie libre de la grieta, de forma que la grieta existente crecerá y se producirá una fractura si la energía requerida para propagar la grieta (suma del trabajo desarrollado por la tensión aplicada y la energía elástica liberada al extenderse la grieta) puede ser suministrada por el sistema.

La forma de la curva R

Algunos materiales presentan una curva R creciente, mientras que la curva R para otros materiales es plana. La forma de la curva R depende del comportamiento del material y, en menor medida de la configuración de la estructura agrietada.

La curva R para un material idealmente frágil es plana porque la energía de superficie es una propiedad invariante del material. Sin embargo, cuando la fractura se acompaña de comportamiento no lineal del material, la curva R puede adoptar diversas variedades de formas. Por ejemplo, la fractura dúctil en los metales usualmente da como resultado un crecimiento de la curva R ; la zona plástica del borde de la grieta aumenta en tamaño al mismo tiempo que la grieta crece, aumentando de esta manera la energía. La fuerza motriz G debe aumentar en estos materiales para mantener el crecimiento de grieta, si el cuerpo agrietado es infinito (si la zona plástica es pequeña comparada con las dimensiones importantes del cuerpo) el tamaño de la zona plástica y R eventualmente crecen a valores de un estado estable, y la curva R se transforma en plana con otro crecimiento.

Algunos materiales pueden presentar una curva R descendente. Cuando un metal falla por clivaje, por ejemplo, la resistencia del material está proporcionada por la energía de superficie y la disipación plástica local. La curva R puede ser relativamente plana si el crecimiento de grieta fuera estable. Sin embargo, la propagación por clivaje es normalmente inestable; el material cerca del vértice de la grieta de crecimiento está sometido a deformaciones muy altas, que impiden la deformación plástica. Consecuentemente la resistencia de un grieta de clivaje, que crece rápidamente, es menor que la resistencia inicial en el inicio de la fractura.



El tamaño y la geometría de la estructura agrietada pueden ejercer cierta influencia en la forma de la curva R . Una grieta en una chapa delgada tiende a producir una curva R más empinada que una grieta en una placa gruesa porque la chapa delgada está sometida predominantemente a una forma de tensión plana, mientras que el material cerca del vértice de la grieta en una placa gruesa puede encontrarse generalmente en forma de deformación plana. La curva R puede también estar afectada si el crecimiento de la grieta se aproxima a un borde libre de la estructura. En este caso una placa gruesa puede presentar una resistencia al crecimiento de la grieta algo diferente que en una placa estrecha del mismo material.

Idealmente, la curva R , así como otras medidas de la tenacidad a fractura, deben ser una propiedad solamente del material y no depender del tamaño y forma del componente agrietado. Gran parte de la mecánica de fractura está basada en la presunción de que la tenacidad a fractura es una propiedad del material. No obstante, pueden darse efectos de configuración y casi siempre ocurre esto; un profesional de la mecánica de fractura debe tener en cuenta estos efectos y su influencia potencial en la precisión del análisis.

Mecánica de Fractura Elasto-Plástica

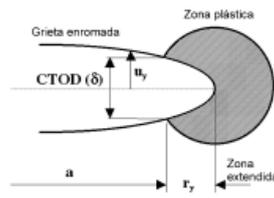
Introducción

La mecánica de fractura elástica lineal (MFEL) es válida únicamente si la deformación no-lineal está limitada a una pequeña región alrededor del frente de grieta. Es muy difícil caracterizar algunos materiales, mediante la MFEL y en este caso se aplica la mecánica de fractura elasto-plástica (MFEP), que admite deformaciones grandes antes de la fractura (fundamentalmente en el frente de grieta) que sean en general no-lineales, plásticas en el caso de los aceros, viscoplásticos como en el caso de los polímeros termoplásticos.

En lo que sigue contemplaremos el estudio de los dos parámetros fundamentales de este análisis que son: la apertura del frente de grieta ($CTOD_1$) y la integral de contorno J , que describen la situación en el frente de grieta y pueden ser usados como criterio de fractura. La determinación de los valores críticos $CTOD_c$ y J_c presentan menores restricciones de espesor que la tenacidad de fractura K_{Ic} , ya que de hecho casi siempre estamos en condiciones de tensión plana.

El desplazamiento de la apertura del frente de grieta

Cuando en el año 1961, Wells realizaba ensayos de caracterización de aceros estructurales para determinar el parámetro K_{Ic} , veía que estos materiales de alta tenacidad presentaban grandes inconvenientes para la caracterización de los valores de tenacidad a fractura y observó que la grieta se enroscaba en su frente, de forma que cuando mayor era este enroscamiento la tenacidad del material era mayor. De esta manera intuyó el interés de caracterizar la medida de la apertura del frente de grieta como una medida de la tenacidad de estos materiales de alta tenacidad.

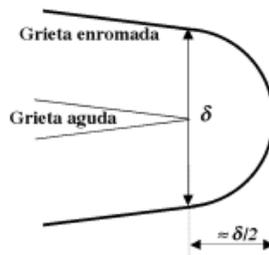


Grieta enromada y CTOD (δ)

Wells se dio cuenta de que las caras de las grietas se deformaban antes de la fractura ya que se producía un enromamiento de su frente, tanto mayor cuanto mayor era la tenacidad del material ensayado. De esta manera Wells propone que la grieta es susceptible de propagarse cuando el desplazamiento en el frente de grieta alcanza un valor crítico.

Como consecuencia del efecto de plastificación se produce un enromamiento del frente de grieta, como se puede ver en las Figuras 5.1 y 5.2, en las cuales queda definido gráficamente el parámetro *CTOD*. El análisis de Wells relaciona el valor de *CTOD* con el factor de intensidad de tensiones, considerando la plastificación del frente de grieta. Para ello resolvemos el valor del desplazamiento, con la consideración de que el valor efectivo de la grieta es $a + r_y$ como en la solución de Irwin. El valor del desplazamiento se encuentra estudiado, en el planteamiento tensional:

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$



Enromamiento (blunting) casi circular, plástico, no recuperable, típico de una propagación estable

Que para las condiciones actuales $r = r_y$ y $\theta = \pi$ tenemos:

$$u_y = \frac{\kappa + 1}{2\mu} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}}$$

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

Y con la corrección de Irwin de la zona plástica para las condiciones de tensión plana, podemos calcular el valor del parámetro *CTOD* y relacionarlo con la tasa de liberación de energía *G*, de forma que:

$$\delta = CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{E\sigma_{ys}} = \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sigma_{ys}}$$



Wells establece que el parámetro *CTOD* es un parámetro apropiado para la caracterización del frente de grieta cuando la MFEL no es adecuada. Esta afirmación se confirmó correcta varios años más tarde, cuando se estableció una relación entre *CTOD* y la integral *J*.

Alternativamente también podemos realizar un análisis con el modelo de la aproximación de Dugdale, cuando la zona plástica esta modelada mediante unas tensiones que cierran los extremos de la grieta, como se ha visto anteriormente. A partir de la ecuación 3.47 de la corrección de Dugdale y de acuerdo con la definición, *CTOD* en una placa infinita, sometida a una tensión remota, tenemos que:

$$\delta = \frac{8 \sigma_{ys} a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)$$

El modelo de Dugdale asume que se dan las condiciones de tensión plana y de que el material tiene un comportamiento elasto-plástico lineal sin endurecimiento (polímeros termoplásticos). La relación real entre *CTOD*, *K_I* y *G* depende del estado de tensiones y del endurecimiento por deformación. La forma más general de relación puede expresarse de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{K_I^2}{m \sigma_{ys} E} = \frac{G}{m \sigma_{ys}}$$

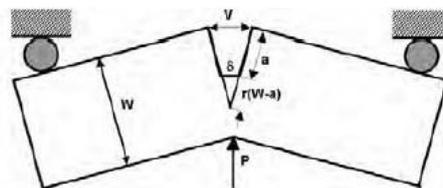
El valor de *CTOD* puede variar desde valores muy pequeños (0,001 mm), en materiales frágiles, i.e. un material que tenga $\sigma_{ys} = 1000 \text{ MPa}$; $K_{IC} = 14 \text{ MPa m}^{1/2}$, donde

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{ys} E} = \frac{14^2}{1000 \cdot 200000} = 0,001 \text{ mm}$$

, hasta 1 a 3 mm en materiales tenaces.

Determinación de la Apertura del Frente de Grieta CTOD

La gran mayoría de las medidas de laboratorio, para la determinación del *CTOD*, han sido realizadas en probetas de flexión², apoyada en tres puntos. Actualmente se mide el desplazamiento *v* en el comienzo de la entalla, y el valor de *CTOD* se establece como si las dos partes de la probeta de flexión fueran rígidas y rotaran sobre una bisagra con el centro de rotación a la distancia *r(W-a)*; se supone que los bordes de la grieta permanecen rectos. El factor rotacional *r* se debe determinar experimentalmente, estimando el valor de *CTOD* a partir de la construcción de triángulos semejantes:



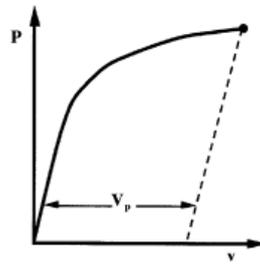
El modelo de bisagra para la estimación de δ

$$\frac{\delta}{r(W-a)} = \frac{v}{r(W-a)+a} \Rightarrow \delta = \frac{r(W-a)v}{r(W-a)+a}$$

El modelo de bisagra es inadecuado, si la mayor parte de las deformaciones son de naturaleza elástica, consecuentemente los métodos normalizados para la evaluación del *CTOD* tienen en cuenta las componentes elásticas y plásticas del desplazamiento. En la imagen se presenta la típica curva que se obtiene entre la carga y el desplazamiento que es muy parecida a una curva de tensión-deformación: inicialmente es lineal pero se desvía de la linealidad como



consecuencia de la deformación plástica y la línea de puntos representa la situación después de cesar la carga. El valor de *CTOD* está dado por:



Determinación de la componente plástica a partir del desplazamiento en la boca

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2}{m \sigma_{ys} E'} + \frac{r_p (W - a) V_p}{r_p (W - a) + a}$$

Los subíndices “*el*” y “*pl*” significan las componentes elástica y plástica respectivamente. El factor plástico rotacional, “*rp*”, es aproximadamente 0,44 para las probetas y los materiales típicos ensayados.

La integral *J*

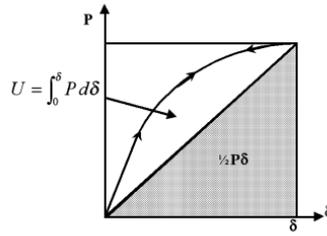
En el caso de aparecer una plasticidad apreciable en el frente de grieta, el análisis de la Mecánica de Fractura Elástica-Lineal es limitado y si se produce una importante plasticidad, la resistencia al avance de la grieta *G*, como expresión de la energía no puede ser determinada por la formulación propuesta hasta ahora, ya que *G* está afectada por la zona plástica del frente de grieta.

No existen soluciones para el comportamiento elasto-plástico; sin embargo, en 1968 Rice proporcionó las bases para extender la metodología de la Mecánica de Fractura, más allá de los límites de la MFEL, atendiendo a la necesidad de disponer de un criterio de fractura aplicable a situaciones donde existan fenómenos de plastificación importantes y que además sea directamente aplicable en el diseño. Rice propuso la integral *J* como sustitutiva de la *G* de Griffith.

La integral de contorno *J*, como expresión matemática, existe desde comienzos del Siglo xx como parámetro de caracterización mecánica en el comportamiento de materiales elásticos no lineales. En su aplicación a la Mecánica de Fractura representa la liberación energética, que bajo un estado de tensión determinado, acompañaría a la propagación de la grieta una fracción *da*, aun cuando la plasticidad en el frente de grieta fuera apreciable. Para un cuerpo elástico podemos definir la función de densidad de energía por unidad de volumen, según la expresión general:

$$W = W(\epsilon_{mn}) = \int_0^{\epsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

En la figura siguiente se puede ver esquemáticamente el comportamiento de un material no lineal y de un material elástico lineal.



Representación esquemática de la curva tensión-deformación de un material con comportamiento lineal y otro no lineal

La evaluación de la energía por unidad de volumen para el material elástico lineal es bien simple y corresponde al área del triángulo representada:

$$U = \int_0^{\delta} P d\delta = \frac{1}{2} P \cdot \delta \Rightarrow W = \frac{\text{energía}}{\text{volumen}} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon = \frac{1}{2} \sigma \cdot \epsilon$$

Ahora bien cuando consideramos el material elástico no lineal la expresión de energía $U_{no-lineal} > U_{lineal} = \frac{1}{2} P \delta$, se almacena ahora mayor cantidad de energía elástica y queda menor energía para la propagación.

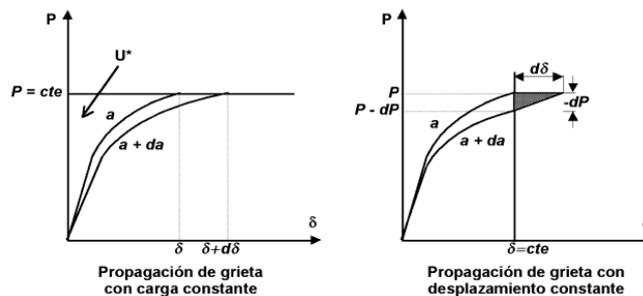
Los materiales elasto-plásticos, como los metales y los polímeros, cuando desarrollan plasticidad en una extensión muy grande a partir del frente de grieta se comportan de esta manera, independientemente de que al cesar la tensión, descarguen por rama elástica. De hecho una de las teorías importantes de estudio de la plasticidad, la de las deformaciones totales, hace exactamente este mismo tratamiento y maneja las mismas ecuaciones. Para un análisis preliminar podemos recordar de nuevo el balance de energía de Griffith:

$$U_{\text{fuerzas exteriores}} = U_{\text{elástica}} + U_{\text{para propagar la grieta}}$$

Definiendo J como:

$$J = \frac{dU_{\text{propagar la grieta}}}{dA_{\text{area de grieta creada}}} = \frac{d(U_{\text{fuerzas exteriores}} - U_{\text{elástica}})}{dA}, \text{ donde } U_{\text{elástica}} = \int_0^{\delta} P d\delta;$$

Con las dos formas de crecimiento de grieta: propagación con carga constante y propagación con desplazamiento constante. En estos dos casos se cumplirá:





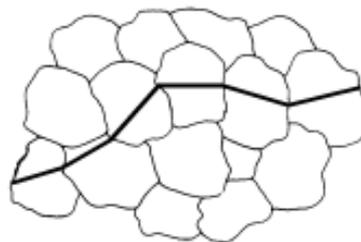
Mecanismos de fractura

Fractura frágil: Clivaje

La tenacidad es el término utilizado para definir la capacidad de un material para deformarse plásticamente y absorber energía, como consecuencia del mecanismo de rotura. Los términos de uso ordinario como dúctil o frágil, refiriéndose a materiales conllevan en el uso ordinario la definición de que se trata de materiales de alta tenacidad (dúctil) o baja tenacidad (frágil). En este contexto el clivaje es el mecanismo de fractura más frágil que se puede originar en materiales cristalinos.

La fractura por clivaje se puede definir como una 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 dos razones: el número de enlaces a separar es menor y la distancia interplanar es mayor. El mecanismo de fractura por clivaje es más susceptible cuando la deformación plástica está restringida: por ejemplo, los metales de cristalización cúbica centrada en las caras (FCC), como el níquel, cobre, aluminio, etc. Con gran número de sistemas de deslizamiento, normalmente presentan baja susceptibilidad a la fractura por clivaje. A baja temperatura los metales BCC fallan por clivaje porque tienen un número limitado de sistemas de deslizamiento, particularmente el hierro y los aceros dulces, el wolframio, molibdeno y cromo. Finalmente los metales policristalinos, hexagonal compacto (HCP), que solo tienen tres sistemas de deslizamiento por grano son susceptibles de fractura por clivaje, como el cinc, berilio y magnesio.

El hierro (BCC) por ejemplo, se fractura por clivaje a lo largo de los planos del cubo de su celda unitaria. Esta característica hace que la superficie de la grieta de clivaje sea relativamente lisa en cada grano, presentándose en los materiales policristalinos con una trayectoria transgranular.



Fractura dúctil

La fractura dúctil está asociada con deformación plástica; la cantidad de deformación plástica que se necesita para producir la fractura puede ser, en algunos casos limitada, con un consumo de energía pequeño, en este caso aun cuando literalmente la fractura presente deformación plástica, desde el punto de vista ingenieril, la fractura es frágil y puede iniciarse en una entalla o grieta aguda, con valores relativamente bajos de la tensión nominal, particularmente si se da un estado de deformación plana que reduce las posibilidades de deformación plástica.

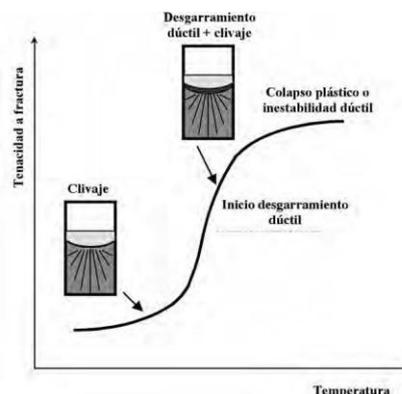


Transición dúctil-frágil

Generalmente todos los materiales metálicos presentan una temperatura de transición dúctil-frágil, de forma que a temperaturas más elevada que la de transición las probetas ensayadas presentan valores de tenacidad a fractura altos, mientras que a temperaturas menores que la de transición, los valores pueden ser extraordinariamente bajos. Este fenómeno es particularmente notable en los aceros ferríticos con cristalización BCC, los cuales cambian drásticamente en sus valores de tenacidad a fractura cuando se ensayan a bajas temperaturas.

A bajas temperaturas el acero es frágil y la fractura se produce por clivaje sin embargo, a altas temperaturas la fractura es dúctil y crece por coalescencia de microhuecos. Hay una temperatura frontera que se denomina temperatura de transición, pero esta temperatura de transición incluye una zona adjunta superior e inferior que contiene la zona de transición. A una temperatura superior a las temperaturas de transición pero debajo de la zona de ductilidad total, la fractura se inicia por coalescencia de microhuecos pero a continuación se transforma en una rotura frágil por clivaje. En el inicio de la fractura no se produce el clivaje porque no han aparecido partículas de tamaño crítico cerca del frente de grieta, capaces de desencadenar el clivaje, pero en cuanto se presenta una de estas partículas de tamaño crítico en el frente de grieta se dispara el clivaje.

La aparición de una partícula de tamaño crítico en el frente de grieta es un problema de probabilidades y por lo tanto para determinar con rigor la temperatura de transición se necesita un muestreo estadístico que permita optimizar el número de ensayos a realizar. Una forma de abaratar el costo de la determinación de la temperatura de transición consiste en realizar ensayos de medida de absorción de energía de impacto mediante los ensayos Charpy o Izod, mucho más económicos que los ensayos de tenacidad a fractura y que pueden valer perfectamente para esta determinación.



Ensayo Charpy

En materiales sometidos a efectos exteriores instantáneos o variaciones bruscas de las cargas, las que pueden aparecer circunstancialmente, su rotura se produce generalmente de forma súbita, al no aceptar deformaciones plásticas o por fragilidad, aun en aquellos metales considerados como dúctiles.

Los ensayos de choque determinan la fragilidad o capacidad de un material de absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario para introducir la fractura de la probeta de un solo choque, el que se refiere a la unidad de área, para obtener lo que se denomina resiliencia. Este



nuevo concepto, tampoco nos ofrece una propiedad definida del material, sino que constituye un índice comparativo de su plasticidad, con respecto a las obtenidas en otros ensayos realizados en idénticas condiciones, por lo que se debe tener muy en cuenta los distintos factores que inciden sobre ella.

El objeto del ensayo de choque es el de comprobar si una maquina o estructura fallará por fragilidad bajo las condiciones que le impone su empleo, muy especialmente cuando las piezas experimentan concentración de tensiones, por cambios bruscos de sección, mecanizados incorrectos, etc o bien verificar el correcto tratamiento térmico del material ensayado.



Método de Ensayo

Los ensayos dinámicos de choque se realizan generalmente en máquinas denominadas péndulos o martillo pendulares, en las que se verifica el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada, realizándose la experiencia en la mayoría de los casos, de dos maneras distintas el método Izod y el método Charpy. En ambos casos la rotura se produce por flexionamiento de la probeta, por lo que se los denomina flexión por choque.

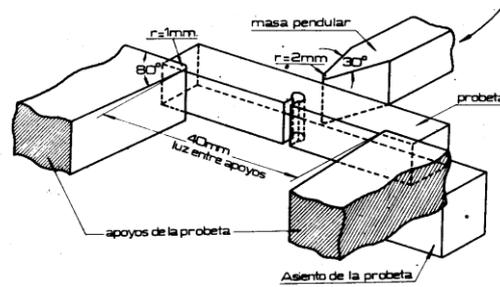
Método Charpy

Flexión por choque sobre barras simplemente apoyadas con la finalidad de que el material esté actuando en las más severas condiciones, el método Charpy utiliza probetas ensayadas (estado triaxial de tensiones) y velocidades de deformación de 4,5 a 7m/s.

Las probetas se colocan simplemente apoyadas sobre la mesa de la máquina y en forma tal que la entalladura se encuentra del lado opuesto al que va a recibir el impacto.

La temperatura también juega un papel muy importante en cuanto al ensayo Charpy, ya que a mayor temperatura es mayor la energía para romper el material y con poca temperatura, el material, se fractura con poca energía absorbida.

A temperaturas elevadas el material se comporta de manera dúctil con gran deformación y estiramiento antes de romperse. A temperaturas reducidas el material es frágil y se observa poca deformación en el punto de fractura. La temperatura de transición es aquella a la cual el material cambia de presentar una fractura dúctil a una frágil.



3.2 FATIGA

Mediante el análisis de fallos, observamos que repetidos ciclos de carga y descarga debilitan las piezas a lo largo del tiempo, incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Este fenómeno se le conoce como **Fatiga**. Cada ciclo de fluctuación de la tensión deteriora o daña la pieza un poco. Tras un nº de ciclos determinado, la pieza está tan debilitada que rompe por Fatiga. Para complicar el tema también se observa en piezas metálicas que por debajo de un cierto valor de la tensión no se produce la rotura por elevado que sea el nº de ciclos de trabajo de la pieza. Todo esto hace que la Fatiga sea realmente compleja y por desgracia para el ingeniero de diseño una de las primeras causas de fallo en muchas piezas construidas con materiales férricos. Ejemplos de fallo por fatiga los tenemos en máquinas rotativas, tornillos, alas de aviones, productos de consumo, ruedas de ferrocarril, plataformas marítimas, barcos, vehículos y puentes.

Debido a este hecho, el análisis de fallo es tan importante, ya que mediante estos podemos evitar que dichos fallos se vuelvan a repetir, evitando así pérdidas humanas, económicas y medioambientales.

Definición

La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones VARIABLES en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (ASTM). El 90% de las piezas que se rompen en servicio fallan debido a este fenómeno.

Características de una rotura por fatiga

La rotura tiene su origen en pequeños defectos o concentradores de tensión. Cada uno de los ciclos produce un avance del frente de grieta hasta que la sección remanente no es capaz de soportar la carga estática. El inicio y la propagación de la grieta dependen fuertemente de las características resistentes del material, de su estructura cristalina y del tratamiento a que se somete en su proceso de fabricación.

El colapso por fatiga, en su inicio, es un fenómeno superficial y su avance depende del nivel de tensión aplicado.



Tipos de fatiga

Pueden darse dos tipos:

- Componentes fisurados: Hay fisuras desde el comienzo del análisis y la fatiga está controlada por la fase de propagación.
- Componentes no fisurados: No existen fisuras iniciales y la fatiga está controlada por la fase de Iniciación. Que a su vez se dividen en:
 1. Fatiga de alto número de ciclos (curvas S-N):
 - Más de 10000 ciclos hasta rotura
 - Tensiones inferiores al límite elástico
 2. Fatiga de bajo número de ciclos (curvas E (Epsilon)-N):
 - Menos de 10000 ciclos hasta rotura
 - Tensiones superiores al límite elástico.

Métodos de evaluación de la fatiga

Los diferentes métodos para evaluar la fatiga de las articulaciones y componentes soldados considerar son: estrés nominal, las tensiones hot-spot estructural, la tensión eficaz de muesca, fractura la mecánica y las pruebas de componentes.

Evaluación de la fatiga se requiere generalmente para los componentes sujetos a cargas fluctuantes. En los siguientes casos, no se requiere una evaluación detallada de fatiga. Si hay alguna duda de que estos criterios se apliquen, se recomienda una evaluación de la fatiga:

- a) La mayoría de diseños nominales satisfacen el rango de estrés, el cual debe tomarse de un código de diseño aplicable. Este párrafo no es aplicable a los empalmes tubulares.
- b) La suma Miner D (Sección 4.3.1) es menor que o igual a $D = 0,5$ cuando evaluado utilizando la fatiga clase FAT 36 para el acero o FAT 12 para aluminio.
- c) Para un detalle para los que se especifica un límite de fatiga de amplitud constante $\Delta\sigma_R$, L y todos los rangos de tensión de diseño están bajo un diseño asumido o especificado límite de resistencia a la fatiga.

La elección del método para la evaluación de la fatiga dependerá de la información inicial de la que disponemos, acerca del tipo de unión soldada y de la carga aplicada.

Acciones de la fatiga

Todos los tipos de fluctuaciones de carga que actúa sobre el componente y las tensiones resultantes tienen que ser consideradas para el cálculo a fatiga. Destacan los factores de intensidad de tensiones, que tienen que ser determinados de acuerdo con el procedimiento de evaluación de la fatiga aplicada.

Las acciones se originan debido a las cargas vivas, pesos muertos, nieve, viento, olas, presión, aceleraciones, respuesta dinámica y acciones debidas a los cambios de temperatura, deben también ser consideradas.

Determinación de la fatiga

En la evaluación del comportamiento de la fatiga, se establece una estimación segura de la carga de fatiga, la cual debe soportar la estructura o componente en cuestión es crucial. Todos



los tipos de carga deben ser considerados. La fluctuación de carga de diferentes fuentes puede ser significativa en diferentes fases de la vida de la estructura o del componente.

Evaluación de la fatiga se basa generalmente en rango de esfuerzos o el rango del factor de intensidad de tensiones. Por lo tanto, los de la carga de fatiga (acciones) tienen que ser expresado en estos términos.

Las tensiones máximas y mínimas se calculan a partir de la superposición de todas las cargas:

- a) Las fluctuaciones en las magnitudes de cargas.
- b) Movimiento de cargas en la estructura.
- c) Los cambios en las direcciones de carga.
- d) las vibraciones estructurales debido a cargas y respuesta dinámica.
- e) los transitorios de temperatura.

El análisis de fatiga se basa en el efecto acumulativo de todas las cargas a las que está sometida la estructura, durante toda la vida de la misma.

Método tensión nominal

Tensión nominal es la tensión calculada en el área de la sección en cuestión, sin tener en cuenta la tensión local a efectos de la unión soldada, pero incluyendo el estrés a efectos de la forma macrogeométrica del componente. La tensión nominal puede variar a lo largo de la sección en cuestión. Los efectos de las características macrogeométricas de los campos de componentes y del estrés en las proximidades de las cargas concentradas, se deben incluir en la tensión nominal.

El cálculo de la tensión nominal en componentes simples se puede determinar usando teorías elementales de mecánica estructural basadas en el comportamiento elástico-lineal. La tensión nominal es el promedio del estrés en el cuello de la soldadura o en el bode de la soldadura de la placa.

En otros casos, el método de elementos finitos de modelado (FEM) puede ser utilizado. Principalmente en los siguientes casos:

- a) Estructuras hiperestáticas
- b) Existencia de discontinuidades en los componentes estructurales macrogeométricos, porque no hay soluciones analíticas disponibles.

Si se utiliza el método de elementos finitos, el mallado puede ser simple y grueso. Se debe tener un gran cuidado a la hora de crear el mallado para garantizar que el cálculo de las tensiones nominales se realizan correctamente.

Las curvas S-N de resistencia a la fatiga de los detalles estructurales se basan en la tensión nominal, sin tener en cuenta las concentraciones de tensión debido a la unión soldada. Por tanto, la tensión nominal medida debe excluir la concentración de tensión debido a la correspondiente discontinuidad en el componente estructural.

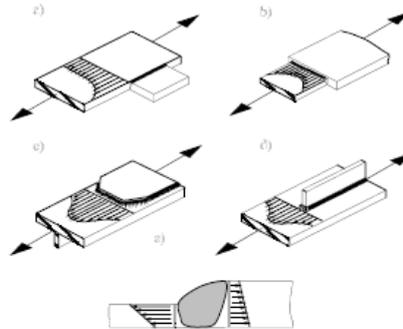
Método HOT SPOT STRESS

La tensión estructural o geométrica (σ_{hs}) en el punto caliente incluye todas las tensiones de un aumento de detalle estructural, debido a la soldadura local de perfil en sí. Así, la tensión no lineal (σ_{nlp}) causada por la muesca local, es decir el borde de la soldadura, se excluye de la tensión estructural. La tensión estructural depende de los parámetros dimensionales y de



carga globales del componente. Los puntos calientes estructurales, ohs, se definen generalmente por estructuras de placa, Shell y tubulares.

La tensión hot-spot estructural, puede ser determinada usando los puntos de referencia por extrapolación al borde de la soldadura bajo consideración de las tensiones en los puntos de referencia. En sentido estricto, el método como se define aquí es limitado a la evaluación de la punta de soldadura, (casos A hasta E).



El análisis de las discontinuidades y detalles estructurales para obtener el punto caliente estructural, no es posible usando métodos analíticos. Fórmulas paramétricas son raramente disponibles. Así, el análisis de elementos finitos (FEA) se aplica generalmente.

La tensión del punto caliente estructural se calcula sobre la base de una idealizada unión soldada. En consecuencia, cualquier posible desalineación tiene que ser tomado explícitamente en cuenta en el modelo FEA o por aplicación de una tensión apropiada. Esto se aplica especialmente a las soldaduras a tope, articulaciones cruciformes y filete transversal de un solo lado soldadas adjuntos en un lado de una placa no compatible.

Tipos de puntos calientes

Además de las definiciones de tensión como punto caliente estructural dada anteriormente, dos tipos de puntos calientes se definen de acuerdo con su ubicación en la placa y su orientación con respecto al borde de la soldadura como se define en la siguiente tabla.

Type	Description	Determination
a	Weld toe on plate surface	FEA or measurement and extrapolation
b	Weld toe at plate edge	FEA or measurement and extrapolation

La tensión estructural actúa normal al borde de la soldadura en cada caso y se determina ya sea por un procedimiento FEA especial o por extrapolación a partir de las tensiones medidas.

Método de factor de concentración de tensiones

La tensión total en la raíz de una muesca, que se obtuvo asumiendo un comportamiento línea elasticidad del material, debe tener en cuenta la variación de los parámetros de la soldadura, así como del comportamiento del material no lineal en la base de la ranura, el contorno de la soldadura real se sustituye por uno efectivo. Para los aceros estructurales y las aleaciones de aluminio se toma un radio eficaz de 1 mm, *el cual* ha sido verificado. Como con otros métodos de evaluación, es necesario comprobar que la curva de resistencia a la fatiga del metal base no se supera.



El método se limita a la evaluación de las uniones soldadas con respecto al potencial de fallos por fatiga del borde de la soldadura o de la raíz de la soldadura. La evaluación debe ser la fatiga realizada, además, en los dedos de los pies de soldadura para el material parental. El método no es aplicable si hay un estrés significativo del componente paralelo a la soldadura.

El método es muy adecuado para la comparación de las geometrías de soldadura alternativas. A menos que se especifique lo contrario, se sugiere que las soldaduras deben ser modeladas con ángulos de flanco de 30E para soldaduras a tope y 45E para soldaduras de filete. El método se limita a espesores $t \geq 5$ mm.

Puede ser calculado por fórmulas paramétrica, tomada de diagramas o calculadas por elementos finitos o elementos de contorno de modelos. El radio efectivo de la muesca se introduce de tal manera que la punta del radio coincide con la raíz de la verdadera categoría.

Método factor de intensidad de tensiones.

La mecánica de la fractura se utiliza para evaluar el comportamiento de grietas. Se puede utilizar para calcular el crecimiento de una grieta inicial (a_i) a un tamaño final (a_f). La iniciación de grietas, ocupa una pequeña proporción de las vidas de las uniones soldadas en los metales estructurales, el método es adecuado para la evaluación de la resistencia a la fatiga, los intervalos de inspección, las imperfecciones de soldadura sin grieta y el efecto de la carga de amplitud variable.

El parámetro que describe la acción de la fatiga en un extremo de la fisura en términos de grieta de propagación es el factor de intensidad de tensiones (Delta K).

Los cálculos relacionados con las uniones soldadas se basan generalmente en la tensión total, en la base de la ranura por una variedad de detalles estructurales soldadas, las funciones de corrección que permiten el efecto de la concentración de esfuerzos se han establecido. Otras funciones de la corrección pueden ser necesarias dependiendo del tamaño y la forma de la grieta en comparación con el tamaño del componente que contiene la grieta.

Los cálculos de los factores de intensidad pueden realizarse de dos maneras:

- Mediante Fórmulas paramétricas.
- Mediante elementos finitos.

Historia de la fatiga en la pieza

Los datos de diseño de fatiga se obtienen a partir de pruebas realizadas en el marco carga de amplitud constante. Sin embargo, las cargas y las acciones resultantes de la fatiga en las estructuras reales generalmente fluctúan de manera irregular y dan lugar a la carga de amplitud variable. El rango de tensión puede variar en magnitud y en el período de ciclo a ciclo.

La historia de las tensiones es un registro de las fluctuaciones de la fatiga en el tiempo de servicio esperado del componente. Se describe en términos de máximos y mínimos sucesivos de la tensión causada por las acciones de fatiga. Su objetivo debe ser cubrir todos los eventos de carga y la correspondiente respuesta dinámica inducida de una forma conservadora.

En la mayoría de los casos, la historia de tiempo de las tensiones es estacionaria, lo que permite la definición de una gama media y su varianza, un histograma y distribución



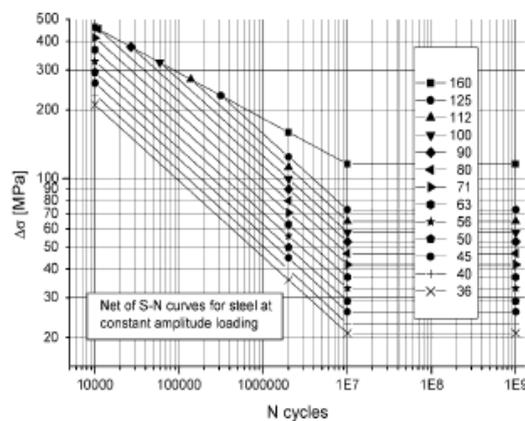
estadística, una energía espectro y valores máximos de distribución probabilística de una representación que cubre un período limitado de operación.

Una historia de la tensión puede darse como:

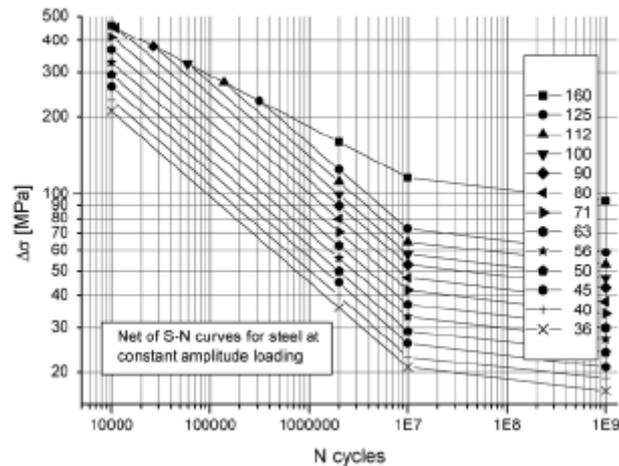
- a) Un registro de máximos y mínimos sucesivos de la tensión medida en una comparable estructura para la carga comparable y vida de servicio, o una secuencia típica de cargas.
- b) Una matriz de transición de dos dimensiones de la historia de la tensión derivada.
- c) Un rango de tensiones de una o dos dimensiones obtenida a partir de un método de recuento específico.
- d) Una gama unidimensional de la tensión específico por un código de diseño.

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga por lo general se deriva de las pruebas de amplitud constante o variable. Los datos de resistencia de fatiga propuestos para las uniones soldadas se expresan como curvas S-N. Sin embargo, existen diferentes definiciones de fracaso en la fatiga convencional de resistencia. En general, las pequeñas muestras soldadas se ponen a prueba para completar la ruptura, que es generalmente muy cerca del espesor de rotura. En piezas de gran tamaño, la observación de una grieta más grande o través de la pared se toma generalmente como un fracaso. Los fallos de fatiga de acuerdo con las presentes curvas S-N corresponden efectivamente a través de la sección de agrietamiento. Las curvas S-N son de la forma:



Donde la pendiente m puede adoptar diferentes valores en el rango de posibles vidas de fatiga, de la baja resistencia al régimen de alta ciclo.



Para los análisis de la mecánica de fractura, los datos de resistencia a la fatiga son en la forma de relaciones entre Delta K y la velocidad de propagación de grietas por fatiga (da/dN). El Rango (nominal) de tensión debe estar dentro de los límites de las propiedades elásticas de la material. El rango de los valores de diseño de la gama de tensión no será superior a 1,5 A fy para tensiones normales nominales o 1.5 A fy / 3% para los esfuerzos cortantes nominales.

Resistencia de fatiga clasificados estructural detalles

La evaluación de la fatiga de detalles estructurales y uniones soldadas se basa en el rango de tensión nominal. En la mayoría de los casos los detalles estructurales son evaluados sobre la base que alcance el máximo esfuerzo principal en la sección donde se considera potencial agrietamiento por fatiga.

Las curvas de fatiga se basan en investigaciones experimentales representativas y por lo tanto incluyen los efectos de:

- Las concentraciones de esfuerzos punto caliente estructurales debido a los detalles mostrados.
- Las concentraciones de esfuerzos locales debido a la geometría de soldadura
- Imperfecciones de soldadura consistentes con los estándares normales de fabricación.
- Dirección de la carga.
- Altas tensiones residuales.
- Condiciones metalúrgicas.
- Proceso de soldadura (soldadura por fusión, a menos que se indique lo contrario).
- Procedimiento de inspección (NDT), si se especifica.
- El tratamiento posterior a la soldadura, si se especifica.

Por otra parte, dentro de los límites impuestos por consideraciones de resistencia estática, las curvas de fatiga de uniones soldadas son independientes de la resistencia a la tracción del material.

Cada curva S-N de resistencia a la fatiga se identifica por la resistencia a la fatiga característica del detalle en MPa a 2 millones de ciclos. Este valor es la clase de fatiga (FAT).



Las curvas S-N para detalles de soldadura se refieren a modos de fallo específicos, generalmente de grietas por fatiga, el crecimiento de la punta de soldadura a través del material de base, de la raíz de la soldadura, o desde la superficie de soldadura a través de la soldadura y luego en el material base.

Técnicas de mejora

Las técnicas de mejora después del soldeo pueden aumentar la resistencia a la fatiga, por lo general como resultado de una mejora en el perfil de soldadura, las condiciones de estrés residuales o las condiciones ambientales de la unión soldada. Ellos se pueden utilizar para aumentar la resistencia a la fatiga de nuevas estructuras, en particular si un detalle de la soldadura puede ser una zona crítica o como una parte de la reparación o mejora de una estructura existente.

Las principales técnicas de mejoras son:

- a) Los métodos para la mejora de perfil de soldadura:
 - Mecanizado o rectificado de tapa, pero la soldadura al ras de la superficie.
 - Mecanizado o rectificado de la transición de soldadura en la punta.
 - Refusión de la punta de soldadura por TIG, plasma o láser vestido.
- b) Los métodos para la mejora de las condiciones de tensión residual:
 - El martillado (martillo-, agujas, Shot, cepillo-granallado o tratamiento por ultrasonidos).
 - Sobreesfuerzo (prueba a prueba.)
 - El alivio de tensión.
- c) Métodos para la mejora de las condiciones ambientales:
 - Pintura.
 - Recubrimiento de resina.

Los efectos de todas las técnicas de mejora son sensibles al método de aplicación y a la carga aplicada, siendo más efectiva en el régimen de alto ciclo de baja tensión.

La porosidad e inclusiones

Las discontinuidades volumétricas tales como la porosidad e inclusiones, son consideradas como imperfecciones de soldadura competitivas, que pueden proporcionar sitios alternativos para la iniciación de grietas por fatiga, a los cubiertos por las tablas de resistencia de fatiga de los detalles estructurales.

Antes de evaluar las imperfecciones con respecto a la fatiga, se debe verificar que las condiciones a solicitar en las muescas sean competitivas, es decir, que los sitios esperados del inicio de la grieta en las tablas de resistencia a fatiga no coinciden con la porosidad o inclusiones a ser evaluados y que no hay interacción entre ellos.

Es importante asegurarse de que no hay interacción entre múltiples imperfecciones de soldadura, porosidad o inclusiones, ya se tratarán como una sola gran imperfección.



La desalineación

La desalineación en las articulaciones cargadas axialmente conduce a un aumento de la tensión en la unión soldada, debido a la ocurrencia de la cáscara secundaria de esfuerzos de flexión. La tensión resultante es calculada por el análisis de tensión o mediante el uso de las fórmulas para el factor de ampliación tensión. Las fórmulas de estos factores de ampliación se dan:

Type of k_w analysis	Nominal stress approach	Structural hot spot and effective notch approach	
Type of welded joint	k_w already covered in FAT class	k_w already covered in SN curves	Default value of effective k_w to be considered in stress
Butt joint made in shop in flat position	1,15	1,05	1.10*
Other butt joints	1.30	1,05	1.25*
cruciform joints	1.45	1,05	1.40*
Fillet welds on one plate surface	1,25	1,05	1.20**

*) but not more than $(1 + 2.5 \cdot e_{max}/t)$, where e_{max} = permissible misalignment and t = wall thickness of loaded plate
 **) but not more than $(1 + 0.2 \cdot t_w/t)$, where t_w = reference wall thickness of fatigue resistance curves

Puede verse fácilmente que la desalineación es un factor muy importante en la fatiga.

Alguna previsión por desalineación ya está incluida en las tablas de clasificación de los detalles estructurales. En particular, los datos para soldaduras transversales a tope son de aplicación directa de la desalineación que dan como resultado un aumento de la tensión de hasta 30 %, mientras que para las articulaciones cruciformes el aumento pueden ser de hasta el 45%.Indicaciones de END son idealizadas como grietas elípticas para los que se calcula el factor de intensidad de tensiones. Un procedimiento simplificado, que se basa en la integración de la ley de propagación de grietas de un defecto inicial “ai”, de un tamaño no superior del 0,75 % del espesor de la pared.

El verdadero problema en los ensayos no destructivos es la determinación de las dimensiones de una grieta o de una imperfección de grietas similares. Se necesitan estas dimensiones para la evaluación.

La esperanza que existe, es un futuro procedimientos que posea imágenes del tamaño y ubicación de las grietas reales, por el cual estas dimensiones son directamente visibles. Este punto es importante, porque todos los procedimientos de mecánica de la fractura son sensibles a la ubicación y las dimensiones del fallo inicial.

Evaluación de la fatiga

En una evaluación de la fatiga, las acciones de fatiga y la resistencia a la fatiga están relacionadas por medio de un procedimiento de evaluación adecuado. Tres procedimientos se pueden distinguir:

- a) Procedimientos basados en curvas S-N, tales como
 - Enfoque de tensión nominal
 - Enfoque tensión punto caliente Estructural
 - Enfoque tensión muesca Efectiva
- b) Procedimientos con base en consideraciones de propagación de grietas por fatiga



- c) Enfoque experimental directa por el ensayo de fatiga de los componentes o la totalidad estructural.

Si se producen esfuerzos normales y cortantes simultáneamente, se considerará su efecto combinado. Tres casos se pueden distinguir:

- a) Si el rango de tensión cortante nominal es de menos de 15% del rango de tensión normal o si la suma de daños por fatiga debido a la gama de tensión de cizalla es menor que 10% de ese debido a la gama de tensión normal, el efecto de la tensión de cizallamiento se puede despreciar.
- b) Si las tensiones normales y de corte varían simultáneamente en fase, o si el plano de tensión máxima principal no cambia significativamente ($<20^\circ$), el alcance máximo de la tensión principal se debe utilizar.
- c) Si las tensiones normales y de corte varían de forma independiente fuera de fase. Los cálculos de propagación de grietas por fatiga deben basarse en el máximo rango de tensión principal.

Evaluación de fatiga mediante curvas s-n

La evaluación de la fatiga se llevó a cabo utilizando el espectro de diseño de las acciones de fatiga en términos de tensión oscilante $\Delta\sigma_i$, S, D, en la que el tensiones del espectro característico $\Delta\sigma_i$, S, k se han multiplicado por la seguridad parcial γ_F del factor de las acciones de fatiga. La curva S-N resistencia de cálculo puede ser modificadas adicionalmente de acuerdo con los requisitos de la procedimiento de cálculo de daño.

Para la carga de amplitud constante, el rango de tensión característica $\Delta\sigma_R$, k debe determinarse en el número requerido de ciclos de tensión que se determina en primer lugar.

Para la carga de amplitud constante, que produce tensiones normales y de corte, se utilizará la máxima tensión principal, siempre que su dirección es de $\pm 60^\circ$ de la normal a la soldadura. De lo contrario, se puede elegir entre dos métodos:

Palmgren-miner

En primer lugar, deberá especificarse el número requerido de ciclos de la curva de diseño S-N. Si el rango de tensión de diseño máxima $\Delta\sigma_{max}$, S, D en el espectro de carga es menor que la unión soldada se puede suponer infinito y el cálculo de daño adicional es necesario.

Sin embargo, no se recomienda este procedimiento para el aluminio o para acero necesarios para sobrevivir durante números muy altos de carga. Se acepta que las tensiones por debajo del límite de fatiga de amplitud constante supuesta o por debajo del punto de inflexión se debe incluir en el cálculo de daño acumulativo en relación a las uniones soldadas.

En algunos casos un rango de tensión de amplitud constante equivalente $\Delta\sigma_{eq}$, S puede necesitar ser determinada y se compara directamente con la curva S-N de resistencia de amplitud constante.



En los casos en que las tensiones que actúan en diferentes direcciones con respecto a la soldadura son evaluadas por diferentes métodos, la verificación por parte de las fórmulas dadas anteriormente se debe realizar con los datos de resistencia a la fatiga por el mismo método.

Cálculo no lineal de daños

Una mecánica de la fractura del cálculo de daño no lineal se recomienda cuando:

- a) La suma Miner es sensible a la ubicación exacta de la punta de la fatiga de la rodilla curva de resistencia S-N.
- b) El espectro de las acciones de fatiga (cargas) varía en servicio o se cambia, por lo que la secuencia de cargas se vuelve significativa.
- c) La curva S-N resistencia de un componente pre-dañado tiene que ser estimado.

Cuando no se conoce los parámetros para una evaluación mecánica de la fractura de fatiga y sólo se conoce la curva de resistencia SN, la curva S-N se puede utilizar para derivar la fractura adimensional de parámetros mecánicos, que permiten un cálculo de daño. El procedimiento se basa en la " ley Paris" de la potencia de propagación de grietas donde a = parámetro adimensional de la grieta.

Cálculo de la propagación de grietas

La acción de fatiga representada por el espectro de diseño de intervalos de factor de intensidad de tensiones se verifica por los parámetros de diseño de la resistencia del material contra la propagación de las grietas usando la " ley de Paris" donde:

$$\frac{da}{dN} (m/c) = C(\Delta K (MPa\sqrt{m}))^m$$

- a = tamaño grieta
- N = Número de ciclos
- Delta K gama = factor de intensidad de tensiones
- ΔKth = valor umbral del rango del factor de intensidad de tensiones por debajo del cual no se propaga grieta

Para los factores de intensidad de tensiones aplicadas, que son altas en comparación con la resistencia a la fractura de los materiales, Kc, se producirá una aceleración de la propagación de grietas.

Se recomienda la extensión de la " ley París" de la potencia de propagación de grietas en la ausencia de un valor exacto de la tenacidad a la fractura, se debe hacer una estimación conservadora. Donde:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_g \cdot \Delta K^m}{(1-R) \cdot \frac{\Delta K}{K_c}} \quad (4.16)$$

- Kc = Resistencia a la fractura
- R = relación de tensiones



La resistencia a la fatiga N se determina por la integración de partida de un parámetro inicial de grieta a_i a uno final a_f . El número calculado de ciclos de vida de N debe ser mayor o igual al número requerido de ciclos de vida. En general, la integración tiene que ser llevado a cabo numéricamente.

Evaluación de la fatiga mediante ensayos

Una evaluación experimental a fatiga de componentes o estructuras puede ser necesaria para diferentes razones:

- a) Existencia de un nuevo diseño sin o con conocimiento o experiencia de su comportamiento a fatiga.
- b) La verificación de un componente o estructura para una probabilidad de supervivencia a fatiga indicada.
- c) Optimización del diseño y / o fabricación con respecto al peso, la seguridad y la economía después del diseño inicial.

En las pruebas de componentes, la naturaleza estadística de la fatiga debe ser considerada. También podría ser necesario tener en cuenta las diferencias en la calidad de fabricación entre el componente probado y la estructura real.

Idealmente, los ensayos de fatiga se deben realizar en condiciones de carga que representan el servicio normal de elemento.

El primer elemento en fallar de los ensayos, se utiliza por lo general para ahorrar tiempo cuando un gran número de ejemplares idénticos se ponen a prueba. Los resultados pueden ser utilizados para establecer una vida de fatiga seguro para el componente, pero sólo en el nivel de la prueba.

Los resultados de las pruebas deben documentarse de acuerdo con el enfoque seleccionado:

- La media del logaritmo del número de ciclos al fallo de toda la muestras o detalles.
- El número de ciclos hasta el fallo del primer fracasó dentro de los detalles probados.

Criterios de aceptación

La vida a fatiga requerida o utilizable del componente o estructura debe ser menor que el mínimo resistencia a la fatiga probable estimado sobre la base de las pruebas.

Evaluación de la vida segura

La evaluación de vida segura considera cada elemento estructural y detalle como independiente. Cada elemento debe cumplir con los criterios de aceptación definidos antes de realizar los ensayos. Los coeficientes parciales de seguridad γ_F aplicados a las acciones de fatiga (cargas) y γ_M aplican a la resistencia a la fatiga pueden ser seleccionados.

Evaluación de daños tolerante

La constatación de que una estructura es tolerante a daños requiere la demostración de que dicha estructura puede sostener agrietamientos por fatiga sin fallo hasta el momento en que se detecta el agrietamiento. Cuando el ensayo de fatiga se emplea como parte del



procedimiento de verificación, el criterio de fallo de las pruebas debe ser elegido para reflejar la influencia del tipo de carga y las condiciones de funcionamiento de la estructura real.

Los criterios para factorizar la vida obtenida en las pruebas dependen de la aplicación, se recomienda establecer un acuerdo sobre la elección del factor F entre las partes relevante.

Razones de seguridad

Un componente tiene que ser diseñado para una adecuada probabilidad de supervivencia. La supervivencia requerida depende de:

- Las incertidumbres y dispersión en los datos de evaluación de la fatiga
- Estrategia de seguridad
- Consecuencias del incumplimiento.

Las incertidumbres en los datos de evaluación de la fatiga también pueden ser el origen de las acciones de fatiga, tales como:

- Determinación de cargas y la historia de carga
- Determinación de las tensiones o los factores de intensidad de tensiones desde el modelo utilizado para el análisis
- Los problemas de respuesta dinámica.

Estas incertidumbres pueden ser cubiertos por un coeficiente parcial de seguridad apropiado para las acciones de fatiga γ_F , que no se considera aquí. Sin embargo, se hace hincapié en que los supuestos hechos en la etapa de diseño debe ser conservador y lo ideal sería ser revisado durante las primeras etapas de la operación de servicio.

Las incertidumbres en la evaluación de la fatiga que surgen de los datos de resistencia a la fatiga y daños métodos de cálculo incluyen:

- Dispersión de los datos de resistencia de fatiga,
- Dispersión de resultados de la verificación de los cálculos de daños.

Estrategias de diseño

Las diferentes condiciones de operación de servicios requieren diferentes estrategias de diseño de fatiga. La definición de una estrategia de diseño de fatiga se refiere predominantemente con el método de análisis de fatiga, la inspección y el seguimiento en el servicio.

Vida infinita del diseño

Esta estrategia se basa en mantener todas las acciones de fatiga bajo un límite de resistencia a la fatiga asumido o valor de umbral. Si regularmente en servicio no se especifica el seguimiento, la probabilidad de supervivencia debe ser alta. Esta estrategia es más adecuada para los componentes que experimentan muy alto número de ciclos, que son uniformes o preferiblemente, cerca de amplitud constante. La estrategia a menudo se basa en la suposición de que siempre hay un límite de fatiga por debajo del cual los componentes no sufren riesgo de rotura.



Fatiga en diseño seguro

Esta estrategia de diseño se basa en el supuesto de que el componente o estructura pueden tolerar extensos agrietamientos por fatiga sin fallar, posiblemente porque es estáticamente sobre determinada (híper-estática) o hay una redundancia adecuada.

El control en servicio no es por lo general proporcionado, se basa en la redistribución de fuerzas si se produce agrietamiento, que puede ser fácilmente detectado y reparado. Las juntas soldadas en tales estructuras pueden diseñarse para una supervivencia normal probabilidad.

Daños tolerables en el diseño

Esta estrategia de diseño se basa en el supuesto de que se forman las grietas de fatiga pero serán fácilmente detectables en servicio antes de que se vuelvan críticos. La mecánica de la fractura se puede utilizar para calcular los intervalos de inspección adecuadamente, sin embargo, aparte de las consideraciones de fatiga también puede ser necesario para asegurar que el material es suficientemente resistente para tolerar la grieta de fatiga, que podría estar presente antes de que se haya detectado.

3.3 CORROSIÓN

La trascendencia económica que tiene la corrosión y la magnitud de las pérdidas que ésta origina, son motivos suficientes para dedicar una profunda atención al estudio de los problemas de corrosión. Pero existe además otra razón, aún cuando su trascendencia económica se revela a mediano o largo plazo: el conocimiento de la naturaleza de los mecanismos de corrosión o de las limitaciones del uso de un material en un ambiente agresivo nuevo (ya sea por la naturaleza del medio o de las condiciones de operación, presión, temperatura, pH, etc.) o en un medio ya conocido.

El mayor conocimiento que se puede extraer del análisis riguroso de un fallo constituye el procedimiento más adecuado para evitar que ésta se repita.

La corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas con gastos de operación muy elevados.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

El ingeniero que trabaja en problemas de corrosión necesita saber dónde empezar y tener un conocimiento básico para reconocer la corrosión, cómo se produce, cómo impedir su severidad, qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como saber donde obtener ayuda.

Todos los metales y aleaciones son susceptibles de sufrir el fenómeno de corrosión, no habiendo material útil para todas las aplicaciones. Por ejemplo el oro, conocido por su excelente resistencia a la atmósfera, se corroe si se pone en contacto con mercurio a



temperatura ambiente. Por otra parte el acero no se corroe en contacto con el mercurio, pero rápidamente se oxida expuesto a la atmósfera.

Afortunadamente se tienen bastantes metales que pueden comportarse satisfactoriamente en medios específicos y también se tienen métodos de control de la corrosión que reducen el problema.

Los paros de las plantas pueden ocurrir y ocurren como un resultado de la corrosión, provocando gastos directos e indirectos de aspecto económico y humano.

Dentro de los aspectos económicos tenemos:

- a) Reposición del equipo corroído.
- b) Coeficiente de seguridad y sobre diseño para soportar la corrosión.
- c) Mantenimiento preventivo como la aplicación de recubrimientos.
- d) Paros de la producción debida a fallos por corrosión.
- e) Contaminación de productos.
- f) f).- Pérdida de eficiencia ya que los coeficientes de seguridad, sobre diseño de equipo y productos de corrosión por ejemplo, decrecen la velocidad de transmisión de calor en cambiadores de calor.
- g) Pérdida de productos valiosos.
- h) Daño de equipo adyacente a aquel en el cual se tuvo la fallo de corrosión.

Dentro de los aspectos humanos y sociales tenemos:

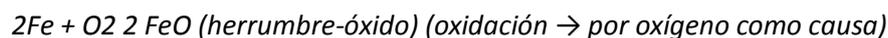
- a) La seguridad, ya que fallos violentos pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- b) Condiciones insalubres por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c) Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufacturera.
- d) Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

Naturalmente, estos aspectos sociales y humanos también tienen sus aspectos económicos y podemos ver claramente que hay muchas razones para controlar la corrosión.

En el deterioro de materiales podemos distinguir dos procesos:

• **Oxidación directa:**

Resulta de la combinación de los átomos metálicos con los de la sustancia agresiva. Ejemplos:



Esto lleva a que el metal, con el tiempo, pase de tener un estado libre (puro) a tener un estado combinado con otros elementos (óxidos, carbonatos, sulfatos,...)

En este caso, los productos de la reacción quedan adheridos a la superficie del metal. En algunos casos, se forman películas protectoras que los aíslan del agente corrosivo. El caso más corriente es el ataque por oxígeno. En este caso, sobre el metal se forma una capa de óxido que, en algunos casos autoprotege al metal de una mayor oxidación. Cu, Ni, Sn, Al, Cr,... Los ambientes son secos.



Pero el oxígeno no es el único agente, pues también puede intervenir el cloro (Cl₂), el azufre (S), el hidrógeno (H₂), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂),...

En los procesos de **oxidación**, los metales pasan de su estado elemental a formar iones positivos (cationes) por **pérdida de electrones**.

$M \rightarrow Mn^{+} + ne$ siendo **n** el número de electrones que se pierden. A esta reacción se le llama reacción de oxidación o reacción anódica.

El proceso de oxidación se acelera si la temperatura de eleva.

- **Corrosión electroquímica o corrosión en líquidos.**

En este caso, el metal es atacado por un agente corrosivo en presencia de un electrolito. (Un electrólito o electrolito es cualquier sustancia, normalmente líquida, que contiene iones libres, que se comportan como un medio conductor eléctrico.

Normalmente un electrolito es una disolución, en la que el disolvente suele ser agua y el soluto otra sustancia). El ejemplo más conocido es el agua del mar (el cloruro sódico es un agente corrosivo), que actúa como electrolito.

Los procesos de corrosión son procesos electroquímicos, ya que en la superficie del metal se generan “micropilas galvánicas” en las que la humedad actúa como electrolito. El metal actúa como ánodo (polo positivo) y, por lo tanto, se disuelve. Así, el electrolito actúa como medio conductor a través del cual viajan las cargas que abandonan los electrones del ánodo que se corroe, el metal.

Existe un tipo de corrosión de tipo electroquímico que aparece cuando se juntan metales diferentes o son conectados eléctricamente. Al producirse el contacto, el metal más electronegativo desempeña el papel de ánodo y, por tanto, sufre la corrosión.

Definiciones que te aclaran las cosas:

- a) **Ánodo**: Metal que cede electrones y se corroe.
- b) **Cátodo**: Receptor de electrones.
- c) **Electrolito**: Líquido que está en contacto con el ánodo y el cátodo. Debe ser conductor eléctrico. Este líquido proporciona el medio a través del cual se asegura el desplazamiento de cargas eléctricas desde el ánodo hasta el cátodo.

- **Formas de la corrosión**

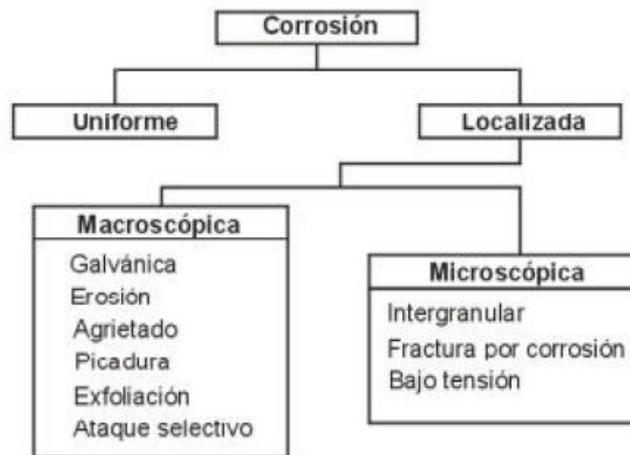
La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1. Naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
2. Mecanismo de corrosión. Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.
3. Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.



La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local.

En el ataque microscópico, la cantidad de metal disuelto es mínimo y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible.



- **Tipos de corrosión**

CORROSIÓN GALVANICA Y UNIFORME

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla.

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir, por lo que los fallos inesperados pueden ser evitados simplemente por inspección regular.

La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado.

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que este tipo de corrosión sólo causa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño.

El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La relación de áreas entre los dos metales es muy importante, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo, acelerará la corrosión, y por el contrario, una mayor área del metal activo comparada con el metal noble disminuye el ataque del primero.

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los metales y este tipo puede ser controlado por el uso de aislamientos o



restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grande en el medio ambiente en el que se encuentran. La diferencia de potencial puede ser medida, utilizando como referencia la serie galvánica de los metales y aleaciones que se presentan más adelante, en la serie de los potenciales tipo (standard) de óxido de reducción.

Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo.

CORROSIÓN POR EROSIÓN

Cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, este recibe el nombre de corrosión por erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal.

La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, etc., y frecuentemente se observa en impulsores de bombas, agitadores y en codos y cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema.

La corrosión por erosión puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.

La corrosión por cavitación y desgaste (fretting) son formas especiales de la corrosión por erosión. La primera es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie del metal. Las altas presiones producidas por este colapso pueden disolver el metal, remover las partículas protectoras, etc.

La corrosión por desgaste (fretting) ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas y el deslizamiento es generalmente un resultado de la vibración.

La corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y a continuación el óxido se desgasta, o bien, la remoción mecánica de las partículas protectoras de óxido, o los productos de la corrosión resultantes, dan como resultado la exposición de superficies limpias del metal al medio agresivo, en tal forma que el fenómeno corrosivo se acelera.

La corrosión por deslizamiento se atenúa utilizando materiales de construcción más duros, empleando lubricación o bien incrementando la fricción hasta un punto tal en que el deslizamiento es imposible.



CORROSIÓN POR AGRIETAMIENTO

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que un medio ambiente muy agresivo puede desarrollar y causar corrosión en las grietas.

Las grietas o hendiduras generalmente se encuentran en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.

La corrosión por agrietamiento, generalmente se atribuye a los siguientes factores:

- a) Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- b) Escasez de oxígeno en la grieta.
- c) Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- d) Agotamiento de Inhibidor en la grieta.

Al igual que todas las formas de corrosión localizada, la corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que otros, como por ejemplo aquéllos que dependen de las películas protectoras de óxido formadas por el aire para adquirir su resistencia a la corrosión, tal y como sucede con el acero inoxidable y el titanio. Estos materiales pueden ser aleados para mejorar su resistencia y el diseño deberá hacerse de tal manera, que se reduzcan las hendiduras, tratando de mantener las superficies limpias para combatir este tipo de corrosión.

CORROSIÓN POR PICADURA

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente no atacada y las picaduras pueden tener varias formas.

La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por sí misma.

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallos inesperados. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.

La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión.



CORROSIÓN POR EXFOLIACIÓN Y DISOLUCIÓN SELECTIVA

La corrosión por exfoliación es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar.

Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie.

Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. Este mecanismo es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmicos.

La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre-zinc, conocido con el nombre de dezincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

CORROSIÓN INTERGRANULAR O INTERCRISTALINA

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.

El arreglo atómico y los espaciamentos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado; sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano.

Los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión inter cristalina, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de los granos.

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión inter cristalina, es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.

CORROSIÓN DE FRACTURA POR TENSIÓN

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones



aleación – corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fracturas pueden seguir caminos Ínter cristalinos o transcristalinos que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Algunas de las características de la corrosión de fractura por tensión, son las siguientes:

- a. Para que esta corrosión exista, se requiere un esfuerzo de tensión.
- b. Las fracturas se presentan quebradizas en forma macroscópica, mientras que los fallos mecánicos de la misma aleación, en ausencia de un agente corrosivo específico, generalmente presentan ductibilidad.
- c. La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- d. Algunos medios ambientes específicos, generalmente causan fractura en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.
- e. La corrosión por esfuerzo puede ocurrir en medios ambientes considerados no agresivos para una aleación dada, por ejemplo la velocidad de corrosión uniforme es baja hasta que se presenta una fractura.
- f. Largos periodos de tiempo, a menudo años, pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles, pero entonces al presentarse, se propagan rápidamente con el resultado de un fallo inesperado.
- g. La corrosión por esfuerzo, no está completamente entendida en la mayoría de los casos; sin embargo, en la actualidad se dispone de muchos datos para ayudar al ingeniero a evitar este problema.

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente.

El término de fragilización por hidrógeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrógeno desempeña una función en algunos casos de ésta y para distinguir la fragilización por hidrógeno de la corrosión de fractura por tensión, es conveniente juzgar los siguientes conceptos:

- a) La fractura debido al hidrógeno introducido en el metal sin corrosión de éste, por ejemplo, en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura por tensión.
- b) La fractura debido al hidrógeno producida por una alta velocidad de corrosión uniforme como en el decapado, tampoco es corrosión de fractura por tensión porque no se necesita tener un esfuerzo mientras el hidrógeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrógeno.
- c) Cuando el hidrógeno se produce por corrosión local en una fractura o picadura sobre un metal sometido a esfuerzo de tensión y resulta una propagación en la



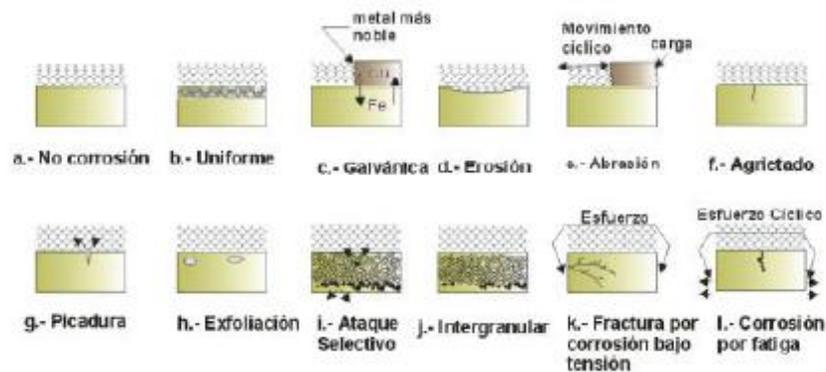
fractura, entonces sí se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura por tensión.

La corrosión por fatiga, es una forma especial del tipo de corrosión de fractura por tensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estos fallos son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua.

La corrosión por fatiga, se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo, de tal forma que el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir el fallo en aire seco.

Los métodos para evitar la corrosión por fatiga, necesitan prevenir la fractura producida por ésta desde el principio, ya que es muy difícil detener la propagación de las fracturas, una vez que se inician.

De lo indicado anteriormente, se ve la necesidad de reconocer en primer lugar, las diferentes formas en las que se presenta la corrosión para así tomar medidas pertinentes que permitan establecer los métodos correctivos para atenuarla, los cuales son mejor comprendidos si se conoce la teoría de la corrosión.



- **Protección contra la corrosión**

Impedir la corrosión implica impedir reacciones electroquímicas. Es decir, eliminar la posible presencia de un electrolito que actúe como medio conductor para facilitar una reacción de transferencia de electrones desde un metal anódico. Así, las soluciones podrían ser:

Protección por recubrimiento

Es decir, crear una capa o barrera que aisle el metal del entorno. Dentro de este tipo de protección podemos hallar

Recubrimientos no metálicos

Siendo los más comunes:

- *Pinturas y barnices*: Es económico y exige que la superficie esté limpia de óxidos y grasas
- *Plásticos*: Son muy resistentes a la oxidación y son flexibles, pero apenas resisten el calor. El más empleado es el PVC.



- *Esmaltes y cerámicos*: Tiene la ventaja de resistir las altas temperaturas y el desgaste.

Recubrimientos metálicos

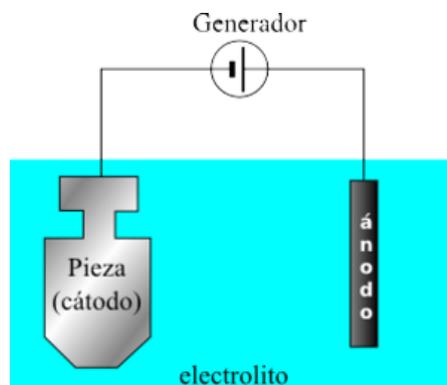
- Inmersión

Se recubre el metal a proteger en un baño de metal fundido. El metal al solidificar forma una fina capa protectora. Los metales más empleados son...

- Estaño* (la técnica se llama estañado): latas de conserva
- Aluminio* (la técnica se llama aluminización): Es económico y con calidad.
- Plomo* (la técnica se llama plomeado): Para recubrir cables y tuberías.
- Cinc* (la técnica se llama galvanizado): Para vigas, vallas, tornillos,... y otros objetos de acero.

- Electrodeposición

En este caso se hace pasar corriente eléctrica entre dos metales diferentes que están inmersos en un líquido conductor que hace de electrolito. Uno de los metales será aquel que hará de ánodo, el cual se oxidará y sacrificará. El otro metal, el que se desea proteger, hará de cátodo y ambos estarán inmersos en el electrolito que estarán en una cuba. Cuando pasa la corriente eléctrica, sobre el metal catódico se crea una fina capa protectora hecha del material procedente del metal anódico, pues la pila obliga a ceder electrones al ánodo que alcanzarán al cátodo. Cuando el metal que hace de cátodo y se desea proteger es acero y el otro que va a protegerlo (que hace de ánodo) es cinc, el proceso se llama **galvanizado**.



Protección por capa química

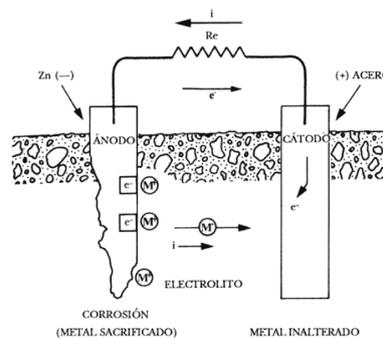
Se provoca la reacción de las piezas con un agente químico que forme compuestos en su superficie que darán lugar a una capa protectora. Por ejemplo:

- *Cromatizado*: Se aplica una solución de ácido crómico sobre el metal a proteger. Se forma una capa de óxido de cromo que impide su corrosión.
- *Fosfatización*: Se aplica una solución de ácido fosfórico y fosfatos sobre el metal. Se forma una capa de fosfatos metálicos que la protegen del entorno.



Protección catódica

Se fuerza al metal a comportarse como un cátodo, suministrándole electrones. Se emplea otro metal que estará en contacto con el metal que se desea proteger, llamado "ánodo de sacrificio", el cual se corroe y acaba destruyéndose aportando electrones al metal. En definitiva, el metal "ánodo de sacrificio" se pone en contacto con el metal a proteger el cual recibe electrones del primero. Se necesita la presencia de un electrolito. Se emplea mucho en tuberías enterradas.



Inhibidores

Se trata de añadir productos químicos al electrolito para disminuir la velocidad de la corrosión. Ejemplo: Sales de cromo. Se echan a los radiadores de los coches.

3.4 FLUENCIA

En muchas aplicaciones los componentes se ven obligados a soportar cargas constantes durante procesos prolongados, en tales circunstancias el material puede continuar deformándose hasta que su utilidad se ve seriamente perjudicada. Tales tipos de deformaciones dependientes del tiempo pueden ser casi imperceptibles, pero crecen durante toda la vida útil de la pieza y llevan a la rotura, aún sin que la carga haya aumentado.

Con cargas aplicadas por corto tiempo, como en un ensayo de tracción estático, hay una deformación inicial que aumenta simultáneamente con la carga. Si, bajo cualquier circunstancia, la deformación continúa mientras la carga se mantiene constante, a esta deformación adicional se la conoce como CREEP.

El fenómeno conocido como "creep", se define como: "la parte dependiente del tiempo de las deformaciones provenientes de tensiones".

Debido a su estrecha conexión con altas temperaturas, se suele asociar al creep con problemas vinculados con temperaturas elevadas. Esto es cierto únicamente si las temperaturas elevadas se definen relativas al punto de fusión T_m , el plomo muestra un creep significativo a temperatura ambiente y el asfalto, por ejemplo, a temperaturas menores. En algunos materiales, como en la madera, la temperatura no es un factor importante.

Limite a fluencia

El *límite de fluencia* es el punto donde comienza el fenómeno conocido como **fluencia**, que consiste en un alargamiento muy rápido sin que varíe la tensión aplicada en un ensayo de tracción, hasta el *límite de fluencia* el material se comporta elásticamente, siguiendo la ley de



Hooke, y por tanto se puede definir el módulo de Young. No todos los materiales elásticos tienen un límite de fluencia claro, aunque en general está bien definido en la mayor parte de metales.

También el denominado **límite elástico aparente**, indica la tensión que soporta una probeta del ensayo de tracción en el momento de producirse el fenómeno de **fluencia**. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.

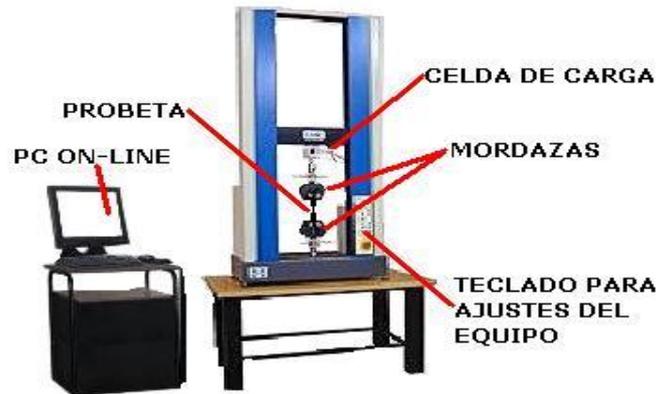
Ensayo de fluencia

Muchos materiales cuando están en servicio están sujetos a fuerzas o cargas. En tales condiciones es necesario conocer las características del material para diseñar el instrumento donde va a usarse de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture. El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.



Los términos ensayo de tensión y ensayo de compresión se usan normalmente a la hora de hablar de ensayos en los cuales una probeta preparada es sometida a una carga uniaxial gradualmente creciente (estática) hasta que ocurre el fallo. En un ensayo de tensión simple, la operación se realiza sujetando los extremos opuestos de la pieza de material y separándolos. En un ensayo de compresión, se logra sometiendo una pieza de material a una carga en los extremos que produce una acción aplastante. En un ensayo de tensión, la probeta se alarga en una dirección paralela a la carga aplicada; en un ensayo de compresión, la pieza se acorta. Dentro de los límites de lo práctico, la resultante de la carga se hace coincidiendo con el eje longitudinal de la probeta.

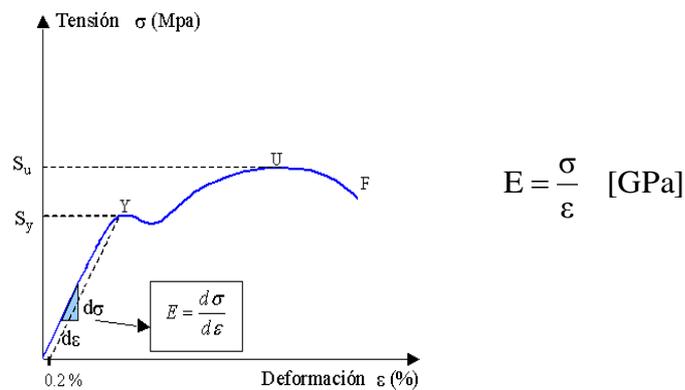
Exceptuando algunas piezas de ensayo, las probetas son cilíndricas o prismáticas en su forma y de sección transversal constante a lo largo del tramo dentro del cual las mediciones se toman. Las probetas en compresión quedan limitadas a una longitud tal que el pandeo debido a la acción columnar no constituya un factor.



Los ensayos estáticos de tensión y de compresión son los más realizados, además de ser los más simples de todos los ensayos mecánicos. Estos ensayos implican la normalización de las probetas con respecto a tamaño, forma y método de preparación y la de los procedimientos de ensayo. El ensayo de tensión es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosos, fundidos, laminados o forjados; para los materiales quebradizos (mortero, concreto, ladrillo, cerámica, etc) cuya resistencia a la tensión es baja, en comparación con la resistencia a la compresión.

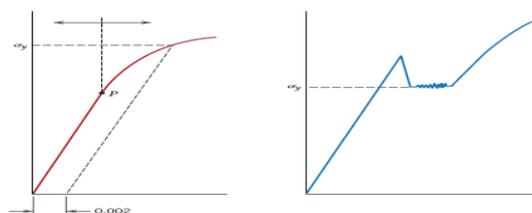
MÓDULO DE ELASTICIDAD O DE YOUNG (E)

Es la pendiente de la recta del diagrama Tensión-Deformación en la región elástica.



Esta relación lineal se conoce como la Ley de Hook. El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material, un mayor módulo de elasticidad indica que se necesita una mayor tensión para producir la deformación elástica del material.

Tensión de Fluencia



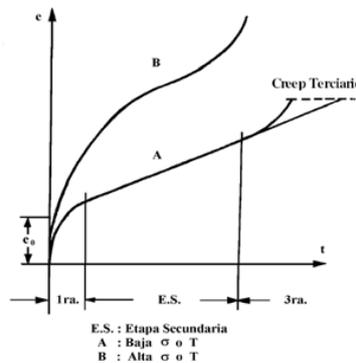


Es el valor de tensión necesaria para iniciar la deformación plástica. En los materiales metálicos es el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de las dislocaciones. Según el material a ensayar, se la puede definir mediante uno de los siguientes métodos:

- **Límite Convencional de Fluencia ($R_{p0.2}$):** Tensión que corresponde a un alargamiento porcentual no proporcional de 0.2%.
- **Límite de Fluencia (R_e):** Algunos aceros presentan el fenómeno de punto de fluencia, en donde la transición elástica-plástica está muy bien definida y ocurre en forma abrupta. En este caso puede definirse un **límite superior de fluencia (R_{eh})** y un **límite inferior de fluencia (R_{el})**.

EL COMPORTAMIENTO DE UN MATERIAL ANTE EL CREEP

La siguiente figura representa una curva de creep. La misma se obtiene aplicando una tensión o carga constante a la pieza y midiendo las deformaciones que se van produciendo con el tiempo, manteniendo la temperatura constante.



Las deformaciones representadas por las ordenadas pueden asociarse a tres tipos distintos de mecanismos, que pueden visualizarse dividiendo la deformación en las tres partes indicadas en la figura anterior.

La primera parte es la deformación elástica (más la deformación plástica si la tensión es suficientemente alta) y ocurre casi instantáneamente, bajo la acción de la tensión aplicada: es la deformación ordinaria dada por el diagrama de tensión-deformación. Si la expansión térmica que la temperatura produce es significativa, puede ser incluida en este componente.

La segunda es la componente transitoria cuya característica principal es que tiene tasa ("velocidad") decreciente. La deformación es rápida al comienzo pero gradualmente se hace más lenta a medida que se aproxima a un valor fijo determinado.

La tercera es la componente permanente que aumenta continuamente, a tasa constante bajo tensión constante. Por tratarse de un movimiento similar al flujo viscoso, se lo conoce a veces como creep viscoso.

NOTA: la parte primaria se omite a veces de la curva de creep. Las otras dos partes-componentes transitoria y permanente - constituyen la deformación total identificable con el creep. Ambas componentes son dependientes de la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius. El creep viscoso es comúnmente insignificante a temperaturas inferiores al 50 % del punto de fusión, mientras que el creep transitorio se observa en todas las temperaturas, aún cerca del cero absoluto.



De ahí que al creep transitorio a veces se le llama creep frío, y al creep viscoso, creep caliente.

Debe recalcar que las altas temperaturas pueden producir otras alteraciones no explicitadas en las curvas, comúnmente no incluidas en los efectos de creep. Así, los metales pueden sufrir transformaciones en las estructuras cristalinas, tal como la transformación en los aceros de ferrita en austenita, recristalización y crecimiento de grano. En plásticos, maderas y cerámicas, las altas temperaturas pueden inducir cambios químicos y la desintegración.

Resistencia a la fluencia

Es complicado dar una definición de resistencia a fluencia, y no existe un criterio unificado para su determinación, razón por la cual varía de unos países a otros, lo que se puede hacer es clasificar por su duración de la siguiente forma:

Ensayos de corta duración, en ellos la resistencia a la fluencia, a una determinada temperatura, se define por la tensión estática inicial que, en tracción, origina una velocidad de alargamiento al cabo de cierto tiempo.

Ensayos de larga duración, que se efectúan con tensiones relativamente pequeñas, y en ellos se define la resistencia a fluencia a una determinada temperatura según alguno de los criterios:

- a) Por la velocidad constante de fluencia en el tercer periodo.
- b) Por el alargamiento permanente después de un cierto tiempo.
- c) Por el tiempo que se precisa para provocar la rotura.

Determinar la resistencia a la fluencia es una operación larga y delicada, pues es preciso disponer de extensómetros muy sensibles, para medir pequeños alargamientos y además mantener la temperatura constante durante todo el tiempo que dura la prueba y en todos los puntos de la probeta.

Las máquinas destinadas a ensayos de fluencia constan esencialmente de las mismas partes que las de tracción ordinaria, estando además provistas de:

Un horno eléctrico encargado de calentar la probeta a la temperatura deseada y mantenerla constante durante la duración del ensayo y un extensómetro amplificador muy sensible encargado de registrar las deformaciones de la probeta

TIPOS DE CREEP

- Creep transitorio

Se identifica al creep transitorio con diversos mecanismos, dependiendo su importancia del material y magnitud de las tensiones involucradas.

Dentro del régimen elástico la componente más importante es el "post-efecto elástico", especialmente en materiales amorfos como es el caso de la respuesta configuracional en polímeros. En los cristalinos su importancia es menor comparada con los mecanismos que se producen en el régimen plástico. En todos los casos, el post-efecto elástico constituye



prácticamente toda la deformación elástica en el creep transitorio de todo material en régimen elástico.

Dentro del régimen plástico, el creep transitorio en materiales *cristalinos* consiste en pequeñas cantidades de fluencia producidas por activación térmica: la aplicación de tensión provoca una deformación plástica inicial, que cesa tan pronto como la tensión se ve equilibrada por el "strain hardening" (endurecimiento por deformación). A partir de ahí los impulsos de energía térmica continúan provocando pequeños incrementos de deformación; pero como cada incremento produce su cuota de "strain hardening", el siguiente tendrá un desarrollo más dificultoso y serán entonces menos frecuentes, hasta alcanzar un techo.

En los materiales *amorfos*, que no sufren strain-hardening, el fenómeno de post-efecto elástico es la única fuente de creep transitorio.

- **Creep viscoso.**

En todos los materiales, este componente es inelástico. En materiales *no cristalinos* como los polímeros amorfos o termoplásticos, el creep viscoso constituye la forma inelástica normal de creep viscoso, por la ausencia de "strain hardening".

La cantidad de deformación varía con la temperatura y la tensión. A tensiones pequeñas y bajas temperaturas casi no existe, mientras que a temperaturas altas o tensiones grandes llega a ser muy importante. Se hace uso de esta capacidad de deformación viscosa en procesos como extrusión y moldeo.

En materiales *cristalinos* (que sufren strain hardening), el flujo viscoso tiene lugar cuando el efecto de strain hardening se equilibra con el ablandamiento producido por el calor: cada incremento de deformación plástica se ve acompañado por un incremento en la resistencia a la fluencia, que a su vez es gradualmente disminuida por el ablandamiento térmico que lleva a más deformación plástica, repitiéndose así el ciclo. Este es el mecanismo primario por el cual la deformación tiene lugar: el deslizamiento (como en la fluencia plástica normal). El ablandamiento ocurre en su mayor parte mediante un proceso por el cual los átomos del cristal emigran o se difunden a posiciones de menor energía, ayudados por la alta energía térmica. Un efecto de esta difusión es que las dislocaciones se hacen más móviles y puede desviarse alrededor de obstáculos.

La difusión parece tener lugar más fácilmente a lo largo de bordes altamente deformados (energía alta) que a través de los cristales en sí mismos. Así un metal de grano fino, que tiene más de tales bordes que un metal de grano grueso, está sujeto a más difusión, y consiguientemente más creep a altas temperaturas.

Un proceso secundario en materiales *policristalinos* lo constituye el flujo de los granos como cuerpos rígidos, que resulta en una rotación de los granos durante el proceso de creep. No es importante en la deformación, pero sí en la rotura por creep.

A temperaturas altas el creep viscoso ocurre a tensiones por debajo de la tensión de fluencia para esa temperatura, es decir, a tensiones que ocasionan solo deformaciones elásticas si son aplicadas por periodos cortos, debido a que la tensión de fluencia es mucho más dependiente de las altas temperaturas. La energía térmica alta puede inducir movimiento de dislocaciones bajo tensiones menores si se la deja actuar suficiente tiempo. En materiales *amorfos* como el vidrio, el creep es como el flujo viscoso de los líquidos.



Estos materiales son frecuentemente considerados como líquidos súper enfriados a causa de su estructura desordenada de átomos o moléculas pequeñas. El mecanismo de flujo consiste en una reestructuración dentro de muchos grupos pequeños de átomos o moléculas: el grupo puede deformarse simplemente por el movimiento de dos moléculas centrales; según como se muevan estas moléculas, el grupo entero se deformará. Esta distorsión se suma a una deformación por corte local. Los factores controladores son la activación térmica y la tensión de corte. Sin la tensión, la activación térmica ocasionará cambios aleatorios en el material. El resultado neto será cero distorsión total. Bajo una tensión dirigida, sin embargo, los cambios son predominantemente en la dirección de la tensión de corte, y resulta en una deformación total. Si la temperatura es lo suficientemente alta, los grupos continuamente se reestructuran a sí mismos. Así la deformación continúa, y el material experimenta flujo viscoso.

Rotura por creep

El creep viscoso tiende inevitablemente a la rotura debido a la reducción de sección transversal que siempre acompaña a la elongación. La fractura puede tener lugar de diversas maneras:

- a) A altas tensiones y temperaturas moderadas (involucrando tiempos relativamente cortos), se desenvuelve como la rotura por tracción simple. Si el material es dúctil, romperá luego de una gran deformación plástica y de la formación de un cuello.
- b) A mayores temperaturas o tiempos más largos, los metales dúctiles comienzan a perder su capacidad para endurecerse por deformación: tiene lugar el comportamiento denominado "acción térmica". Debido a ello, se requiere más elongación para balancear los efectos de la deformación térmica, por lo que la tasa de elongación se hace mayor, llegando a una rotura sin formación de cuello. Si la deformación es grande, la rotura sigue siendo dúctil.
- c) A altas temperaturas o largos períodos de carga, los metales pueden fracturarse con muy poca deformación plástica. En tales casos el mecanismo de rotación de granos mencionado anteriormente, se transforma en importante. El movimiento relativo entre los granos ocasiona rupturas que se abren entre ellos, cuando una fisura llega a ser lo suficientemente grande, o varias fisuras se unen para formar una más grande, crece lentamente a través de la pieza hasta que fractura tiene lugar. A tensiones bajas que actúan por largo tiempo la deformación es a veces casi insignificante, y la fractura tiende a ser de carácter frágil.

EL FALLO POR FLUENCIA PUEDE OCURRIR POR DOS FENÓMENOS DISTINTOS

Daño generalizado

Un componente sometido a tensiones y temperaturas uniformes puede fallar por fluencia generalizada.

Daño por creep localizado

En componentes sometidos a tensiones y temperaturas no uniformes es muy probable que el fallo ocurra por propagación de fisuras debida a la fluencia (esto suele ocurrir en grandes estructuras).



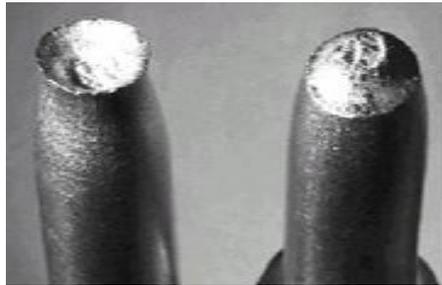
TIPOS DE ROTURA Y COMPORTAMIENTO

A partir del ensayo de tracción, el comportamiento del material se puede clasificar según si el material muestra o no capacidad para deformarse plásticamente.

Comportamiento dúctil

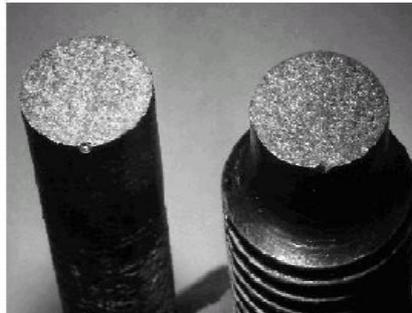
En estos materiales se puede desarrollar un gran crecimiento de fisura antes del fallo. El crecimiento va acompañado de deformaciones por fluencia en el frente de defecto. El daño se produce en formas de huecos que aparecen en los bordes de grano.

Posteriormente, dichos huecos crecen y se unen formando fisuras que crecen en el tiempo.



Comportamiento frágil

En este caso la velocidad de propagación de fisuras es del mismo orden de la velocidad a la cual se propaga la deformación por fluencia.



PROCESO DE PROPAGACION DE LA GRIETA

En componentes sometidos a cargas exteriores a altas temperaturas y con un defecto inicial se pueden distinguir cuatro etapas:

INICIACIÓN: Periodo durante el cual no hay propagación de la fisura.

CRECIMIENTO: El defecto se propaga de manera estable como consecuencia de los procesos creep.

FRACTURA: La fisura crece hasta alcanzar un tamaño para el cual se produce la rotura súbita (frágil o dúctil).



FALLO POR FLUENCIA GENERALIZADA: El fallo ocurre debido a la acumulación del daño por creep en el ligamento residual.



4. CAUSAS MÁS FRECUENTES DE FALLO

- **Inadecuado control o protección ambiental**

Un inadecuado control de las condiciones ambientales, como temperatura y humedad, pueden ocasionar fallos. Se debe tener en cuenta, en qué condiciones se está trabajando y en cuales va a trabajar el material, para saber si va a ser afectado por condiciones ambientales o no.



- **Condiciones no previstas de operación**

Se dan cuando no se prevé que trabajo se va a realizar. Esto es consecuencia de una mala investigación tanto del diseño como de la elección de los materiales. Un mal análisis de la resistencia del material o de los esfuerzos a los que estará sometido es una causa de los fallos.



- **Tratamientos térmicos incorrectos**

Estos fallos se producen por la desinformación sobre que tratamientos ha recibido los materiales, o por no estar completamente seguro de saber con qué material se está trabajando. A la hora de realizar tratamientos térmicos en una pieza, hay que tener en cuenta que afectan a sus propiedades mecánicas y físicas. Por ejemplo en herramientas templadas, la elevación de la temperatura produce cambios en la dureza y en la estructura del material y si esto no se sabe, dependiendo del material puede que dañemos la pieza o no obtengamos los resultados que se necesitan.



- **Material Inadecuado**

- Deficiencias en la selección del material
- Datos poco exactos del material (ensayo de tensión, dureza).
- Empleo de criterios erróneos en la selección del material.
- Darle mayor importancia al coste del material que a su calidad.



- **Errores de Diseño**

- Deficiencia en el Diseño
- Errores al no considerar adecuadamente los efectos de las entallas.
- Insuficientes criterios de diseño por no tener la información suficiente sobre los tipos y magnitudes de las cargas, especialmente en piezas complejas (No se conocen los esfuerzos a los que están sometidos los elementos).
- Cambios en el diseño sin tener en cuenta los factores elevadores de los esfuerzos.



El 90% de las piezas sometidas al método de análisis de fallos presentan problemas de diseño, el 5% problemas en el material y el 5% restante corresponde a otras causas como errores de montaje o selección del acero.

- **Mantenimiento Inadecuado**

- Marcas o faltas de material, pueden originar grietas que conducen al fallo.
- Esfuerzos residuales causados en el proceso de deformación en frío o en el tratamiento térmico que no se hacen bajo las normas establecidas (Temperatura, Tiempo, Medio de enfriamiento, Velocidad).
- Recubrimientos inadecuados.
- Soldaduras y/o reparaciones inadecuadas.



- **Defectos de soldadura**

Los defectos de soldadura son los más comunes, ya que mucha gente cree que cualquier material se puede soldar. Existen ciertos tipos de materiales que pierden propiedades al someterlas a la soldadura, ya que se vuelven frágiles.

- **Errores de Fabricación**

El conocimiento de los materiales y sus propiedades es muy importante para cualquier persona involucrada en la industria. El propósito del diseño y aplicación de las pruebas debe ser el control efectivo de los materiales y productos, con el fin de satisfacer un servicio sin que se presenten fallos prematuros o un daño. La fuente de los fallos puede ser:



- Discontinuidad
- Material químicamente incorrecto
- Material tratado de tal forma que sus propiedades no son las adecuadas.



• **Mal Uso o Abuso**

En general los fallos pueden ocurrir por:

- *Oxidación*: acción combinada del oxígeno del aire y el calor para formar óxidos en el metal.
- *Corrosión*: destrucción lenta y progresiva por la acción de la humedad y agentes agresivos.
- *Termofluencia*: deformación plástica cuando está sometido el material a alta temperatura y a cargas permanentes de magnitud menor al esfuerzo de fluencia.
- *Fatiga*: esfuerzos cíclicos y de intensidad menor al esfuerzo de fluencia.
- *Flexión*: deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
- *Torsión*: momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o mecánico, como pueden ser ejes.
- *Impacto*: choque o golpe intenso y repentino.





4.1 CAUSAS HABITUALES EN LOS EJES

a) FRACTURA

FRÁGIL POR FLEXIÓN: Fractura transversal al eje con apariencia granular y sin deformación del elemento.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por flexión.
- Dureza de núcleo y/o su capa endurecida elevada.
- Capa endurecida de espesor alto.
- Trabamamiento de la máquina.



FRÁGIL POR TORSIÓN: Fractura a 45° alrededor del eje con apariencia granular y sin deformación del elemento.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por torsión.
- Dureza de núcleo y/o su capa endurecida elevada.
- Capa endurecida de espesor alto.
- Trabamamiento de la máquina.



DÚCTIL POR TORSIÓN: Fractura transversal al eje con apariencia fibrosa y con deformación de la pieza siguiendo el sentido de rotación.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por torsión.
- Dureza del núcleo y/o su capa endurecida baja.
- Capa endurecida de espesor bajo.
- Trabamamiento de la máquina.



FATIGA POR TORSIÓN: Agrietamiento en servicio a 45° alrededor del eje. Superficie de fractura tersa sin deformación del eje, normalmente con marcas elípticas concéntricas al origen.

ALGUNAS CAUSAS:

- Cargas de torsión altas.
- Dureza de núcleo y/o capa endurecida baja y/o espesor de ésta bajo.
- Cambios de sección severos o daño superficial en el eje.



FATIGA POR TORSIÓN EN EJE ESTRIADO: Se forman múltiples grietas de fatiga por torsión a 45° alrededor del eje, que surgen a partir de la base de las estrías, las cuales al crecer se encuentran y generan una superficie de fractura irregular.

ALGUNAS CAUSAS:

- Similares a la fatiga por torsión.
- Estrías con esquinas muy agudas en sus bases.



FATIGA POR FLEXIÓN: Agrietamiento en servicio transversal al eje. Superficie de fractura tersa sin deformación del eje, normalmente con marcas elípticas concéntricas al origen.

ALGUNAS CAUSAS:

- Cargas de flexión altas.
- Dureza de núcleo y/o capa endurecida baja y/o espesor de ésta bajo.
- Cambios de sección severos o daño superficial en el eje.



b) DEFORMACIÓN PLÁSTICA

FLUJO PLÁSTICO POR FLEXIÓN: El eje muestra una deformación permanente por doblado.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por flexión.
- Dureza de núcleo y/o su capa endurecida baja.
- Capa endurecida de bajo espesor.
- Trabamamiento de la máquina.



FLUJO PLÁSTICO POR TORSIÓN: El eje muestra deformación permanente por torsión.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por torsión.
- Dureza de núcleo y/o su capa endurecida baja.
- Capa endurecida de bajo espesor.
- Trabamamiento de la máquina.



PANDEO DE LÁMINA POR FLEXIÓN: Se da en ejes huecos de pared delgada donde por flexión se dobla la pared.

ALGUNAS CAUSAS:

- Similar a flujo plástico por flexión.



- Bajo espesor de pared del eje.



c) DESGASTE

ABRASIVO: Cuando la superficie del eje en contacto con un cojinete o seguidor se mecaniza o pule. Se conoce como rayado.

ALGUNAS CAUSAS:

- Lubricante con partículas.
- Viscosidad baja o altas cargas.
- Baja velocidad.
- Dureza baja en capa endurecida.
- Buje con dureza muy alta para el eje.



ADHESIVO: Cuando entre el eje y su cojinete o seguidor se transfiere metal, debido a que entran en contacto directo porque se rompe la capa de lubricante.

ALGUNAS CAUSAS:

- Dureza baja en capa endurecida.
- Alta velocidad.
- Viscosidad baja o altas cargas.
- Elevada temperatura.
- FALLO en el sistema de lubricación.



LUDIMIENTO: Consiste en la acumulación de depósitos en la superficie de apoyo de engranajes, poleas, rodamientos, cuñas, etc., producto de desgaste y/o oxidación asociados a desplazamientos oscilantes pequeños de estos elementos sobre el eje.



ALGUNAS CAUSAS:

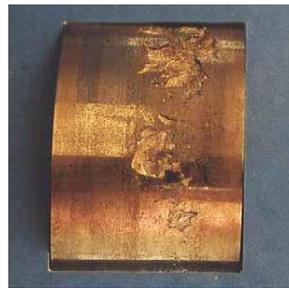
- Alto estado vibratorio en la máquina.
- Juego excesivo entre los elementos
- Mal montaje.



FATIGA SUPERFICIAL O PICADO: Agrietamiento superficial y posterior pérdida de material, formando pequeñas cavidades en la zona de contacto con el cojinete o seguidor.

ALGUNAS CAUSAS:

- Baja dureza en capa endurecida.
- Viscosidad baja del lubricante.
- Cargas de operación altas.
- Alta velocidad.



CORROSIÓN: Se presenta ataque corrosivo sobre la superficie del eje, dañando su acabado superficial y dejando residuos.

ALGUNAS CAUSAS:

- Mala selección del material del eje.
- Medio corrosivo severo.
- Daño en recubrimientos protectores.
- Filtración de fluidos a la máquina, daño en sellos o lubricante degradado.

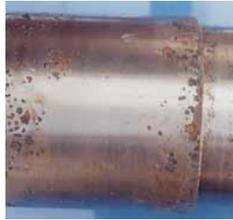


POR PICADURA: Se presenta ataque corrosivo localizado en puntos de la superficie del eje, generando cavidades y dejando residuos.



ALGUNAS CAUSAS:

- Mala selección del material del eje.
- Medio corrosivo severo.
- Daño en recubrimientos protectores.
- Filtración de fluidos a la máquina, daño en sellos o lubricante degradado.



CORROSIÓN – ESFUERZO: Se tiene la formación de agrietamiento masivo y ramificado sobre el eje, especialmente en cambios de sección.

ALGUNAS CAUSAS:

- Mala selección del material del eje.
- Medio severo y/o cargas altas.
- Daño en recubrimientos protectores.
- Filtración de fluidos a la máquina, daño en sellos o lubricante degradado.
- Cambios de geometría severos.



DAÑO EN ESTRÍAS O CUÑEROS: Las estrías de los ejes muestran aplastamiento o desgarre.

ALGUNAS CAUSAS:

- Alta torsión.
- Dureza de núcleo o capa endurecida baja o ausencia de la capa.
- Trabamiento de la máquina.





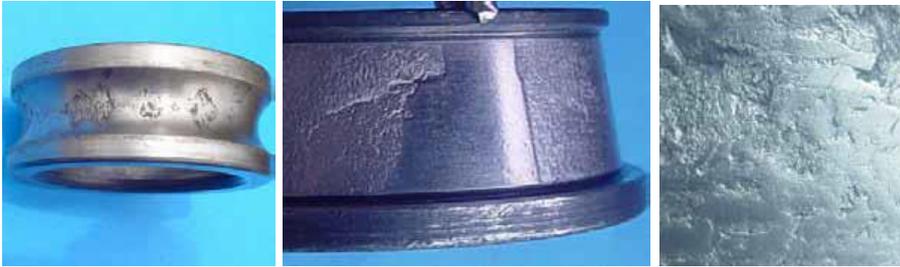
4.2 CAUSAS HABITUALES EN LOS RODAMIENTOS

a) DAÑO EN LAS SUPERFICIES DE RODADURA

FATIGA SUPERFICIAL: Se desarrolla en servicio un agrietamiento en las superficies con posterior pérdida de material, el cual puede ser poco profundo (micropicado) o generar descascaramiento de áreas grandes y profundas (macropicado).

ALGUNAS CAUSAS:

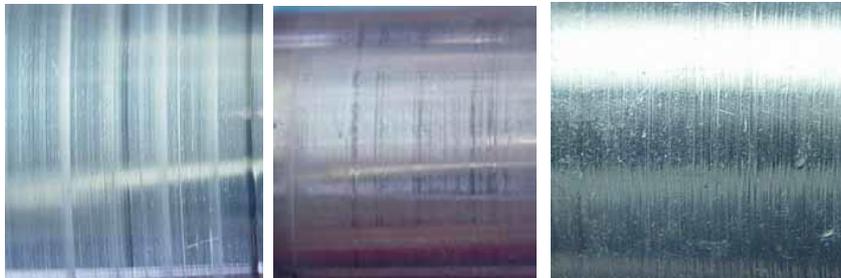
- Carga de servicio superior a la esperada o fuerza de apriete (montaje) elevada.
- Montaje inadecuado que distorsione las pistas o genere desalineamientos.
- Gradientes de temperatura que generen esfuerzos térmicos elevados.
- Consecuencia de la corrosión, descarga eléctrica o ludimiento.
- Lubricante o lubricación inadecuada.



DESGASTE ABRASIVO: Se presenta en servicio la generación de un rayado abrasivo sobre las superficies de rodadura y también sobre las jaulas, indicando que se está perdiendo material por abrasión. Normalmente está acompañado el proceso por la indentación.

ALGUNAS CAUSAS:

- Contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio.
- Contaminación del lubricante con partículas metálicas provenientes de una zona desgastada.
- Problemas en sellos y/o filtrado del sistema de lubricación.
- Montaje y/o mantenimiento inapropiado que permite el acceso de partículas al lubricante.



CORROSIÓN: Se genera ataque corrosivo sobre las superficies de rodadura o las jaulas, por la acción del lubricante o de otro fluido que entra en contacto con el rodamiento, generándose daño superficial y depósitos.



ALGUNAS CAUSAS:

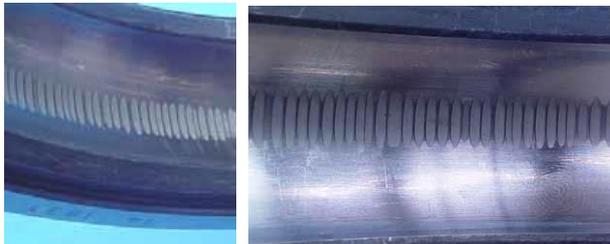
- Contaminación del lubricante con agua, otros lubricantes o fluidos de la máquina.
- Degradación del lubricante por tiempo o por sobretemperatura.
- Mala selección del lubricante por ausencia o deficiencia de aditivos antioxidantes.
- Problemas en sellos del sistema de lubricación.
- Mal almacenamiento o manipulación.



DESCARGA ELÉCTRICA: Debido al paso de corriente eléctrica AC o DC a través del rodamiento se generan arcos eléctricos entre los elementos rodantes, las pistas y las jaulas, que erosionan las superficies debido a la fusión a pequeña escala. Producto de los arcos se pueden generar patrones de estrías o cráteres profundos si la corriente es alta.

ALGUNAS CAUSAS:

- Problemas en el aislamiento eléctrico, contaminación del lubricante con líquidos o partículas conductoras o ausencia de toma de tierra en maquinaria que lo requiera.
- No usar rodamientos con aislamiento eléctrico cuando la aplicación lo requiere.
- Proceso de reparación inadecuado por soldadura, que hace circular la corriente a través de los rodamientos (inapropiada ubicación de la pinza o masa).



DESGASTE ADHESIVO: Se presenta en servicio pérdida de material por contacto metal - metal entre las partes del rodamiento incluyendo las jaulas, producto de la pérdida parcial o total de la película lubricante. Si la pérdida de lubricación es parcial las zonas de contacto se pulen y si es total se eleva fuertemente la temperatura quemando el lubricante, oxidándose las partes o incluso fundiéndose.

ALGUNAS CAUSAS:

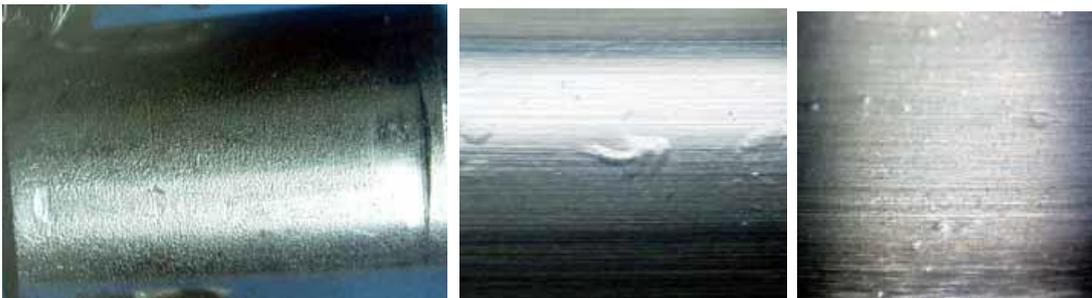
- Lubricante inapropiado por baja viscosidad y/o bajo índice de viscosidad y/o falta de aditivos de extrema presión y/o temperatura de operación alta.
- Lubricación inapropiada por bajo caudal y/o baja presión.
- Degradación del lubricante por sobretemperatura y/o contaminación con otros fluidos.
- Sobrevelocidad y/o sobretemperatura de operación.



INDENTACION: Se trata de creación de cráteres o hendiduras sobre las superficies de rodadura, producto de la deformación plástica derivada de fuerzas de contacto excesivas entre los elementos del rodamiento y/o por presencia de partículas contaminantes entre ellos.

ALGUNAS CAUSAS:

- Contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio.
- Contaminación del lubricante con partículas metálicas provenientes de una zona desgastada.
- Problemas en sellos y/o filtrado del sistema de lubricación.
- Sobrecarga sobre el rodamiento especialmente por impactos durante el proceso de uso o un mal montaje.
- Fuerza de apriete elevada.



b) FRACTURA Y LUDIMIENTO

FRACTURA: Las pistas o las jaulas presentan agrietamiento o fractura en montaje o servicio, llevando algunas veces a la destrucción total del rodamiento.

ALGUNAS CAUSAS:

- Montaje incorrecto con impactos o excesiva fuerza de apriete.
- Mala lubricación, carga excesiva o desgaste adhesivo.
- Excesiva velocidad y/o alta vibración (crítico para las jaulas).
- Desalineamiento, lubricante contaminado con partículas, consecuencia de picaduras e indentaciones, giro por ajuste muy holgado o mecanizado irregular de eje o alojamientos.



LUDIMIENTO: Se presentan depósitos oscuros en las superficies de apoyo con el eje o su alojamiento, indicando que en servicio se dieron pequeños movimientos oscilantes entre las partes (desgaste y/o oxidación).

ALGUNAS CAUSAS:

- Selección de ajuste muy holgado.
- Mecanizado irregular de eje o alojamiento, que no genera presión uniforme.
- Carga elevada o alto estado vibratorio de la máquina.
- Deflexiones excesivas de eje o alojamientos en servicio.

c) FACTOR DE RIESGO

RODADURA IRREGULAR: El rodamiento presenta un camino oblicuo de rodadura de sus elementos rodantes sobre las pistas.

- **CAUSAS:**
Desalineamientos o mal montaje, diseños incorrectos que dejan rodamientos muy juntos o demasiado separados sobre un mismo eje, orientación anormal de las cargas en servicio, deflexiones excesivas de eje o alojamientos en servicio.
- **CONSECUENCIAS:**
Acelera los mecanismos de fallo descritos en esta guía.



4.3 CAUSAS HABITUALES EN BOMBAS HIDRÁULICAS

a) DESGASTE

Abrasivo: se refiere al corte del metal por partículas duras o una superficie áspera. Este tipo de desgaste puede disminuirse removiendo los restos de manufactura antes de iniciar el trabajo.



ALGUNAS CAUSAS:

- Oxidación del fluido
- Mala lubricación de la bomba

Sobre-presurización: cuando se somete a una bomba hidráulica a presiones de operación más altas a las que ha sido diseñada, lo que además puede causar fallos de componentes.

ALGUNAS CAUSAS:

- Presiones superiores para las que estaba diseñado el elemento
- Fallos en los filtros

Adhesivo: Ocurre cuando las asperezas de la superficie se somete a contacto deslizando bajo una cara. Si existe un calor alto generalizado, se darán microsoldaduras en la superficie.

ALGUNAS CAUSAS:

- Deficiencia de aditivos EP*.
- Dureza baja en capa endurecida.
- Alta velocidad o temperatura.
- Viscosidad baja.
- fallo en sistema de lubricación.

Por erosión: Partículas de líquido o impregnación de gotas de líquido en la superficie causan desgastes por erosión.

ALGUNAS CAUSAS:

- Alta velocidad del fluido
- Existencia de impurezas

b) CAVITACIÓN

Desgaste por cavitación: La cavitación se da cuando hay un número de burbujas de gas. Luego de repetidas implosiones, el material se daña por fatiga, resultando daños en forma de agujeros.

ALGUNAS CAUSAS:

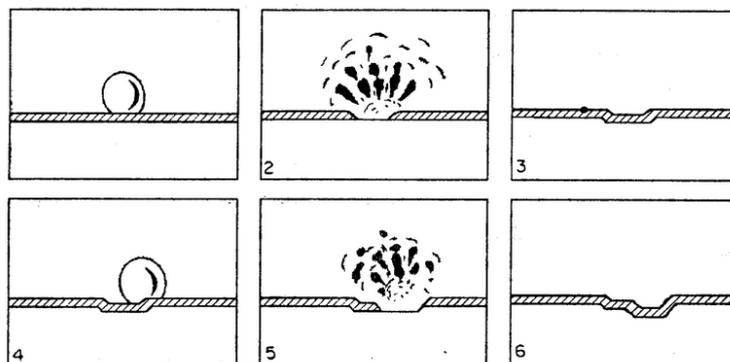
- Fallos en el diseño
- Fugas en línea de succión
- Restricción en la línea de succión
- Insuficiente altura
- Alta viscosidad



Este tipo de fallos son debido a la cavitación, la cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando un líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, él líquido hierve y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, explotando bruscamente las burbujas. Este fenómeno se llama cavitación. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy alto, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea con diferentes partes de la máquina.

Un daño por cavitación tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación. El daño por cavitación se atribuye parcialmente a efectos de desgaste mecánico. La corrosión interviene cuando el colapso de la burbuja destruye la película protectora, como se muestra esquemáticamente en la siguiente figura, con los pasos siguientes:

- Se forma una burbuja de cavilación sobre la película protectora.
- El colapso de la burbuja causa la destrucción local de la película.
- La superficie no protegida del metal está expuesta al medio corrosivo y se forma una nueva película por medio de una reacción de corrosión.
- Se forma una nueva burbuja en el mismo lugar, debido al aumento de poder nucleante de la superficie irregular.
- El colapso de la nueva burbuja destruye otra vez la película.
- La película se forma de nuevo y el proceso se repite indefinidamente hasta formar huecos bastante profundos.



La protección contra la cavitación debe comenzar con un diseño hidráulico adecuado del sistema, de tal manera que se eviten en lo posible las presiones bajas. Cuando sea inevitable la presencia de la cavitación, el efecto sobre las superficies se puede reducir mediante el



recubrimiento de materiales especiales de alta resistencia. El empleo de pequeñas cantidades de aire introducidas en el agua reduce notablemente el daño causado por la cavitación: por último, en estudios recientes se ha comprobado que la protección catódica puede ser de utilidad contra los efectos de la cavitación.

c) CORROSIÓN

Desgaste Corrosivo: Este tipo de daño se relaciona con ataques electroquímicos al metal.

ALGUNAS CAUSAS:

- Condensación del agua debido a la humedad del ambiente.
- Vapores corrosivos en la atmosfera
- Presencia de ácidos de descomposición o exposición a metales activos.



4.4 CAUSAS HABITUALES EN ENGRANAJES

a) PÉRDIDA DE DIENTE TOTAL O PARCIAL

FRACTURA DÚCTIL: Presenta cizallado del diente acompañado de una considerable deformación plástica.

ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por elevado torsión.
- Dureza de capa endurecida y/o del núcleo del engranaje bajas.
- Espesor bajo de la capa endurecida.
- Ausencia de capa endurecida.



FRACTURA FRÁGIL: Fractura con apariencia granular brillante y sin deformación plástica aparente.



ALGUNAS CAUSAS:

- Sobrecarga por elevado torsión.
- Dureza de capa endurecida y/o núcleo del engranaje elevadas.
- Espesor alto de la capa endurecida.



FATIGA: Fractura progresiva que se propaga durante el trabajo del engranaje. Su superficie es tersa y normalmente presenta marcas elípticas concéntricas al origen.

ALGUNAS CAUSAS:

- Torque continuado de operación superior al recomendado.
- Dureza de núcleo y/o capa endurecida baja y/o espesor de ésta insuficiente.



b) PÉRDIDA DE GEOMETRÍA DEL DIENTE

1. DESGASTE

DESGASTE ABRASIVO: Cuando la superficie de los dientes de un engranaje se mecanizan o pulen en servicio.

ALGUNAS CAUSAS:

- Lubricante con partículas.
- Viscosidad baja.
- Baja velocidad.
- Dureza baja en capa endurecida.
- Diferencia alta de dureza entre los engranajes acoplados.





DESGASTE ADHESIVO: Cuando entre dos engranajes se transfiere metal, debido a que entran en contacto directo porque se rompe la capa de lubricante.

ALGUNAS CAUSAS:

- Deficiencia de aditivos EP*.
- Dureza baja en capa endurecida.
- Alta velocidad o temperatura.
- Viscosidad baja.
- Fallo en sistema de lubricación.



2. CORROSIÓN

CORROSIÓN: Deterioro de la superficie por acción química, se presentan picaduras y/o depósitos sobre los dientes.

ALGUNAS CAUSAS:

- Contaminación del lubricante por químicos o agua.
- Ausencia o deficiencia de aditivo anticorrosivo.
- Mezclar marcas de aceites.
- Utilizar un lubricante no apropiado para engranajes de bronce.

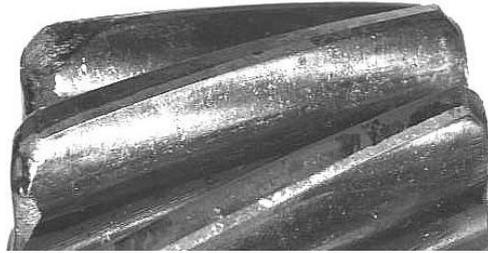


3. FATIGA SUPERFICIAL

PICADO: Consiste en una pérdida localizada de material, normalmente en forma de pequeñas cavidades.

ALGUNAS CAUSAS:

- Baja dureza en capa endurecida.
- Viscosidad baja del lubricante.
- Torque continuado de operación superior al recomendado.
- Ausencia o deficiencia de aditivo EP en el lubricante.



4. DEFORMACIÓN PLÁSTICA BAJA

ARRUGAMIENTO: Presenta forma de olas o escamas perpendiculares a la dirección de deslizamiento.

ALGUNAS CAUSAS:

- Viscosidad baja del lubricante.
- Torque continuado de operación superior al recomendado.
- Baja velocidad.
- Ausencia o deficiencia de aditivo EP en el lubricante.



ACANALADO: Surcos que siguen la dirección de deslizamiento a lo largo de la superficie del diente.

ALGUNAS CAUSAS:

- Viscosidad baja del lubricante.
- Torque continuado de operación superior al recomendado.
- Baja velocidad.
- Ausencia o deficiencia de aditivo EP* en el lubricante.

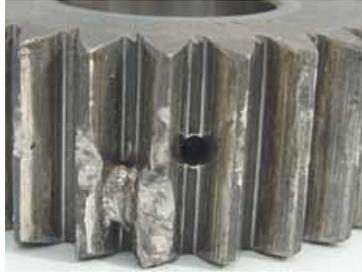


5. DEFORMACIÓN PLÁSTICA ALTA

INDENTACIÓN: Provocada por material extraño que se atrapa en el acoplamiento de los dientes y va destruyendo su perfil a medida que se realiza el trabajo.

ALGUNAS CAUSAS:

- Presencia de elementos extraños entre los engranajes.
- Consecuencia de la fractura de dientes o del macropicado.



APLASTAMIENTO, AFILADO Y REBABA: Deformación de los dientes que lleva a formas triangulares y/o flujo lateral que genera viruta.

ALGUNAS CAUSAS:

- Viscosidad y/o velocidad bajas.
- Dureza de núcleo y/o capa endurecida baja y/o espesor de ésta insuficiente.
- Torque continuado de operación superior al recomendado.

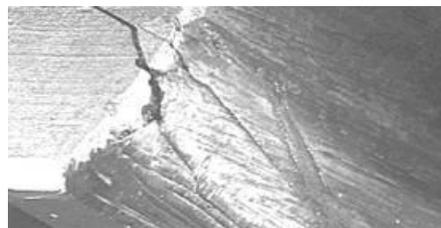


6. AGRIETAMIENTO

GRIETAS EN CARA DE DIENTES: Fase inicial de una pérdida parcial de diente por fatiga.

ALUNAS CAUSAS:

- Inadecuado acabado superficial de los dientes.
- Las grietas pueden iniciarse a partir de macropicaduras.



GRIETAS EN BASE DE DIENTES: Etapa inicial de la pérdida total o parcial de diente por fractura dúctil, frágil o fatiga.



GRIETAS EN ALMA O LLANTA: Grietas originadas en pie de diente que buscan el centro del engranaje. Normalmente formadas por fatiga.

ALGUNAS CAUSAS:

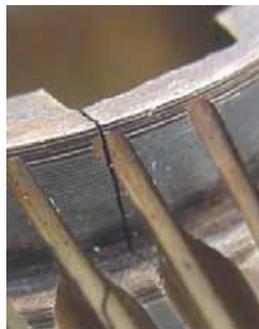
- Diseño inadecuado por bajo espesor de llanta.



GRIETAS EN DISCONTINUIDADES: Grietas normalmente de fatiga que nuclean en agujeros de lubricación, alojamiento de cuñas, estriados, agujeros aligeradores de peso o en otros concentradores.

ALUNAS CAUSAS:

- Agujeros, cuñeros, estriados, etc., mal calculados o mecanizados.
- Sobrecarga elevada o torque continuado de operación superior al recomendado.



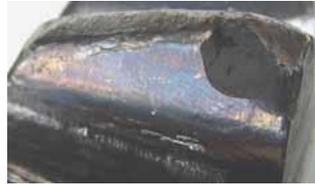
7. FACTORES DE RIESGO

SOBRECALENTAMIENTO: Los dientes o el área afectada presenta una gama de colores Amarillo (200°C), Azul (300°C) y Marrón oscuro (400°C) aprox.



ALGUNAS CONSECUENCIAS:

- Desembocará rápidamente en desgaste adhesivo.
- Se degrada al lubricante y se aceleran los demás mecanismos de fallo descritos en esta guía.



PROBLEMAS AL RECONSTRUIR: Debido a la precisión dimensional, al tratamiento superficial, la dureza y a la composición química de los aceros utilizados en los engranajes, no es aconsejable repararlos por soldadura.

ALGUNAS CONSECUENCIAS:

- Diferencias dimensionales.
- Dureza inferior a la requerida.
- Acelera los mecanismos de fallo descritos en esta guía.



8. FACTORES DE RIESGO POR ENGRANE IRREGULAR

CONCENTRACIÓN DE CARGA: El engranaje muestra signos que todo el flanco del diente no trabajó uniformemente.

- **CAUSAS:** Desalineamiento, deflexión del eje, distorsión por tratamiento térmico, mal mecanizado o montaje, etc.
- **CONSECUENCIAS:** acelera los mecanismos de fallo descritos en esta guía.

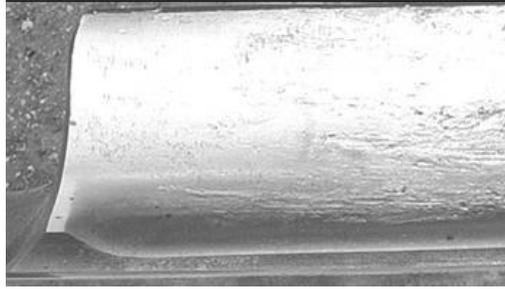


INTERFERENCIA: En la base de los dientes se nota un desgaste anormal generado durante la operación.

- **CAUSAS:** Reducido número de dientes, desalineamiento, alta presión radial entre engranajes.



- **CONSECUENCIAS:** Acelera los mecanismos de fallo descritos en esta guía.





5. CASOS PRÁCTICOS

CASO 1

A continuación analizaremos el fallo que ha experimentado un eje, hasta producir la fractura total del mismo.

En este caso podemos observar tres zonas en la fractura, las zonas "A", "B" y "C".



En la **zona "A"** podemos observar unas marcas características conocidas como estrías o líneas de playa. Dichas marcas son, a menudo, la evidencia más clara de una rotura causada por fatiga.



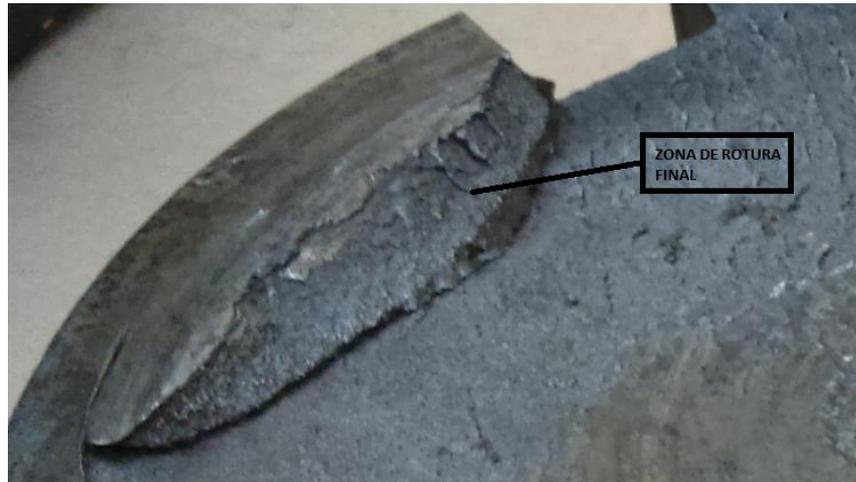


En la **zona "B"** es la sección en la que desaparecen las líneas de crecimiento, desarrollándose desgarro dúctil, debido a una rotura por fractura.





En la zona "C" podemos ver la zona de rotura final.



Después de ver las marcas en la zona de fractura podemos asegurar que la fractura de la pieza es debida a la "fatiga".

CASO 2

A continuación analizaremos el fallo sufrido por un rodamiento de rodillos oscilantes de doble hilera. En este caso podemos observar dos fallos, uno en los elementos rodantes y otro en el aro interior del rodamiento.



En el aro interior podemos observar una deformación del mismo, este hecho ha sido como consecuencia de una lubricación deficitaria que ha originado el gripaje del rodamiento y la fusión del material como consecuencia de la elevación de temperatura debida al rozamiento de los elementos rodantes en el aro interior.



En el caso de los elementos rodantes se pueden observar unas zonas desgastadas en los mismos y en diferentes puntos de los mismos.



Este hecho es debido por una rodadura irregular y debido al rozamiento de los mismos con el aro interior del rodamiento, la causa de este hecho es de la deformación del aro interior por las causas que antes se han comentado que conllevó al rozamiento de los elementos rodantes con el propio aro deformado, produciendo una rodadura irregular la que produjo el desgaste de los elementos rodantes.





CASO 3

En este caso vamos a analizar el desgaste y la desaparición de parte de los álabes del rodete de una bomba hidráulica.



Como se puede observar claramente todos los álabes, tanto por el interior como por su exterior, tienen marcas, picaduras y falta de material en casi toda la superficies de cada alabe.





Este tipo de fallo es muy común en las bombas hidráulicas y recibe el nombre de cavitación. La cavitación es un efecto hidrodinámico, este fallo es muy similar a la corrosión por picadura por su semejanza visual, que consiste en picaduras en la superficie del metal hasta provocar grandes pérdidas del material.



Para evitar este tipo de fallos se debe realizar un buen diseño o mediante recubrimientos de materiales especiales con gran resistencia.

CASO 4

A continuación analizaremos el fallo de un pieza formado por un eje y un engranaje normal caso analizaremos dos fallos, uno en el eje y otro en el engranaje.

Fallo en el eje

En el eje podemos observar una fractura del mismo con una inclinación de unos 45° aproximadamente, con apariencia fibrosa y sin deformación de la pieza.



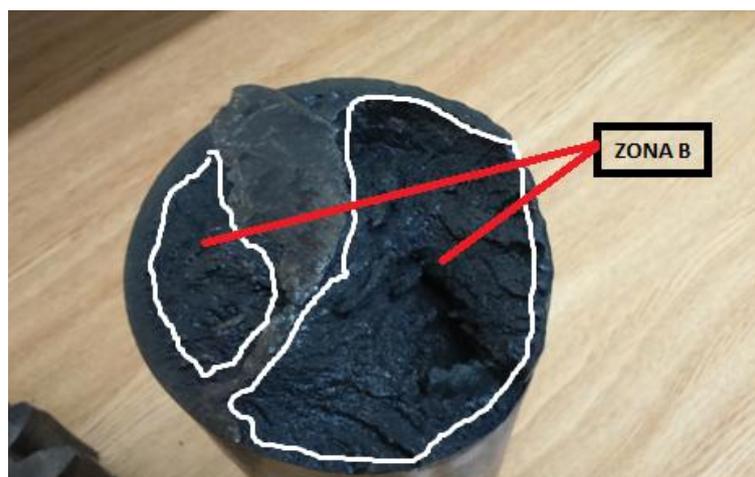
Podemos observar 2 zonas claramente diferenciadas en la fractura.



Una primera zona pulida, **ZONA A**, y en la que en algunas zonas podemos observar unas marcas características conocidas por estrías o líneas de playas. Este tipo de marcas son representativas de fallos por **fatiga**.



En la **zona "B"** es la sección final de rotura en la que desaparecen las líneas de crecimiento de las fisuras, desarrollándose micromecanismos de desgarro dúctil, observándose claramente una superficie rugosa con valles y montañas.



Este tipo de fracturas son denominadas **fracturas por fatiga por torsión**, este fallo se da debido a tensiones altas de torsión produciendo el fallo del eje.
En el fallo del engranaje se puede observar con gran claridad las muescas y falta de material en varios de los dientes del mismo.



Fallo en el engranaje



Este fallo en el engranaje es producido por el **desgaste** de los diferentes dientes del engranaje, se observa claramente que dicho desgastes es común en la misma zona de todos los diente, debido a estas características podemos decir que dicho fallo es producido por una mal montaje del engranaje, lo que produce roces o choques entre el engranaje con otros elementos produciendo el desgaste y la pérdida de material.



CASO 5

En este caso podemos observar un conjunto de rodamiento de rodillos cónicos en el que analizaremos tres tipos de fallos. El primero es la rotura de la jaula, el segundo la picadura interior del aro exterior y un tercero en el aro interior.





Estudio de la jaula

Como se puede observar con claridad en la jaula, existe una deformación y una rotura en dos puntos simétricos del rodamiento. Lo que llevo a la destrucción del rodamiento y a la perdida de elementos del mismo, 3 rodillos en cada zona afectada.



Las causas más probables de este defecto es un mal montaje, más concretamente un desalineamiento del rodamiento, produciendo roces o choques del propio rodamiento con otros elementos que a la postre produciría la deformación y rotura de la propia jaula.



Estudio del aro interior

A continuación analizaremos en aro interior del rodamiento, en el cual se puede observar claramente una gran cantidad de defectos. Se puede observar que la superficie que debería ser completamente lisa, se encuentra con un aspecto rugoso i con falta de materia en algunas zonas.





Estos defectos son una consecuencia de dos hechos, el primero es del mal montaje el cual ha producido la deformación y rotura de la jaula la cual a la vez a producido deslizamiento de lo elementos rodantes por la cara del aro interior, conllevando la realización de roces y choques de los elementos con la misma.

Debido a la primera causa se produce también una mala lubricación del rodamiento que hace incrementar los defectos en el mismo.

Estudio del aro exterior

En toda la zona interior de la carcasa se puede observar que está afectada por picadura, este hecho ha sido producido por el mal montaje del rodamiento, el cual produce un desalineamiento del los elementos rodantes, los cuales desarrollan un agrietamiento en la superficie que va produciendo la pérdida del material, el cual en esta ocasión es poco profundo, creando la picadura en la superficie del aro exterior.





CASO 6

A continuación vamos a estudiar el fallo y la rotura de la jaula de un rodamiento, es este caso es un rodamiento rígido de bolas de una hilera.



Como se puede ver en la imagen, la jaula prácticamente ha desaparecido por completo y la parte que aún se conserva se encuentra deformada, además de observar la falta de numerosos elementos rodantes.





Como ya se ha comentado antes se ve perfectamente la fractura y deformación de la jaula, esto ha sido debido a una mala lubricación del rodamiento, creando un sedimento en los bordes de la jaula, el cual produce un roce y como consecuencia desgaste de la jaula con los elementos rodante hasta producir la fractura y deformación de la jaula.



CASO 7

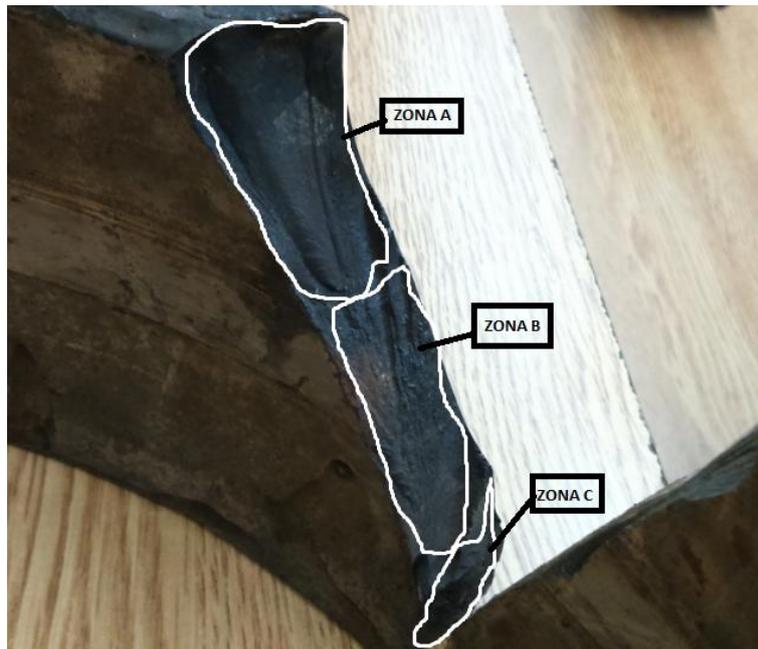
En esta ocasión analizaremos el fallo de un anillo de un rodamiento de doble hilera (por las marcas que en la parte interior del anillo) el cual sufrió una fractura partiéndolo en dos partes.



Como se puede observar con claridad se produjo una fractura total del aro en dos zonas próximas, se puede observar una fractura limpia sin existencia de deformación, lo que nos lleva a pensar que se ha producido una fractura por fatiga.



En ella podemos observar tres zonas.



En la **zona "A"** podemos observar unas marcas características conocidas como estrías o líneas de playa. Dichas marcas son, a menudo, la evidencia más clara de una rotura causada por fatiga

En la **zona "B"** es la sección en la que desaparecen las líneas de crecimiento, desarrollándose desgarro dúctil, donde se puede observar una superficie rugosa con valles y montañas.

En la zona **"C"** se produce la fractura final del anillo.





CASO 8

A continuación analizaremos un fallo térmico, el cual producirá una fractura del eje además de un cambio en las propiedades del disco continuo al eje.



Debido a las claras marcas que podemos observar, tenemos claro que el fallo ha sido debido por un fallo térmico, este tipo de fallos se producen cuando los elementos están sometidos a altas temperaturas superiores para las que han sido diseñados.



La rotura del eje es una combinación de un fallo térmico junto a un fallo por fatiga. Los esfuerzos de fatiga causados por variaciones rápidas de temperatura se deben a expansiones térmicas no uniformes causadas por gradientes de temperatura. La fatiga térmica solo se puede prevenir eliminando las deformaciones excesivas causadas por los ciclos térmicos.

A una temperatura alta, la propagación de grietas de fatiga aumenta por la formación de óxidos u otros productos de corrosión. Frecuentemente las grietas de fatiga térmica tienen formas de dagas, llenas de óxido o de otros productos de corrosión.



Fatiga y termofluencia pueden ocurrir simultáneamente e interactuar causando un daño mayor que cuando cada mecanismo actúa en forma aislada.

La fatiga térmica involucra la inducción de esfuerzos cíclicos o de deformaciones cíclicas causadas por fluctuaciones no uniformes de temperatura.

Los fallos térmicos se producen por una desinformación sobre el trabajo a realizar por las piezas, o por no estar completamente seguro de saber con qué material se está trabajando. La elevación de la temperatura produce cambios en las propiedades de los materiales (dureza y estructura del material utilizado) y dependiendo del material que se esta usando puede que dañemos la pieza o no obtengamos los resultados que se necesitan.

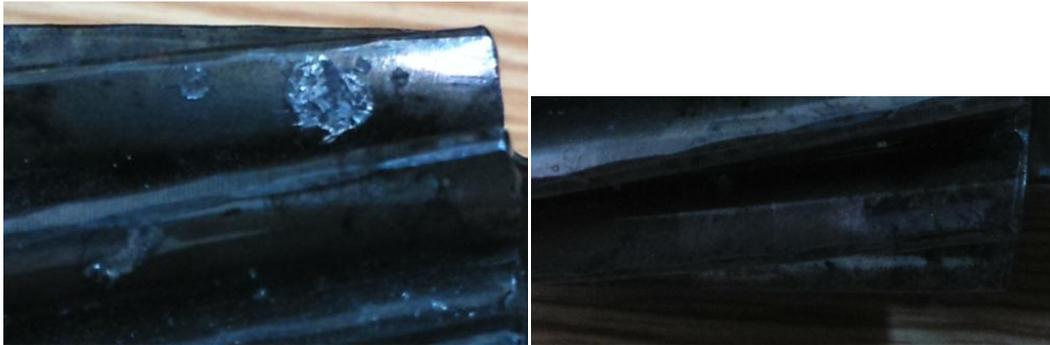
CASO 9

En este caso vamos a analizar los fallos que podemos observar en diferentes partes de un engranaje, formado por un eje y 3 rodamientos (normales y helicoidales).





Se pueden observar claramente marcas y falta de material en varias de los dientes del engranaje. El motivo de la falta de material es debido a fracturas por fatiga superficial produciendo un picado en los dientes, este fallo ocurre incluso con lubricación adecuada y una película ininterrumpida de aceite: es el resultado de esfuerzos repetidos en la superficie del engranaje hasta que se forma una grieta en la superficie o cerca de ella. La grieta aumenta progresivamente hasta que se rompe un pequeño pedazo del engranaje y deja una picadura en la superficie. Como esto ocurre después de muchos millones de ciclos de esfuerzo, los fallos por fatiga por lo general resultan evidentes solo después de prolongados servicios. Esto contrasta con el desgaste y la escoriación que pueden comenzar en forma rápida.



Las causas de estos defectos se pueden presentar por errores en el perfil del diente. Estas causas se pueden corregir fácilmente.



CASO 10

A continuación pasaremos a estudiar el fallo en el eje una caja de cambios de un vehículo, formado por el propio eje y 5 rodamientos (helicoidales y de rodillos cónicos), produciéndose el fallo en el rodamiento de mayor tamaño.



En este caso podemos observar la rotura de varios dientes parcialmente, no unas picaduras de menor importancia. Estas fracturas están producidas por fatiga después de un alto número de ciclos.



Es un fallo por fatiga metalúrgica que se manifiesta con el desprendimiento de pedazos de metal relativamente grandes de las superficies de los dientes. La superficie metálica de un diente de engrane tiende a deformarse elásticamente bajo la carga transmitida y a formar ondulaciones que se desplazan adelante y atrás de la línea de contacto.

Estas ondulaciones se pueden observar cuando se ven funcionar rodillos de hule cargados; con las superficies metálicas ocurre una acción semejante, El material está sujeto a esfuerzos de corte. De compresión y de tensión y el primero alcanza su valor máximo a cierta distancia por debajo de la superficie. Generalmente estos esfuerzos se encuentran dentro de los límites estimados por el diseño. Sin embargo, bajo ciertas condiciones como desalineamiento o sobrecargas los esfuerzos de la subsuperficie pueden exceder el límite de resistencia del material. Como resultado, se desarrollan en la superficie cortaduras por fatiga que origina el



desprendimiento de pedazos de metal, dejando picaduras de tamaño considerable. Los desprendimientos ocurren con mayor frecuencia en un área relativamente pequeña abajo de la línea de templados. Las picaduras y el desconchado revisten gravedad. La probabilidad de desconchado es mayor que la de picado cuando se les somete a fatigas severas. Si se desarrollan picaduras o desconchado en un engranaje de temple superficial estas progresan más rápido que en engranajes de dureza rectificable porque el daño se produce a lo largo del límite entre la superficie templada y el núcleo.



CASO 11

En esta ocasión analizaremos en fallo de un conjunto de engranajes de una caja de cambios.



Podemos observar un conjunto de engranajes formada por 2 ejes, 4 marchas y 8 engranajes de distinto tamaño y tipos (normales y Helicoidales).



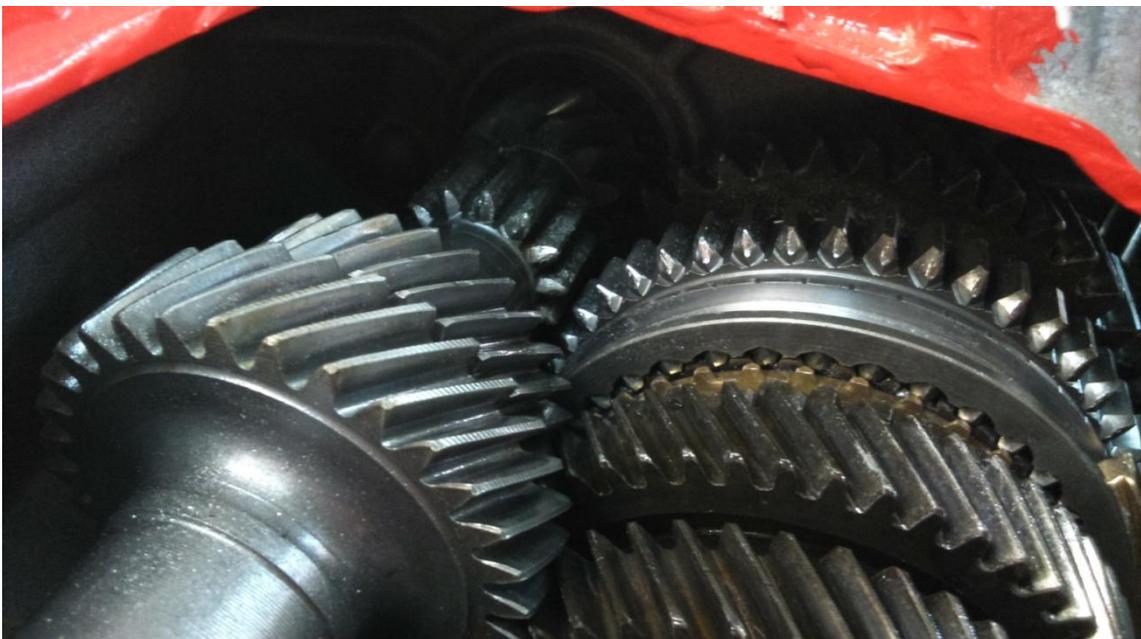
Podemos observar en uno de los engranajes en particular una forma de picadura en gran parte de los dientes del engranaje.



El **picado inicial**, se presenta en pequeñas áreas sobreesforzadas y cuando se redistribuye la carga, el picado cesa. Se puede presentar por errores en el perfil del diente. Irregularidades superficiales o pequeños desalineamiento del diente. Estas causas se pueden corregir fácilmente.



El **picado destructivo** es cuando se deja progresar el picado inicial. Considerables porciones del diente desarrollan cráteres de picado de variadas formas y tamaños; esto resulta de sobrecargas superficiales que no se alivian con el picado inicial. Este picado destruye el perfil del diente originando grietas de fatiga por flexión que conducen a la fractura del diente, Este fallo se evita manteniendo la carga superficial abajo del límite de endurencia del material o aumentando la dureza.







6. CONCLUSIONES

Todos los fallos dejan unas pistas que permiten encontrar su origen. La persona o personas encargadas de realizar el análisis deben conocer muy bien las teorías de los fallos a fin de interpretar adecuadamente estas pistas.

Toda máquina tiene sus niveles normales de ruido, vibración y temperatura. Cuando se observe algún aumento anormal de estos niveles, se tienen los primeros indicios de que hay algún fallo. Los operarios de las máquinas deben ser instruidos para que avisen al detectar estos síntomas que presenta la máquina.

Al diseñar una máquina se debe tener un profundo conocimiento de la forma en que funciona cada elemento componente y la forma en que puede fallar. Esto conducirá a mejores diseños y elecciones de los materiales más adecuados en cada caso.

Antes de reemplazar una pieza que ha fallado se debe hacer un análisis minucioso con el fin de determinar la causa exacta y aplicar los correctivos necesarios para evitar que se vuelva a producir el fallo.



7. PRESUPUESTO

El presupuesto se ha dividido en los siguientes apartados:

- Hardware (C1).
- Software (C2).
- Material fungible (C3).
- Gastos de personal (C4).
- Otros gastos (C5).

➤ HARDWARE (C1).

En este apartado se incluye todo el material informático necesario para el desarrollo del proyecto, para ello la estimación de los costes se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$C = C_T \cdot \frac{T_U}{T_A} \cdot \frac{U}{100} \cdot K$$

Siendo:

CT Coste total de adquisición

TU Tiempo de uso en años

U Utilización porcentual del equipo

K Índice de inflación y reparaciones

Teniendo en cuenta que la duración del proyecto ha sido de tres meses.

HARDWARE	CT(€)	TU(años)	TA(años)	U(%)	C1(€)
Portátil packard bell	845	0,25	6	90	37
Impresora HP	150	0,25	4	10	10
Gastos					47,00 €

➤ SOFTWARE (C2)

En este apartado se incluyen todos los programas informáticos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Software	CT(€)	TU(años)	TA(años)	U(%)	C2(€)
OFFICE 2012	800	0,25	2	75	40
Gastos					40,00 €



➤ **MATERIAL FUNGIBLE (C3)**

Dentro de este capítulo se recogen los gastos debidos al material de escritorio y encuadernación.

Material fungible	C3(€)
Papelería	85
Tinta	150
Fotocopias	90
Material de oficina	50
Gastos	375,00 €

➤ **GASTOS DE PERSONAL (C4)**

Se incluye en este capítulo los costes debidos al material humano para la realización del proyecto.

Software	CU(€/h)	t(€)	C4(€)
Recogida de información	20	150	3000
Análisis de información	45	150	6750
Redacción de documentos	45	180	8100
Gastos			17850,00 €

➤ **OTROS GASTOS (C5)**

En este capítulo se consideran los gastos debidos a conceptos como telefonía, electricidad, transportes, etc. Se establecerá para este proyecto una partida alzada de **250,00 €**.



RESUMEN COSTE TOTAL DEL PROYECTO

Partida	Costes
Gastos de Hardware	47,00 €
Gastos de software	40,00 €
Gastos de Material Fungible	375,00 €
Gastos de Personal	17.850,00 €
Otros gastos	250,00 €
Coste Bruto del Proyecto	18.562,00 €
Beneficio Industrial (6%)	1.113,72 €
Total	19.675,72 €
IVA (21%)	4.131,90 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	23.807,62 €

El coste total del proyecto asciende a **VEINTE Y TRES MIL OCHOCIENTOS SIETE CON SESENTA Y DOS**.