

**Análisis Fallas - Mecanismos de daño y vida residual en equipamiento industrial**

I - Fundamentos del análisis de fallas y aplicación de END (NDT)

II - Concepto de Falla (daño)

III - Vida útil – Vida residual – Integridad - Durabilidad

IV - Extensión de vida

V - Metodología empleada para la determinación de VR

VI – Aplicación de la tecnología VR

VII - Métodos para la evaluación de VR

VIII - Bibliografía

## I - Fundamentos del análisis de fallas y aplicación de END (NDT)

Un gran porcentaje de plantas de generación de energía, de procesamiento de petróleo, de la industria química, operan durante largo tiempo en condiciones críticas de presión, temperatura y atmósferas corrosivas, durante 30/40 años. Existe una fuerte tendencia por parte de las empresas a **continuar** la operación de estas plantas por largos periodos. Los factores que conducen a este objetivo son los siguientes:

La escalada de costos de los nuevos equipos y la falta de recursos económicos

La capacidad productiva excedida, aunque precaria que deviene del envejecimiento de las plantas

Los tiempos prolongados que se requieren en la construcción de plantas nuevas

Incertidumbre en la proyección de la demanda

Limitada disponibilidad de lugares convenientes para la instalación de plantas industriales

Incremento en las restricciones de contaminación ambiental, seguridad y otras regulaciones

El permanente desarrollo de conocimiento relacionado con la viabilidad tecnológica de **extender la vida** de la planta

En la actualidad existen numerosos estudios que demuestran que el costo de la extensión de vida de una planta termoeléctrica es del orden del 20 al 30 % relacionado con la construcción de una planta nueva y que la relación costo-beneficio es elevada.

La expresión **extensión de vida** no se refiere a la operación de una planta más allá de su vida útil. La idea es evitar un prematuro deterioro de los componentes, en base a criterios de diseño, que incluyen diferentes controles, incluyendo los de tipo NDT (non destructive testing).

Principales ensayos no destructivos:

- Inspección visual
- Ultrasonido
- Partículas magnéticas
- Tintas penetrantes
- Rayos X
- Emisión acústica
- Corrientes inducidas
- Metalografía no destructiva
- Termografía: A partir de la disponibilidad de sistemas electrónicos, la termografía industrial ha aportado información relevante que puede ser tratada mediante adquisición de datos en operación (por ej. Sobrecalentamiento en zonas localizadas).

En el TP de “Análisis de Fallas en Equipamiento Industrial”, se desarrollan algunas de estas técnicas y se dan conceptos relacionados con estado de integridad y durabilidad de componentes en servicio.

## II - Concepto de Falla (daño)

La estructura, equipos y componentes de una planta pueden fallar por:

- 1- Excesiva deformación elástica
- 2- Excesiva deformación plástica
- 3- Degradación progresiva de propiedades
- 4- Desgaste y erosión
- 5- Radiación electromagnética y/o corpuscular
- 6- Fractura

1- *La deformación elástica* es controlada por el módulo de elasticidad, que es independiente de la microestructura del componente y de su tenacidad.

En estos casos, una mayor rigidez se obtiene por aumento de la sección eficaz del componente.

2- *La deformación plástica* excesiva ocurre:

- Cuando las cargas a la  $a$  que está sometido el componente exceden el límite elástico uniaxial, que debe utilizarse con un criterio adecuado, para un estado complejo de cargas (Von Mises o Tresca).

Por deformación por creep.

3- *La degradación progresiva de propiedades* puede ocurrir en los siguientes casos:

- Pérdida de propiedades mecánicas de componentes por la acción térmica
- Carburación o decarburación interna de componentes (tuberías, reactores y recipientes, en general)
- Ataque con hidrógeno a elevada temperatura
- Deterioro de la obra civil por agresión atmosférica o situaciones imprevisibles
- Fenómenos de oxidación
- Ataque químico: corrosión generalizada o localizada

4 - *El desgaste del componente* es relevante en:

Rotores, árboles de transmisión y sus bujes o cojinetes, que dependen de la lubricación efectiva.

5 - *La erosión* es producida en las paredes interiores donde circulan fluidos si la especie de fluidos en movimiento contienen sólidos o es agresiva (corrosión-erosión) y/o si se encuentran en régimen turbulento.

6- *La radiación electromagnética* (rayos X y  $\Gamma$ ) afecta solamente a materiales plásticos y de origen orgánico, en particular al hombre y al medio ambiente, factor primordial de seguridad en instalaciones nucleares.

La radiación de partículas, principalmente de neutrones, afectan además la estructura de los materiales expuestos.

7 - *La falla por fractura* ocurre, en general, por:

- Fractura frágil espontánea de materiales de alta resistencia o, en aceros dúctiles, a temperaturas por debajo del límite de transición dúctil-frágil.
- Fatiga o fractura progresiva, sea oligocíclica o de alto número de ciclos o por corrosión bajo tensiones (stress-corrosion cracking).
- Fractura diferida, que ocurre a una *tensión de rotura* en carga estática a elevada temperatura o, a temperatura ambiente, por presencia de hidrógeno.

### III - Vida útil – Vida residual – Integridad - Durabilidad

Vida útil de un componente es el intervalo de tiempo entre su puesta en servicio y el momento previsto de reemplazo por pérdida de funcionalidad

La integridad está relacionada con el nivel de defectos que se detectan en un componente. Es necesario establecer el grado de daño acumulado.

La durabilidad se refiere al estado de envejecimiento del equipo en función del comportamiento en servicio preestablecido.

Vida residual (VR)

Intervalo de tiempo que un componente puede ser mantenido en servicio (con parámetros bien definidos), antes de perder su funcionalidad.

La vida útil se basa en:

- Parámetros teóricos de operación en servicio
- Coeficiente de seguridad (o de ignorancia). Lo impone la normativa vigente y es asumida por el proyectista
- Vida útil prevista para el componente (vida teórica del componente)

Para un juicio objetivo sobre integridad y funcionalidad de los componentes de una planta, es necesario evaluar la fracción de vida transcurrida o la fracción de daño acumulado

A causa de los coeficientes de seguridad aplicados, la VR de un componente, en condiciones óptimas de servicio, será superior a la diferencia entre la vida teórica proyectada y el tiempo de servicio.

### IV - Extensión de vida mediante VR

#### *Objetivos*

La tecnología de VR conduce a:

- Diferir el cierre de la planta luego de transcurrido el tiempo de vida útil de diseño
- Extender la vida útil de la planta, en base a comprobaciones objetivas del posible daño del material
- Ahorro de inversiones que pueden utilizarse en nuevas instalaciones.

#### *Fundamentos*

La implementación de la tecnología de VR se basa en:

- Desarrollo de modelos predictivos confiables sobre el proceso de daño de componentes e instalaciones.
- Avance de materiales y diseños aplicado a construcción de plantas
- Emprendimiento de actividades multidisciplinarias

#### *Normativa de inspección*

API – ASME – DIN – ISO

Las centrales nucleares se rigen según normas de la OIEA de acuerdo al Código 50-C-QA de Seguridad de Planta Nucleares de Potencia (NPPS)

Lidera la IAEA – Viena – Austria

*Modalidad de inspección*

a - Aplicación de métodos que no requieren parada de planta

- Evaluación de equipamiento e instalaciones a partir de base de datos (características de materiales, certificados de compra, registro de inspecciones programadas y no programadas de la planta, fallas eventuales)
- Cálculo del factor de uso para aplicarlo a modelo de VR
- Recálculo del proyecto, teniendo en cuenta desviaciones críticas de comportamiento. Se utiliza MEF para determinación de estado de tensiones y evaluación de VR.
- Estudio de base de datos registrados del funcionamiento de la planta, de la posible degradación de los componentes por fatiga de bajo ciclo (oligocíclica).
- Control dimensional y de vibraciones
- Control de flujo turbulento, obstrucción de flujos y propagación de fisuras activas mediante sensores de emisión acústica estratégicamente instalados.
- Examen de componentes para control de corrosión atmosférica

b - Métodos que requieren parada de planta

- Inspección visual
- Ensayos no destructivos (NDT). Se basan en los siguientes conceptos:
  - Se requiere solamente preparación de la superficie
  - Se debe realizar en campo (directamente sobre el componente)
  - Se requiere el menor tiempo posible y la obtención de indicaciones precisas.

**V - Metodología empleada para la determinación de VR**

Conocimiento de zonas críticas de la planta y el modo de evidencia de los daños del equipamiento

Definición de escala de prioridad y de criterios de criticidad de los componentes, para programar las intervenciones de vigilancia, mantenimiento, reparación y sustitución de partes, sobre bases económicas y de seguridad

Riguroso cumplimiento de de los Códigos respectivos de Inspección de Equipamiento y Análisis de Resultados

Método de cálculo de análisis de tensiones (FEM) y modelos de evolución de daño

Técnicas experimentales para obtener información sobre el estado del material del componente.

Aspectos de seguridad, legislativos, financieros, ecológicos y ámbito de responsabilidad

## VI – Aplicación de la tecnología VR

### Antecedentes

Crisis del petróleo (1974). Nace en Alemania y se extiende a Inglaterra, Dinamarca, Bélgica y Holanda. Más tarde Japón y Estados Unidos pasan a ser los países mas importantes en Tecnología de VR

### Campo de aplicación

La tecnología de VR es aplicable en general a plantas industriales que operan a altas temperaturas, con gran carga mecánica (en condiciones críticas de presión) y en medios oxidantes (corrosivos).

Industrias químicas y petroquímicas (Calderas, reactores, recipientes a presión, turbinas, tuberías)

Plantas nucleares y termoeléctricas (Calderas, reactores, intercambiadores de calor, tuberías de vapor, rotores de turbina a vapor y generadores, turbogas)

Industria aeronáutica y espacial (estructura y fuselaje, paletas de rotor y estator de turbina, componentes de motores)

### Daño dependiente del factor tiempo-temperatura

#### Principales tipos de daño

- Creep
- Fatiga térmica
- Fragilidad de revenido (temper embrittlement)
- Ataque por hidrógeno
- Fragilidad de los aceros inoxidables
- Fisuras en soldaduras

### Análisis de Creep

Se produce:

- Difusión
- Movimiento y generación de dislocaciones
- Deformación plástica
- Degradación de la microestructura debido a formación de precipitados (microfases), microfisuras y cavidades

## VII - Métodos para la evaluación de VR (componente en servicio sometido a creep)

### Evaluación teórica

Método gráfico empleando el Parámetro de Larson-Miller (PLM)

## Evaluación experimental

## Análisis de la evolución microestructural (Método de Neubauer-Wedel)

El EPRI ha comercializa diversos tipos de software para VR de tubos de vapor de plantas termoeléctricas, que están sujetas a temperaturas crecientes a causa del óxido en la interfase metal-vapor.

Una aplicación de este modelo que implica CD (continuous damage), se da en la determinación del daño mediante el estudio de réplicas metalográficas de componentes.

Los parámetros metalográficos que se tienen en cuenta en esos estudios son:

- Número de cavidades por unidad de volumen,
- Fracción de área involucrada en la cavidad,
- Fracción volumétrica de la cavidad,
- Número fraccional de bordes de grano sobre los que las cavidades están presentes,
- Relación entre la fisura más grande relevada y la fisura crítica.

Ejemplo:

Evaluación teórica

Método gráfico: Este método prevé la aplicación de los siguientes parámetros:

$\sigma_R$ : Solicitación a rotura por creep

$\sigma_E$ : Solicitación en servicio (esercizio)

PLM: Parámetro de Larson-Miller

Procedimiento:

$$\text{Para tubería se tiene: } \sigma_E = \frac{P(D-d)}{2d}$$

Donde P: Presión de servicio interno

D: Diámetro externo de la tubería

d: Espesor mínimo de pared

En general  $\sigma_E$  se multiplica por un factor  $K = 1.6$ , que tiene en cuenta la posible variación de las características iniciales del material.

Según “Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components” de Ramaswamy Viswanathan – 1989 – ASM

$$PLM = (T + 273)(C + \log t) \cdot 10^{-3}$$

Con T: Temperatura en servicio

t: tiempo en servicio en horas

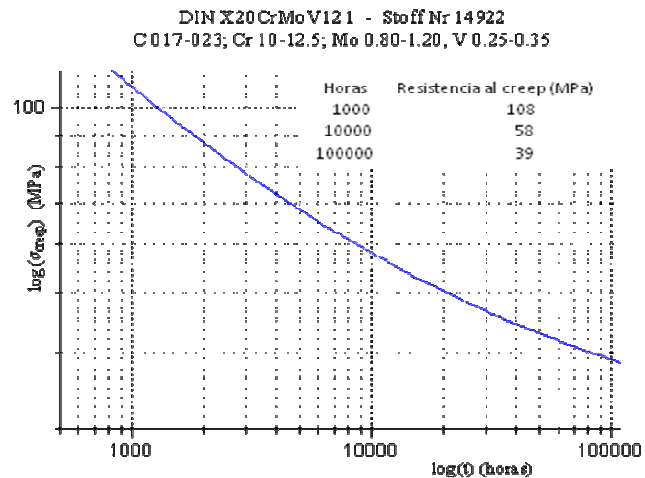
C: Constante = 20 para aceros ferríticos

= 15 para aceros austeníticos

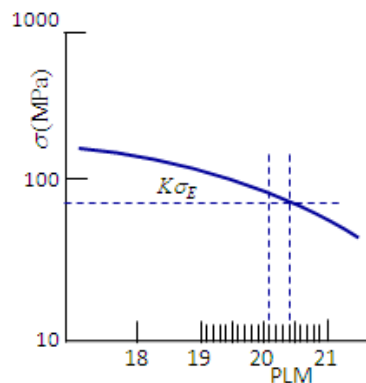
Empleando la curva experimental del acero, que se obtiene de la bibliografía, se puede determinar la VR del componente.

Se puede dar tres casos:

- Vida residual nula.
- Vida residual agotada.
- Vida residual remanente.



Resistencia del acero en función de PLM



Datos de operación del componente en servicio

$\sigma_{\text{creep}}$  (servicio) = 47.12 MPa; Tiempo en servicio: 75000 horas

$K \cdot \sigma_{\text{creep}} = 75.39 \text{ MPa}$

Cálculo del parámetro de Larson-Miller

Para PLM =  $(573 + 273)(20 + \log 75000) \cdot 10^{-3} = 20.1$

De la curva  $\sigma_E = f(\text{PLM})$ , resulta PLM=20.4

Con este valor de PLM, se calcula el tiempo  $t = 1.77 \cdot 10^5$  horas

Fracción de vida consumida =  $75000/177000 = 0.42 \Rightarrow 42\%$

Fracción de vida residual =  $1 - 0.42 = 0.58 \Rightarrow 58\%$

## VIII – Bibliografía

- Advanced Materials & Progress – Magazine of ASM International Publication – USA
- Microscopy and Microanalysis – Magazine of Wiley&Sons – UK
- Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components – R. Viswanathan (EPRI Technical Advisor) – ASM International – USA
- EPRI Report Publications



Cuestionario

Indicar los principales argumentos que justifican la extensión de vida de plantas industriales

Indicar los principales END que se utilizan en el control de integridad y durabilidad de equipamiento de plantas industriales

Cuál es el fundamento físico que sustenta la aplicación de ultrasonido, tintas penetrantes, partículas magnéticas?

Que perspectivas existen para el reemplazo de la técnica de radiografía industrial?

Cuál es la técnica de END más importante en el control de fallas en equipamiento industrial?

Cuáles son las causas que generan daño en equipos de plantas industriales?

Explicar concepto de durabilidad, integridad, vida útil y vida residual

Cuál es el campo de aplicación de la tecnología VR?

Indicar casos típicos de daño dependiente del factor tiempo-temperatura

Explicitar los métodos de evaluación de VR

**Factores que justifican el la extensión de vida en servicio de equipamiento industrial**

Un gran porcentaje de plantas de generación de energía, de procesamiento de petróleo, de la industria química, operan durante largo tiempo en condiciones críticas de presión, temperatura y atmósferas corrosivas, durante 30/40 años. Existe una fuerte tendencia de parte de las empresas de continuar la operación de estas plantas por largos periodos. Los factores que conducen a este objetivo son los siguientes:

La escalada de costos de los nuevos equipos y la falta de recursos económicos

La capacidad productiva excedida, aunque precaria que deviene del envejecimiento de las plantas

Los tiempos prolongados que se requieren en la construcción de plantas nuevas

Incertidumbre en la proyección de la demanda

Limitada disponibilidad de lugares convenientes para la instalación de plantas industriales

Incremento en las restricciones de contaminación ambiental, seguridad y otras regulaciones

El permanente desarrollo de conocimiento relacionado con la viabilidad tecnológica de extender la vida del componente

En la actualidad existen numerosos estudios que demuestran que el costo de la extensión de vida de una planta termoeléctrica es del orden del 20 al 30 % relacionado con la construcción de una planta nueva y que la relación costo-beneficio es elevada.

La expresión extensión de vida no se refiere a la operación de una planta más allá de su vida útil. La idea es evitar un prematuro deterioro de los componentes, en base a criterios de diseño, que incluyen diferentes controles, incluyendo los de tipo NDT (non destructive testing).