



GOBIERNO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS

CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y EMPLEO



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

FITNESS FOR SERVICE

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000285

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/09/2016

Fecha fin: 31/12/2017

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto Fitness For Service nace de la necesidad de evitar paradas no planificadas en la industria, donde la productividad ininterrumpida es prioritaria.

La metodología FFS permite demostrar la integridad estructural de un equipo o componente en servicio, a pesar de estar dañado, tener defectos o grietas. Las guías o procedimientos FFS permiten determinar si el equipo o componente puede continuar en servicio durante un periodo de tiempo determinado (al menos hasta la siguiente inspección programada), si es necesario repararlo, reemplazarlo y cuáles serían las actuaciones de remediación aplicables.

Los análisis FFS tienen una naturaleza multidisciplinar debido a que en ellos se integran:

- Análisis de tensiones, para determinar las tensiones actuantes en el componente.
- Análisis metalúrgicos, para comprender el efecto de la temperatura, las tensiones y el ambiente en el comportamiento del material.
- Exámenes no destructivos (NDE), para la detección de grietas y su tamaño.
- Corrosión, para comprender los mecanismos de daño y plantear estrategias paliativas efectivas.
- Operación de planta, para conocer cómo es el proceso al que está sometido el equipo.
- Análisis de mecánica de la fractura, para estudiar el comportamiento mecánico de las grietas.
- Probabilidad y estadística, análisis de datos.

Esto hace que las evaluaciones FFS, que se realizan de acuerdo a la norma API 579, presenten una complejidad y requieran de una habilidad para su manejo que hace necesaria una intensiva preparación previa, lo que obliga a operarios y gerentes a subcontratar estas evaluaciones sobre la adecuación al servicio de los componentes de las plantas industriales, dado que no cuentan con los recursos/capacitación necesarios.

La no realización de un estudio de FFS cuando es requerido, es decir, cuando hay un cambio en las condiciones de operación o se han detectado grietas o fallos estructurales en el equipo, puede provocar accidentes graves o incluso fatales.

Sin embargo, el coste de un análisis FFS es insignificante frente al de paradas de producción no previstas o fallos catastróficos. Además, este tipo de estudios puede permitir aumentar la producción elevando los límites admisibles de los equipos de forma que estos puedan ser operados de forma continuada, siempre y cuando se garantice una estimación de vida remanente adecuada.

Actualmente se incluyen procedimientos de análisis para 12 tipos de fallos típicos en equipos de estas industrias, a saber: fractura frágil, pérdida de metal generalizada, pérdida de metal localizada,

corrosión por picaduras, fragilización por hidrógeno (cálculo de ampollas), desalineamientos y distorsiones, fractura, fluencia, daño por fuego, muescas y marcas, delaminaciones y fatiga.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto que se plantea tiene como objetivo general el desarrollo de una metodología de Fitness for Service, la cual permita aportar nuevas soluciones a la industria en el campo de la mecánica estructural (fractura, fatiga y creep), corrosión e ingeniería (simulación numérica) y en sectores como la industria petroquímica, naval, energética y aeronáutica.

La metodología propuesta tendrá aplicación en múltiples sectores industriales: generación de energía, aeroespacial, transporte, petroquímica, tuberías, gas, industria de proceso, offshore. Como se indicaba en la memoria del proyecto, las principales empresas asturianas potencialmente tractoras son empresas que desarrollan su actividad en, entre otros, el campo de la fabricación de productos intermedios o finales en los que no sólo su composición, sino también su estructura interna son determinantes de las características finales del bien fabricado y de su comportamiento en servicio.

2 OBJETIVOS

1. Desarrollo de una metodología para facilitar los cálculos que permitan la evaluación de la integridad estructural de:
 - Un componente con daño estructural. Se ha desarrollado una metodología según la cual el análisis se efectúa en función de las causas primarias que provocan el deterioro y posible fallo del componente, estudiando por separado los efectos de cada una de ellas. Para ello se analiza la viabilidad del análisis en función de los datos de partida disponibles, desarrollándose a continuación una serie de pasos que permiten estimar el grado de seguridad de operación del componente en las condiciones actuales.
 - Un componente con daño por corrosión. Se han desarrollado metodologías para cada uno de los tipos de daño por corrosión mencionados en el objetivo 2, que incluyen desde la identificación del equipo, las indicaciones para la toma y registro de datos correspondientes a las dimensiones y ubicación del fallo durante la inspección del mismo, y los cálculos necesarios para considerar la posible continuidad en servicio del componente que contiene el fallo.
 - Un componente con daño, mediante el método de elementos finitos. Las metodologías para estudiar numéricamente los distintos tipos de daño han sido desarrolladas identificando los modelos de material a emplear, cargas y combinaciones de carga a tener

en cuenta así como los criterios de evaluación específicos para cada tipo de daño y metodología de análisis empleada.

2. Desarrollo de rutas de evaluación basadas en el FFS que permita predecir la vida remanente de un componente o estructura sometidos a:
 - Mecanismos de daño por fractura, fatiga creep o sus combinaciones. Para cada uno de estos mecanismos de daño se ha definido la metodología para evaluar la vida remanente del componente en función del estado actual del equipo y de las condiciones de operación futuras, incluyendo la adopción de medidas correctoras que permitan asegurar la vida segura del componente.
 - Mecanismos de daño por corrosión (pérdida de espesor generalizado/localizado, pitting), ampollamiento y daño por hidrógeno asociado con fragilización inducida por hidrógeno (HIC) y fragilización inducida por hidrógeno orientada por tensiones (SOHIC), erosión, daño por fuego o sus combinaciones. Se han definido rutas de evaluación para cada mecanismo de daño, para los distintos tipos de componentes y, cuando aplique, para las distintas direcciones de evaluación de cada tipo de componente (longitudinal y circunferencial), las cuales, considerando las presiones de diseño y de trabajo y las tolerancias para la corrosión (respecto al espesor) permiten determinar la vida remanente de un componente o bien las medidas de corrección y control necesarias para asegurar la continuidad del equipo en condiciones seguras.
 - Mecanismos de daño por fractura frágil, desalineamiento en soldaduras y distorsiones en las shells, crecimiento de grietas y comportamiento en el rango de fluencia, mediante el Método de Elementos Finitos. Se han definido las rutas de evaluación para los daños planteado, siendo validadas mediante la aplicación de casos prácticos al igual que en los puntos anteriores.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

3.1 DESARROLLO DE RUTAS DE EVALUACIÓN BASADAS EN EL FFS-MECÁNICA ESTRUCTURAL

El Hito 1 del proyecto se centraba en el desarrollo de una metodología propia FFS basada en los puntos 1 ,2, 3, 8, 9, 10, 11, 12 y 14 de la norma API 579-1/2.

3.1.1 Desarrollo de metodología FFS para daño a fractura

Los fallos por rotura frágil se producen sin deformación plástica previa, por lo que suceden sin aviso. Es una rotura instantánea, sin deformaciones del metal y por tanto sin consumo de energía. La velocidad de propagación de la grieta es muy rápido y puede producir fallos catastróficos. Este tipo de fractura presenta grietas tipo chevron en su superficie (véase la figura 1).



Figura 1. Superficie de fractura frágil

Este tipo de fracturas suelen ocurrir al poco tiempo de fabricar el recipiente, de hacerle una reparación o una alteración. Pudiendo ocurrir que un aporte térmico excesivo durante el soldeo pueda llegar a ser responsable del fallo. En cualquier caso este tipo de rotura se produce por una combinación de tensiones y temperatura baja.

Como datos previos para la aplicación de este procedimiento en los recipientes que pueden llegar a sufrir una rotura frágil se debe tener en cuenta:

- Una vez probado satisfactoriamente el recipiente a un grado de tensiones y una temperatura determinados, es muy poco probable que el recipiente rompa posteriormente en esas condiciones, a no ser que sea un componente de alta temperatura de trabajo (fragilización de revenido).
- En recipientes cuyo espesor de virola es inferior a 12 mm el riesgo de rotura frágil es mínimo.
- No hay constancia de rotura frágil a temperaturas de metal por encima de 15°C.

La aplicación del procedimiento de análisis de la adecuación al servicio desde el punto de vista de la fractura frágil es independiente del tipo de grieta que pueda existir o del mecanismo de daño por sí. Se trata de un estudio independiente para el caso de rotura frágil que posteriormente se podrá combinar, o no, con análisis para otros tipos de fallo.

El tipo de evaluación o análisis asociado a fractura por rotura frágil su objetivo es prevenir el inicio de la fractura frágil. Por la experiencia se conoce que este tipo de fallos pueden ocurrir cuando:

- Existe algún cambio en el proceso que aumenta la posibilidad de trabajar a bajas temperaturas.
- Un análisis de riesgo indica la posibilidad de que se alcancen temperaturas más bajas y/o presiones más altas que las de diseño (por ejemplo durante las paradas y arranques).
- Existe posibilidad de reducción del factor de seguridad.
- Es necesario determinar la temperatura mínima para la realización del test hidrostático.

El tipo de componentes que pueden ser analizados mediante los procedimientos desarrollados en este proyecto son:

- Depósitos a presión.
- Tuberías.
- Tanques de almacenamiento.

Para aplicar el método FFS a la previsión de uso de estructura afectadas por una posible rotura frágil como datos previos son necesarios:

- El diseño original o planos.
- El proceso de fabricación del componente.
- Los materiales de construcción.
- La historia de servicio, posibles reparaciones o modificaciones.
- Las condiciones ambientales de trabajo.
- Técnicas de inspección y requisitos de dimensionamiento.

Los procedimientos de evaluación para fractura por rotura frágil son de aplicación en los niveles 1 y 2 en el caso de aceros de baja aleación, tuberías y tanques de almacenamiento siempre que cumplan unas determinadas condiciones, a su vez se puede utilizar para equipos que sufran corrosión siempre y cuando satisfagan unos determinados criterios.

El cálculo es útil como herramienta de selección de material, pero no tiene en cuenta el efecto de tensiones residuales secundarias.

Si las condiciones de servicio pueden conducir a una reducción de tenacidad, puede ser necesario utilizar el Nivel 3 de evaluación.

Para la aplicación de este procedimiento en los niveles 1 y 2 es necesario el cálculo de dos propiedades del componente: la Temperatura Crítica de Exposición y la Temperatura Mínima Admisible.

De forma que en el nivel 1 el cálculo se hace de una forma más sencilla y, por tanto, conservadora, mientras que en el nivel 2 es un cálculo de mayor precisión.

Se tendrán que calcular las tensiones primarias, las secundarias (originadas por cargas mecánicas y expansiones térmicas diferenciales) y las de pico (tensiones muy localizadas, en las que se presentan cambios geométricos bruscos).

Los componentes que tengan una temperatura crítica de exposición mayor o igual que la mínima admisible podrán continuar operando de forma segura. En caso contrario sería necesaria una nueva evaluación.

Para la evaluación del Nivel 1 se tendrán que calcular: la temperatura crítica de exposición, el valor del espesor no corroído el valor de la temperatura mínima admisible.

Si se cumplen las condiciones del Nivel 1 se repetirá la evaluación para cada elemento involucrado en la integridad estructural. Para comprobar que todos los componentes cumplen condiciones.

Si no se cumplen las condiciones del Nivel 1, se pasará a las del Nivel 2.

Se podrán estudiar los siguientes componentes: recipientes a presión, tuberías y tanques de almacenamiento atmosféricos y baja presión.

Para el Nivel 2 de evaluación se aplicarán varios métodos: evaluación, método basado en una prueba hidráulica, evaluación no necesaria si se cumplen ciertos requisitos de temperatura, espesores, condiciones de diseño, operación, etc.

Como se ha explicado previamente, en este nivel de evaluación los cálculos de los parámetros se deben realizar con mayor precisión que para el nivel anterior.

En el caso de recipientes a presión y tuberías, si se realiza una evaluación puede comprobarse que la temperatura y la presión de operación están dentro de un entorno seguro según definición de diseño. En caso de encontrarse en dicho rango el componente quedará exento de la evaluación y puede seguir operando en iguales condiciones.

En caso contrario tendrán que calcularse ciertos valores como: cálculo de la pérdida de espesor, tolerancia a la corrosión, eficiencia de la junta, espesor mínimo del componente y cálculo del ratio de reducción.

Se determinará además la reducción de temperatura.

De acuerdo con este método el depósito pueda operar por debajo de la temperatura de diseño, si la presión está por debajo del valor de diseño, o el espesor de pared es mayor que el mínimo requerido a la presión de diseño.

Si se opta por la prueba hidráulica el equipo puede ser cualificado para servicio continuado mediante un ensayo hidrostático.

Finalmente el equipo puede ser cualificado basándose en un comportamiento satisfactorio durante su funcionamiento en el pasado.

Para tanques de almacenamiento atmosféricos y baja presión que contengan productos refrigerados deben evaluarse utilizando el Nivel 3 de aseguramiento.

Los equipos que no cumplan los criterios de evaluación por nivel 1 y 2 pueden ser evaluados por el nivel 3, que normalmente requiere del análisis del al menos uno de estos tres factores que controlan la susceptibilidad del material a la fractura frágil: tensión, tamaño de grieta y tenacidad de material. El apartado de análisis de defectos tipo grieta puede usarse como base para la evaluación del nivel 3, así como un análisis de riesgo considerando tanto la probabilidad como las potenciales consecuencias de una rotura frágil en servicio.

En este nivel de análisis, el juicio del ingeniero debe considerarse a la hora de aplicar alguno de los principios de los niveles 1 y 2 sin las restricciones impuestos en ellos.

Pueden realizarse inspecciones de las soldaduras adyacentes a la vómita para determinar la presencia de defectos tipo grieta. Puede ser necesario evaluar las tensiones utilizando el método de los elementos finitos. Para ello se deben tener en consideración todas las cargas relevantes, incluyendo aquellas que producen tensiones localizadas (fuerzas y momentos en tubuladuras), transiciones térmicas y tensiones residuales. Esto puede provocar que el criterio para la localización de las grietas se modifique, teniendo que determinar las posibles localizaciones y orientaciones de grieta en base a dichas condiciones de carga.

El nivel 3 se basa normalmente en la determinación de la máxima grieta prevista en localizaciones de alta tensión. En general, estas grietas se suponen superficiales y orientadas transversalmente a la máxima tensión. Para estructuras soldadas, esto a menudo implica que las grietas estén localizadas en el campo de tensiones residuales paralelo a las soldaduras longitudinales, o en el campo transversal a las soldaduras circunferenciales. El máximo tamaño de grieta debe poder ser detectable por un equipo estándar de ensayos no destructivos y dependerá de factores como el estado superficial, localización accesibilidad, operador y técnica de NDT. La relación de aspecto de la grieta debe suponerse lo bastante grande como para que los cálculos no sean demasiado sensibles a pequeñas variaciones en la profundidad de grieta en la dirección del espesor.

La aplicación de este procedimiento tiene las siguientes limitaciones:

- No es aplicable para otros materiales que podrían ser susceptibles a la fractura frágil, como los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos y dúplex.
- No aplica a las calderas y tuberías externas de las calderas.
- No aplica al choque térmico.

Para los defectos tipo grietas el Nivel 1 y 2 de estudio solo se aplica en determinadas condiciones: el criterio de diseño original tiene que ser de un código reconocido, el componente no opera en zona de creep, las cargas dinámicas son despreciables, la grieta es sujeto de cargas y/o ambientales que no fomentaran el crecimiento de grieta, etc.

Existen ciertas limitaciones en cuanto a la aplicabilidad del nivel 1 de análisis: limitaciones en el tipo de componentes y geometría de grieta, limitación de cargas y limitaciones del material.

El Nivel 3 debe llevarse a cabo cuando el Nivel 1 y 2 no se puedan aplicar, o produzcan resultados muy conservadores. Algunas condiciones que requieran un Nivel 3 de estudio son:

- a) Estudios avanzados de tensiones para definir el estado de tensiones en la grieta, por complejidad geométrica y/o condiciones de carga.
- b) La grieta está en zona de crecimiento crítico o con posibilidad de estarlo y activarse por tensiones cíclicas o ambientales.
- c) Fuertes gradientes de tensiones, tenacidad a la fractura o límites elásticos o tensiones de roturas en la localización de la grieta (mismatch).

En la práctica se encuentra un problema al analizar las grietas profundas, y es la profundidad es más difícil de estimar que la longitud, con las técnicas de inspección habituales. Podremos clasificarlas en grietas profundas con valores por defecto (se supone pasante como medida más conservadora), o con medidas reales.

Si el ligamento resistente es muy pequeño será necesario recategorizar el defecto en función del tamaño del ligamento. En un defecto embebido podría recategorizarse como defecto de superficie y un defecto de superficie como un defecto pasante.

Las grietas ramificadas se esquematizan mediante un solo plano predominante de defectos.

Para las grietas y defectos múltiples se supondrá que si dos o más grietas están cerca pueden considerarse una. Si están lo suficientemente separadas se tomara la grieta más severa.

El Nivel 1 de evaluación está limitado para discontinuidades en cilindros presurizados, esferas o placas planas.

Deberán determinarse las cargas y temperaturas que se usaron en la evaluación de condiciones diseño y operación, la longitud y la profundidad de las grietas. Si la localización del defecto es en la soldadura, o dentro de una distancia determinada desde el eje del cordón, se deben usar curvas de

metal soldado. Sino usar las curvas de metal base. Para defectos en la soldadura, la curva de evaluación aplicable está basada en el tratamiento térmico del componente.

Finalmente se evaluarán los resultados. Si la grieta permitida determinada es más grande que la grieta, el componente es aceptable.

Si el componente no cumple con los requerimientos de la evaluación de Nivel 1 se deberán hacer las siguientes acciones o combinaciones de ellas:

- a) Repetir la toma de datos del análisis, con más END para mejor definición de las dimensiones del defecto y determinar las condiciones de operación y temperatura.
- b) Reajustar temperatura, reparar, reemplazar, o retirar el componente.
- c) Pasar a evaluación Nivel 2.

El procedimiento de evaluación del Nivel 2 proporciona una mejor estimación de la integridad estructural del componente, a costa de exigir mayor cantidad de datos de partida y un proceso de cálculo más complejo.

Se deben evaluar las condiciones de operación y determinar presión, temperatura, y la combinación de cargas suplementarias, calcular la distribución de tensiones de tensiones en la localización del defecto con las cargas evaluadas y clasificar las tensiones en: primarias, secundarias y residuales.

También hay determinar las propiedades del material y las dimensiones del defecto.

Si el defecto modificado supera el espesor hay que recalificar el defecto como pasante.

En el Nivel 3 de estudio hay 5 métodos distintos, varios de ellos basados en el nivel 2 de estudio, y modificando algunos apartados, o pasos, para aproximarlos más al caso real, o para casos con materiales con un comportamiento muy dúctil.

- El método A se basa en la modificación del diagrama FAD de acuerdo a las características propias del de la familia de materiales evaluados.
- El método B solo puede aplicarse para el metal base o metal de soldadura, no para la ZAT dado que se requiere la curva completa tensión-deformación del material, obtenida en continuo o al menos con puntos suficientes en el rango del límite elástico. Con dichos datos, se dibuja el diagrama FAD optimizado, procediendo a continuación de la misma manera.
- El método C construye un diagrama FAD que considera además la geometría del material.

El método D se basa en la resistencia al desgarro dúctil, según los parámetros obtenidos de un ensayo de la integral J del material y la comparación del mismo con la curva prevista de crecimiento de grieta en función de la energía de activación, obteniendo una secuencia de puntos en el diagrama FAD que nos dirán si la grieta no crecerá, crecerá y se detendrá por plastificación o crecerá hasta la rotura final del componente

3.1.2 Desarrollo de metodología FFS para daño a fatiga

La fatiga es un proceso subcrítico que puede conllevar al fallo o fractura de un componente debido a la repetición o fluctuación de tensiones con valores de tensiones inferiores a la tensión máxima de material. Localmente, en defectos internos (grietas, rechupes, inclusiones, etc.) por efecto de los concentradores de tensión puede darse el caso que se supere el límite elástico y estos defectos empiecen a crecer y coalescer para finalmente acabar formando una grieta. La mayor parte de los casos la fatiga comienza en la superficie de la pieza por defectos superficiales, pero a veces pueden tener origen interno, por ejemplo, debidos a inclusiones.

La fatiga es un fenómeno cuyo estudio tienen vital importancia ya que puede producir fallos en componentes que están solicitados a cargas mucho menores de su carga de rotura, dando lugar a fallos repentinos en componentes de responsabilidad como recipientes a presión, aviones, barcos, estructuras offshore, etc.

Los componentes que tengan paradas y arranques, cilindros o tuberías a presión, ciclos térmicos o ejes rotantes, son susceptibles de sufrir fatiga.

Casi siempre se distinguen dos etapas en el proceso de fatiga (sin defectos tipo grieta) de un componente: iniciación y propagación. Tras la rotura se puede observar la superficie característica del mecanismo de fractura que son las marcas de playa (ver figura inferior).

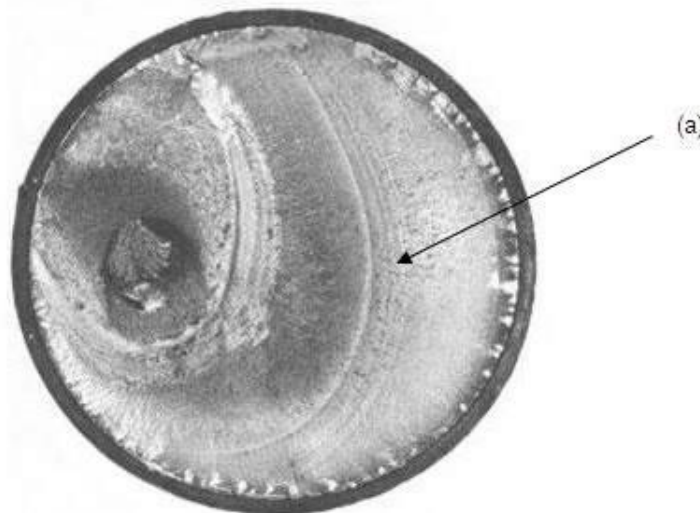


Figura 2. Superficie fatigada hasta la rotura

Los cálculos de fatiga suelen efectuarse mediante el empleo de curvas de fatiga (curvas SN), que relacionan rango o amplitud de tensiones con número de ciclos. Algunas curvas tienen límites de endurance (o límite de fatiga) que implica que con valores por debajo de este límite nunca se producirá la rotura del componente.

Este procedimiento (basado en API 579-1/ ASME FFS-1) está pensado para componentes con cargas cíclicas y sin defectos de grietas. Se basa en el histórico de ciclos de cargas y ciclos estimados.

Para ello se ha de definir una tolerancia de fallo para decir si un componente es válido o no conociendo su condiciones de servicio pasadas y futuros.

Por otra parte, para los casos de fatiga en rango creep se estudia en otros métodos.

Hay 2 tipos de curvas disponibles: curvas de barras lisas (sin defectos/detalles/soldadura) y con detalles (con soldadura).

Las curvas de barras lisas sirven para componentes con y sin soldadura. Tienen límite a fatiga o endurancia. Las curvas de barras con soldadura no tienen endurancia.

Se tendrá que prestar atención a la posible presencia de ratcheting (ciclos de histéresis no estable).

Este módulo será aplicable para componentes sin grietas o que trabajen en zona de creep, se deberá calcular la temperatura máxima de trabajo, existe una limitación de T^a (creep)

Hay ciertas limitaciones con tipos de fallos, como por ejemplo: Puede tener fallos volumétricos, no debe tener grietas, que no contenga daños por hidrogeno y sin mellas.

Para que puedan aplicarse los Niveles 1 y 2, se deberán cumplir varios criterios entre los que destacan: los criterios de diseño original están en concordancia con un código reconocido, historial de cargas definido, el material tienen suficiente tenacidad, etc.

El nivel 3 puede usarse en cualquier componente, con o sin soldadura. Se necesita el historial de carga, las tensiones y deformaciones y los defectos permitidos. Puede llegar a incluir análisis numéricos. Sirve para los casos más complejos.

El historial de cargas necesario para realizar los estudios tendrá que indicar temperaturas, presiones, cargas suplementarias, ciclos correspondientes, cargas significativas y eventos, número de ciclos incluyendo paradas y arranques, vibraciones que puedan afectar estimación de futuras cargas, cargas, presión y temperaturas, relación de tiempo cargas. Si no hay historial de cargas generar con la información del dueño. La iniciación de la grieta no se puede ver por ENDS, pero si las grietas generadas y la propagación de ellas.

El Nivel de evaluación 1 se realizará cuando no se cumplan ciertos requerimientos de los siguientes métodos:

- Método A

Este método está basado en experiencia, con aquellos equipos que sean comparables. Las condiciones, efectos perjudiciales, etc. serán similares.

- Método B

Este método es solo aplicable para aceros con una tensión de rotura inferior a 552MPa.

Se tendrá que determinar el historial de carga pasado y futuro. Con ello determinar el rango de ciclos con máximo rango de presión incluido arranques y paradas, el número de ciclos. Determinar la máxima ΔT^a entre puntos adyacentes y en materiales disimilares en distintos momentos de operación del equipo y sus ciclos significativos correspondientes.

Verificar si el número de ciclos del paso es aceptable. Sino usar otro método o nivel.

- Método C

Método similar al método B, pero usando fatiga en ejes liso (sin detalles/soldadura). A su vez se determinar el rango de tensiones para el rango completo de cargas mecánicas ciclos. No se deberán superar los ciclos definidos por la curva aplicada.

- Método D

Es un método específico usando las curvas de barras que contiene juntas soldadas. Este método está en desarrollo.

Si alguno de los métodos es satisfactorio no se llevara a cabo el análisis a fatiga. Si el número de ciclos es mayor a 10^6 se debe usar nivel 2 o 3.

Si no se pasa los requerimientos del Nivel 1, se podrán realizarlas siguientes opciones o combinaciones de ellas: usar otro nivel de estudio o repara o sustituir el componente.

Dentro del Nivel de evaluación 2 hay tres métodos: Método A (Tensión equivalente), Método B (Deformación equivalente). Método C (Tensión estructural equivalente para soldaduras).

Los métodos A y B usan curvas de barras suaves (sin defectos/soldaduras) y el método C con barras con soldadura.

Adicionalmente, para tener en cuenta el fonómetro de Ratcheting se proponen otros dos métodos: En análisis elástico, para evitarlo, evaluar de manera conservadora y en análisis elasto-plástico, simular la acumulación de deformación plástica.

- Método A

La amplitud de tensión equivalente es suma de la tensión principal más la secundaria más el pico de la amplitud, calculado para cada ciclo. Hay 2 opciones para calcular tensiones: Calcular la amplitud de tensión local de origen térmico o calcular las tensiones de forma separada, con cargas linealizadas Si se supera el rango para evitar ratcheting usar ensayo elástico con factor penalizador.

- Método B

Este método se basa en que el rango de deformación es usado para evaluar la fatiga de ensayo tras elasto-plástico. El análisis se realizará usando un algoritmo de plasticidad cíclica, que tendrá en cuenta el endurecimiento cinemático.

- Metodo C

Para este método se realiza un análisis elástico. Es el método recomendado en la evaluación de soldaduras no esmeriladas o mecanizadas. Las grietas por fatiga, normalmente se localizan en el pie de la soldadura. Crecen en dirección al espesor. La tensión normal al plano de grieta está relacionada con la vida del componente. Si los transitorios térmicos dan como resultado una diferencia de tensión de espesor total en cualquier momento que sea mayor que la diferencia de estado estacionario, el número de ciclos se determinará al menos el número de ciclos para el metal base establecido utilizando el Método A o B, y para la soldadura establecida usando el Método C.

Hay diversas modificaciones del método para adaptarlo mejor a algunos casos. Como la fatiga multiaxial y en función de la calidad de soldadura.

Para el estudio del ratcheting hay diversos métodos:

- Análisis elástico de ratcheting.
- Análisis elasto-plástico simplificado de ratcheting.
- Ratcheting por tensiones térmicas.
- Estudio del ratcheting en análisis elasto-plástico.

Si el componente no cumple los requisitos del Nivel de estudio 2, se aplicara el Nivel 3, se monitorizará el daño a fatiga, se reparará o remplazar el componente.

El Nivel 3 de estudio determina el número de ciclos de vida posibles en un componente con una ecuación de deformaciones multiaxiales.

Los resultados de los análisis elásticos y elasto-plásticos pueden ser usados en combinación con los planos críticos. Si se usa un análisis elástico se puede usar la corrección de Neuber para sacar las deformaciones.

La complejidad del post proceso en el plano crítico se justifica porque se relaciona con los ensayos de fatiga. Son de aplicación varios métodos en este nivel de análisis:

- Método A: Análisis elásticos de tensiones y aproximación del plano crítico.
- Método B: Análisis elasto-plástico de tensiones y aproximación de plano crítico.
- Método C: Análisis a fatiga de otros códigos reconocidos.

3.1.3 Desarrollo de metodología FFS para fluencia (creep)

A temperatura ambiente, si a un acero se le aplica una carga de valor inferior al límite elástico a o la carga de rotura, tendrá una deformación instantánea con un valor determinado que será elástica o parte elástica y parte plástica, respectivamente.

Sin embargo, a partir de cierta temperatura, si sometemos al componente a cierta carga inferior al límite elástico apreciaremos con el paso del tiempo la aparición de una deformación plástica. Este fenómeno se conoce con el nombre de fluencia o creep.

Se define creep (fluencia) como el daño (deformación permanente plástica) acumulado y permanente de un material que ha estado bajo solicitaciones mecánicas y térmicas durante un periodo de tiempo prolongado.

La temperatura a partir de la cual empieza a operar la fluencia es de unos 0.4 veces la temperatura de fusión. En materiales poliméricos puede llegar a producirse a temperatura ambiente

El estudio de este comportamiento tiene especial transcendencia en el diseño de equipos que trabajan a alta temperatura como pueden ser las calderas, equipos de la industria petroquímica, motores de combustión interna, etc.

Este daño se manifiesta externamente en una deformación plástica creciente con el tiempo. El mecanismo de daño en metales es por el movimiento de dislocaciones, el deslizamiento de juntas de grano y procesos de difusión microestructural; mecanismos que se contraponen al endurecimiento por deformación del material, dando lugar a un comportamiento variable con el tiempo en el que en una primera fase predomina el endurecimiento por deformación (ratio de creep decreciente); en una segunda fase los dos mecanismos se igualan (ratio de creep constante) y una tercera fase en la que el daño crece exponencialmente hasta la rotura final (ratio de creep creciente). En ciertos métodos de evaluación, solo se tendrá en cuenta la fase terciaria.

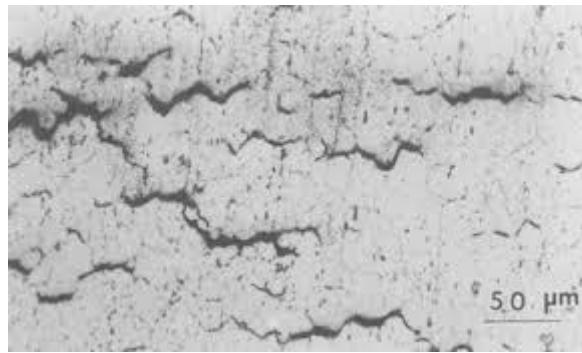


Figura 3. Daño por creep observado en el microscopio

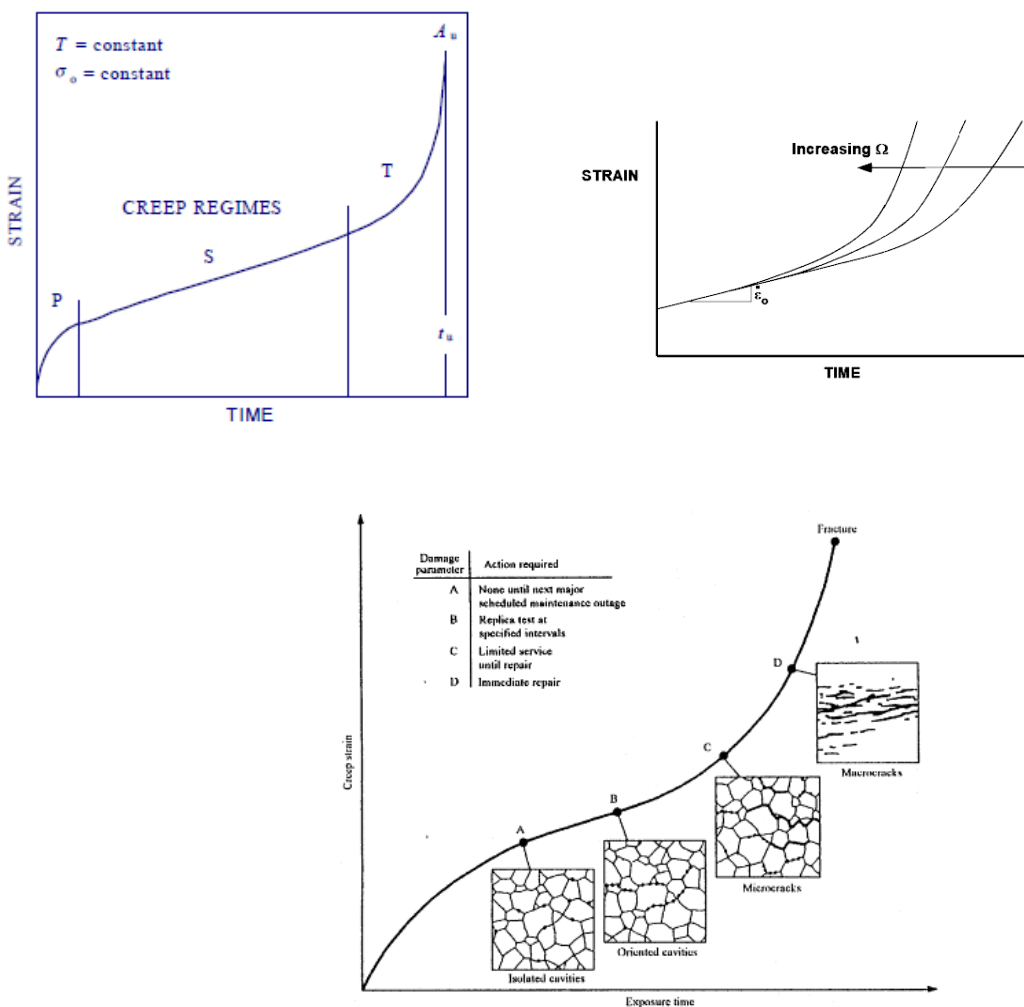


Figura 4. Diagrama de creep completo (fases Primaria, Secundaria y Terciaria), simplificado y defectos característicos para cada zona

En este proyecto se estudió la evaluación del daño por creep en componentes presurizados que trabajan a temperaturas de fluencia. Este tipo de daño o fenómeno que desencadena un fallo se

dará en equipos con altas temperaturas de trabajo como depósitos a presión, calderas, tuberías que transporten líquidos o gases a alta temperatura.

El estudio tiene aplicación cuando ha trabajado o va a trabajar fuera de las condiciones de diseño para situaciones tales como:

- a) Transitorios de trabajo a temperaturas y/o presiones mayores que los de diseño.
- b) Perdida de material por encima de la prevista en el diseño, lo que provoca tensiones mayores de las calculadas en el diseño.
- c) Soldaduras con propiedades distintas en el cordón, ZAT y metal base.
- d) Regiones con concentradores de tensión no evaluados en el diseño.
- e) Daño por fuego de corta duración
- f) El descubrimiento de un defecto tipo grieta.
- g) El descubrimiento de defectos tipo área de bajo espesor, pitting, desalineamiento de soldadura, etc. que puedan generar concentradores de tensión.

Sólo puede realizarse la evaluación para el nivel 1 si se cumple que:

- a) El código de diseño es un código reconocido.
- b) El componente no ha sufrido un daño por fuego o por sobretemperatura que haya generado deformaciones o pedidas de metal significativas.
- c) El material cumple con unos determinados valores mínimos de dureza o contenido de carbono.
- d) El componente no tiene ningún otro tipo de daño evaluables en el resto de partes o anormalidades microestructurales.

El nivel 2 se puede aplicar si se cumple:

- a) El código de diseño es un código reconocido.
- b) Se conoce el historial de condiciones de operación y las condiciones futuras.
- c) El componente ha sufrido menos de 50 ciclos de operación, incluidos arranque y parada o menos de los especificados en el diseño.
- d) El componente no tiene ningún otro tipo de daño evaluables en el resto de partes o anormalidades microestructurales como por ejemplo:
 - Defectos tipo grietas.
 - Pitting.
 - Fragilización por Hidrogeno.

El nivel 1 es un criterio de cribado para el que solo se necesita el diseño original del componente y las condiciones de operación pasadas y futuras. Sin embargo, para los niveles 2 y 3 se requieren una importante cantidad de datos, cuya precisión determinará la exactitud de la evaluación.

Se deberá conocer el histograma de las condiciones de trabajo (presión, temperatura, cargas...) en función del tiempo, en caso de que no sea posible se generará uno aproximado evaluando su precisión o se harán ensayos sobre el material.

Todas las características geométricas e imperfecciones del equipo deben ser anotadas y convenientemente analizadas, incluyendo espesores, defectos, variaciones locales de las condiciones, interacciones con el entorno, tasas de pérdida de espesor, características microestructurales, e información detallada de las soldaduras y su ejecución.

Las técnicas de inspección y caracterización se seleccionarán de forma conveniente al parámetro a determinar.

Se deberá conocer la máxima temperatura de funcionamiento del equipo, así como las presiones y tiempos de funcionamiento y se calcularán las tensiones nominales en las condiciones de servicio pudiendo llegar a tenerse en cuenta reducciones de espesor (ej: corrosión).

Una vez calculado el tiempo máximo admisible de operación. Si este tiempo es mayor que el tiempo pasado y futuro de operación, el componente es aceptable por el nivel 1. Si no lo es, queda otra opción de evaluación por el nivel 1 se debe obtener el "ratio de daño" en la "curva de daño". Si el daño total no supera un determinado valor el componente es aceptable por el nivel 1, en caso contrario se deberá reparar, sustituir o ajustar las condiciones de servicio. También se podrían realizar estudios de nivel 2 o 3.

Para el caso del nivel 2 de operación se generará el histograma de condiciones de operación, manteniendo la secuencia temporal real y se determinarán: las tensiones nominales (comprobando que no haya riesgo de colapso plástico), las tensiones principales, la tensión efectiva, el tiempo de vida remanente, el tiempo de rotura de cada intervalo.

Una vez calculada la vida a creep para cada condición se obtendrá el daño acumulado total. Si no se cumplen las especificaciones se podrá calcular con el nivel 3 de evaluación.

El nivel 3 de evaluación debe ser utilizado cuando los estudios de nivel 2 o 3 no pueden ser aplicados. Algunas situaciones que hagan necesitar el nivel 3 son: geometrías complicadas que necesiten un avanzado análisis de tensiones, componentes sujetos a ciclos, que el componente contenga defectos (menos tipo grieta que tienen su propio procedimiento). Para el cálculo de tensiones se podrán calcular por simulación, donde se tendrá que incluir las imperfecciones que pueda tener como son los defectos volumétricos. Estas tensiones podrán usarse directamente en las evaluaciones.

Si no se cumplen los requisitos del nivel se deberá proceder a:

- a) Retirar, sustituir , recalificar o reparar el componente.
- b) Modificar las condiciones de operación para que el daño acumulado se menor que el daño limite.

Para el caso de creep en componentes agrietados se calculará el factor intensidad de tensiones K_{Ic} para la temperatura de estudio.

En el caso de que se combinen los fenómenos de creep-fatiga, se evaluarán los fenómenos de manera independiente.

Si hay operaciones cíclicas en la operación, se deberá estudiar los efectos de combinar creep y fatiga.

3.1.4 Desarrollo de metodologías FFS para evaluación mediante análisis de tensiones

El análisis de tensiones comienza con el estudio de las ecuaciones de resistencia de materiales para despejar las tensiones, deformaciones que aparecen en un componente al introducirle fuerzas. EL cálculo tradicional empezó a verse comprometido al verse que aparecían concentradores de tensiones debido a discontinuidades geométricas o de material que pueda tener el componente, y las geometrías complejas (sin posibilidad de asemejarlo a barras o chapas.

Las reglas de diseño por análisis están basadas en el empleo de los resultados obtenidos mediante análisis de tensiones detallados. Mediante esta técnica se puede evaluar el comportamiento del equipo frente a colapso plástico, fallo local, pandeo y cargas cíclicas. Dependiendo de la condición de carga, puede ser necesario un análisis térmico para determinar la distribución de temperaturas así como las tensiones de origen térmico resultantes.

Los procedimientos desarrollados para la realización de estos análisis asisten en la definición de los casos de carga, la selección de las propiedades del material, el post proceso de los resultados y establecen los criterios de aceptación requeridos para garantizar un correcto comportamiento del componente objeto de estudio.

Se enumeran a continuación los diferentes métodos desarrollados para cada una de las evaluaciones necesarias:

- Protección frente a colapso plástico

Método elástico de análisis de tensiones.

Las tensiones son calculadas empleando un análisis elástico, clasificando las tensiones en categorías y limitándolas a los valores de tensión máximos permitidos. El comportamiento de un componente es aceptable cuando las tensiones equivalentes no exceden las tensiones máximas admisibles establecidas.

Se determinarán los tipos de cargas actuantes sobre el componente, el tensor de tensiones en el punto a evaluar, la suma de los tensores de tensiones asignados a cada categoría y se analizarán los resultados.

- Método de carga límite. Determina el límite inferior de carga de un componente.

La carga límite se obtiene de un análisis numérico, como por ejemplo el método de los elementos finitos, empleando un modelo de material elástico perfectamente plástico y la teoría de las pequeñas deformaciones. Finalmente se realiza un análisis de carga límite para cada una de las combinaciones de carga definidas en el paso anterior. Si se consigue la convergencia, el equipo es estable para la combinación de carga analizada.

- Método elasto-plástico de análisis de tensiones. La carga de colapso derivada de este análisis considera tanto las cargas aplicadas como la deformación del componente.

La carga de colapso plástico se obtiene de un análisis numérico, como por ejemplo el método de los elementos finitos, empleando un modelo de material elasto-plástico considerando los efectos geométricos no lineales. Si se logra la convergencia, el componente es estable para la combinación de carga analizada. En caso contrario, la configuración del componente (por ejemplo su espesor) deberá ser modificada o las cargas deberán ser reducidas y el análisis repetido.

- Protección frente a fallo local

- Método elástico. Límite del estado triaxial de tensiones.

El método elástico, o límite de tensiones triaxiales, establece que la suma algebraica de las tensiones principales linealizadas correspondientes a la combinación de carga de peso propio más presión interior deberá ser menor que cuatro veces la tensión admisible establecida.

- Método elasto-plástico. Límite de la deformación local.

- Protección frente a pandeo.

Se debe cumplir con un factor de diseño, función del tipo de análisis de pandeo a realizar, para garantizar que los componentes sometidos a un estado de tensiones de compresión no fallen por pandeo. Dicho factor de diseño deberá ser el mínimo valor obtenido.

Especial atención hay que prestar a los análisis de pandeo numéricos, como por ejemplo mediante el método de los elementos finitos, para garantizar que todos los posibles modos de pandeo están siendo considerados (simétricos y no simétricos).

- Tipo 1. Análisis de bifurcación. Análisis elástico sin no linealidades geométricas.

- Tipo 2. Análisis de bifurcación. Análisis elasto-plástico considerando los efectos de las no linealidades geométricas.
- Tipo 3. Análisis de colapso considerando explícitamente las imperfecciones geométricas y un modelo de material elasto-plástico.
- Protección frente a cargas cíclicas
 - Similares a los descritos en los niveles 1 y 2 del procedimiento del daño por fatiga.

3.2 DESARROLLO DE RUTAS DE EVALUACIÓN BASADAS EN EL FFS-INTEGRIDAD SUPERFICIAL Y CORROSIÓN

3.2.1 Desarrollo de metodología FFS para pérdida de espesor generalizada

Esta tarea se ejecutó íntegramente en 2016. La metodología está basada en la norma API 579:2016. En la toma de datos de espesor durante la inspección del equipo pueden darse dos situaciones:

- Que no exista diferencia significativa entre los valores medidos, es decir, que el coeficiente de variación sea inferior al 10%, en cuyo caso se emplearán medidas puntuales para la evaluación FFS
- Que exista diferencia significativa entre los valores medidos, es decir, que el coeficiente de variación sea superior al 10%, en cuyo caso se emplearán perfiles de espesor crítico para la evaluación FFS.

Estas metodologías son aplicables en equipos que hayan estado trabajando por debajo de la temperatura de fluencia (específica de cada material).

Para la evaluación de Nivel 1 de los componentes se requiere determinar el espesor nominal en la zona de pérdida de espesor, para lo cual debe considerarse la tolerancia para la corrosión futura (es decir, la pérdida de espesor asumible en el futuro) y el diámetro interno de los equipos o tuberías. El equipo dañado tiene que tener un espesor suficiente para soportar la presión de diseño, o bien debe disminuirse la presión de trabajo para que pueda seguir en operación de manera segura. El Nivel 2 considera, además, las cargas suplementarias que afectan a la integridad del equipo (debidas a expansiones térmicas, al viento y a los terremotos, entre otras). En este caso, el cálculo del espesor suplementario para cargas mecánicas incluye los factores de peso del equipo y sus anclajes y el momento de flexión de cargas de viento o terremotos.

El Nivel 3 requiere la geometría exacta del componente, las propiedades del material y las condiciones de carga. Los datos de espesor se pueden usar directamente en un modelo de elementos finitos del componente. En todos los casos debe procederse según lo descrito en el código ASME VIII Div.2.

Se aportan dos métodos para la evaluación de la vida remanente de un equipo o componente cuya evaluación FFS ha permitido determinar su continuidad en servicio. Estos son el método del espesor (relación entre el espesor y la velocidad de corrosión) y el método de la máxima presión de trabajo admisible (determinar la presión máxima admisible para asegurar que no se supera la presión de diseño durante la operación, para lo que se considera la tolerancia de la corrosión efectiva).

En los casos en los que no se pueda predecir la velocidad de degradación de los componentes, podrán aplicarse cuatro métodos de corrección: cambios físicos en el flujo del proceso, aplicación de recubrimientos barrera, inyección de agua o productos químicos para modificar el medio o la superficie, aplicación de recargue para reparar del daño o proporcionar un revestimiento resistente a la corrosión). Por último, la efectividad de los métodos de corrección se podrá comprobar mediante métodos de monitorización, como por ejemplo sondas de corrosión, de hidrógeno, testigos de corrosión o examen radiográfico.

3.2.2 Desarrollo de metodología FFS para pérdida de espesor localizada

La metodología FFS para la pérdida de espesor localizada está basada en la norma API 579:2016 y se desarrolló íntegramente en el primer trimestre de 2017.

Existen dos tipos de fallos que pueden ser clasificados como pérdida localizada de metal (en base a las proporciones entre longitud, anchura y profundidad del fallo):

- Área local delgada, LTA
- Fallo en forma de ranura
 - Ranura (causado por erosión)
 - Muesca (causado por eliminación mecánica)

Estas metodologías son aplicables en equipos que hayan estado trabajando por debajo de la temperatura de fluencia (específica de cada material).

El Nivel 1 de evaluación considera el espesor remanente en la zona de daño y en los puntos del equipo que no presentan daño, de tal manera que la evaluación resultará satisfactoria si la diferencia entre el espesor mínimo medido y el sobreespesor considerado para la corrosión futura es superior a 2.5 mm para recipientes y tanques, y superior a 1.3 mm para tuberías.

Para la evaluación de Nivel 2 se incluyen los momentos de fuerza y los espesores en la dirección longitudinal, circunferencial y los requeridos para cargas suplementarias.

El Nivel 3 aplica a geometrías complicadas y se realiza mediante simulación con elementos finitos. Para ello se requieren no solo datos del espesor, sino de la geometría del componente, propiedades del material y condiciones de carga. En todos los casos debe procederse según lo descrito en el código ASME VIII Div.2.

Para los casos en los que no se cumplan los criterios de aceptación de cada nivel de evaluación, basados en la relación entre los mínimos espesores medidos en zonas sanas y los espesores remanentes en las zonas que presentan fallo, se aporta el criterio de la presión de trabajo del equipo. Se han incluido dos métodos de determinación de vida remanente de los equipos que presentan pérdida localizada de metal y se permite su continuidad: método del espesor (que considera el espesor medido y la velocidad de modificación del daño en base a registros de inspecciones previas) y el método de la máxima presión de trabajo permitida (el tiempo de vida del equipo será el transcurrido hasta que la presión de trabajo alcance la presión reducida a la cual el componente que presenta fallo puede seguir operando) y cuatro métodos de corrección, que se aplican cuando las velocidades de degradación de los componentes son difíciles de predecir, o no se puede tolerar ningún grado de degradación. Estos métodos incluyen cambios físicos en el flujo del proceso, aplicación de recubrimientos barrera, inyección de agua y/o productos químicos para modificar el medio o la superficie metálica y aplicación de recargue por soldadura para reparar el daño o proporcionar un revestimiento resistente a la corrosión.

3.2.3 Desarrollo de metodología FFS para pitting

La metodología de evaluación FFS para equipos que presentan corrosión por picaduras (pitting) está basada en la norma API 579:2016 y se desarrolló íntegramente en la anualidad 2017.

El pitting se define como zonas de pérdida localizada de metal (picaduras) que se caracterizan por tener un diámetro del orden del espesor de la chapa o inferior, y una profundidad menor que el espesor de la chapa. Los procedimientos de evaluación cubren tanto el pitting disperso como el localizado en componentes que contengan (o no) una pérdida localizada de metal.

A lo largo de la evaluación FFS de este tipo de daño se contemplan distintos escenarios: que el pitting afecte a la superficie interna del equipo, a la externa, a ambas, e incluso que el deterioro del metal siga avanzando (es decir, que el mecanismo de corrosión no se haya detenido el en momento de la evaluación). Además, atendiendo a la densidad del pitting, se clasificó en 4 tipos:

- Pitting tipo 1: pitting disperso
- Pitting tipo 2: pitting localizado
- Pitting tipo 3: pitting en una LTA
- Pitting tipo 4: LTA en una zona de pitting disperso

Para realizar la evaluación de Nivel 1 tan solo se requiere una estimación de la máxima profundidad de picadura (debería incluirse una fotografía con una escala de referencia) para determinar el factor de resistencia remanente, que se obtiene con los patrones de pitting que incluye la norma API 579.

El Nivel 2 evalúa pares de picaduras en las direcciones longitudinal y circunferencial (la evaluación se basa en los ligamentos sólidos remanentes entre las picaduras), por lo que requiere las dimensiones de cada picadura, las distancias entre centros y la orientación de cada una respecto a la otra.

El Nivel 3 utiliza el método de elementos finitos para evaluar este daño. Para ello, deben considerarse dos alternativas: el modelado directo utilizando un modelo de elementos finitos tridimensional (podría no ser práctico en base a la densidad de picaduras) y la estimación de la rigidez de la chapa que contiene picaduras usando constantes plásticas efectivas o desarrollando un espesor equivalente (proporcionado por el código ASME Sección VIII, División 1, Parte UHX).

La vida remanente del equipo se determina mediante el método de la máxima presión de trabajo permitida; en los casos en los que no se puede hacer una estimación de las velocidades de propagación del pitting, deben usarse los métodos de corrección incluidos en la metodología (cambios físicos en el flujo del proceso, aplicación de recubrimientos barrera para mantener aislado del medio el metal base que ha sufrido daño previamente, inyección de agua y/o productos químicos en dosis continua para modificar el medio o la superficie metálica, aplicación de un recargue). Por último, se recomienda usar técnicas de ultrasonidos para monitorizar la corrosión, corroborando así la aptitud del método de corrección seleccionado para cada caso.

3.2.4 Desarrollo de metodología FFS para análisis de ampollas y daño por hidrógeno asociado a HIC y SOHIC

La metodología FFS para todos los tipos de daño generados por el hidrógeno (ampollas, HIC, SOHIC) está basada en la norma API 579:2016 y se ejecutó íntegramente en 2017.

La fragilización por hidrógeno (HIC) es un agrietamiento laminar con cierta unión entre grietas a lo largo del espesor.

En el caso de la fragilización por hidrógeno orientada por las tensiones (SOHIC), las grietas se alinean casi perpendicularmente a la tensión.

El ampollamiento se caracteriza por un abultamiento en la superficie del equipo debido a la acumulación de acero.

Para realizar las evaluaciones se requiere el mínimo espesor remanente de metal no dañado, las dimensiones del daño y la distancia respecto a las discontinuidades estructurales más cercanas al daño. La presencia de varios defectos en el material podría dar lugar a una evaluación de tipo pérdida localizada de metal. En el caso de las ampollas, también se tiene en cuenta la posible presencia de grietas asociadas a las propias ampollas y si existe venteo de las mismas.

Según la norma API 579, la aceptación del daño según el Nivel 1 dependerá de la relación entre la distancia del defecto hasta la discontinuidad estructural y el espesor remanente del equipo o componente. El Nivel 2 considera el factor de resistencia remanente y la máxima presión de trabajo permitida. El Nivel 3 se apoya en los cálculos mediante elementos finitos para evaluar la capacidad del equipo o componente que presenta el daño de soportar la carga.

No se puede establecer un método estándar para evaluar la vida remanente de equipos que contienen HIC y SOHIC por la imposibilidad de predecir la velocidad del agrietamiento que generan. Por ello se requiere monitorización periódica de la carga de hidrógeno mediante sondas especiales. En cuanto a las ampollas, a pesar de que su crecimiento tampoco se pueda determinar mediante técnicas analíticas, no tienen un efecto directo sobre el intervalo de inspección interna requerido para la monitorización en servicio, por lo que no se requiere una evaluación de vida remanente.

Se han contemplado cinco métodos de corrección para los casos en los que se requiera ajustar la tolerancia para la corrosión futura: eliminación de la carga de hidrógeno, control de la carga de hidrógeno, venteo de las ampollas, amolado, y reparación y remplazo de material dañado. Las recomendaciones relativas a la monitorización en servicio se basan en técnicas de ultrasonidos.

3.2.5 Daño por fuego

La metodología evaluación FFS de componentes que presentan daño por fuego está basada en la norma API 579:2016 y se ejecutó íntegramente en la anualidad 2017.

La metodología de evaluación aplica a los efectos que el fuego puede tener sobre la resistencia a la corrosión de los materiales; adicionalmente, se recomienda realizar comprobaciones dimensionales y ensayos de tracción para asegurar la integridad estructural de los equipos con respecto a sus propiedades mecánicas.

Los requisitos de datos para la evaluación de componentes afectados por este tipo de fallo no se limitan a las dimensiones de las zonas afectadas por el fuego, sino que además es necesario recopilar la siguiente información adicional:

- Evidencias del daño por fuego (temperaturas, combustibles, ubicación de la fuente de ignición, tiempo de exposición, etc).
- Zonas de exposición al calor (en base a la temperatura y a la posible exposición a humo y agua)
- Degradación asociada a la exposición al calor (sensibilización del acero, corrosión por metales líquidos o agrietamiento, oxidación con pérdida de espesor, daño de recubrimientos, etc.)
- Datos y medidas (dureza, espesor, microestructura, condición superficial del equipo o componente).

Cuando el daño por fuego da lugar a fallos como pérdida general o localizada de espesor y/o ampollas, estos deberán ser tratados como se indica en los anteriores apartados 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.4. El cálculo de la vida remanente de los equipos, los métodos de corrección y la monitorización en servicio se realiza igualmente según el procedimiento del tipo de fallo que aplique.

3.3 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA FFS

En este hito se ha llevado a cabo la validación de la metodología desarrollada en los puntos anteriores mediante varios casos prácticos, los cuales se han definido de manera que cada uno de ellos tenga la complejidad necesaria para que se validen el mayor número posible de puntos de la metodología desarrollada en cada caso.

De esta manera, se realizaron todos los casos prácticos necesarios para evaluar la adecuación las metodologías desarrolladas en los apartados anteriores. A continuación se detalla la aplicación de las metodologías más comúnmente empleadas en la industria petroquímica para los análisis de Fitness For Service de los modos de fallo por fatiga, fractura, fluencia, análisis de tensiones, pérdida general de metal, pérdida localizada de metal, pitting y daño por hidrógeno (en concreto, ampollas). El caso de daño por fuego fue descartado por no disponer de ningún caso en el que se pudiera realizar la inspección y recopilación de la información necesaria

- Fatiga:
 - Nivel 1. Método de evaluación sin necesidad de determinar el nivel de tensiones del componente (conservador).
 - Nivel 2. Método de cálculo de la vida a fatiga remanente a partir del nivel de tensiones del componente. En este caso, dada la complejidad geométrica de la zona a analizar fue necesario realizar un análisis por el método de los elementos finitos del equipo para determinar el nivel de tensiones del mismo.
- Fractura frágil:
 - Nivel 1. Determinar la temperatura mínima admisible en función de la calidad del material.
 - Nivel 2. Determinar la temperatura mínima admisible en función de la calidad del material y del nivel tensional del componente. En este caso, dado que se trata de analizar la envolvente de un equipo a presión esférico, el nivel tensional pudo ser determinado de forma analítica.

- Fluencia:
 - Nivel 1. Calcular el daño acumulado en función de la calidad del material y el nivel tensional de la tubería. Dada la simplicidad geométrica del componente a analizar (tubería cilíndrica), no es necesario realizar un análisis por elementos finitos para calcular el nivel tensional sino que es posible determinarlo mediante expresiones analíticas.
 - Nivel 2. Se calcula el daño acumulado empleando el método Omega del código teniendo en cuenta, además de la calidad del material, un análisis de tensiones más detallado en el que se realiza una clasificación de tensiones.
- Análisis de tensiones. Cálculo detallado de un equipo vertical a presión cilíndrico mediante el método de los elementos finitos siguiendo la metodología desarrollada a partir del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 para los siguientes modos de fallo:
 - Protección contra colapso plástico.
 - Protección contra fallo local.
 - Protección contra colapso por pandeo.
- Pérdida generalizada de metal. Este es uno de los tipos de fallos más frecuentes y se considera oportuno estudiar dos casos, uno en base a medidas puntuales de espesor y otro mediante la realización de perfiles de espesor crítico (CTP).
 - Determinación de la continuidad en servicio de una envolvente cilíndrica de un intercambiador de calor, siendo necesario aplicar los niveles de evaluación 1 y 2, además de la evaluación del equipo en condición de vacío, a partir de medidas puntuales de espesor.
 - Determinación de la continuidad en servicio de un recipiente a presión con soldadura longitudinal que presenta corrosión interna. Se aplican los niveles 1 y 2, a partir de perfil de espesor crítico.
- Pérdida localizada de metal
 - Determinación de la continuidad en servicio de un recipiente a presión que contiene un fallo tipo ranura.
- Pitting: determinación de la continuidad en servicio de un equipo a presión en cuya superficie interna se ha detectado pitting disperso, a la MAWP y la temperatura de operación en el momento de la inspección.
- Daño por hidrógeno: determinación de la continuidad en servicio de una tubería que contiene ampollas en sus superficies interior y exterior, aplicando los niveles de evaluación 1 y 2.

3.3.1 FATIGA

La evaluación a fatiga deberá ser realizada si un componente está sometido a operación cíclica.

3.3.1.1 Nivel 1. Método C

Evaluar la vida a fatiga del fondo superior y de las regiones de metal base de la envolvente del siguiente equipo a presión, ver Figuras 5 y 6, de acuerdo al Método C del Nivel 1 de la norma API 579-1/ASME FFS-1 2016.

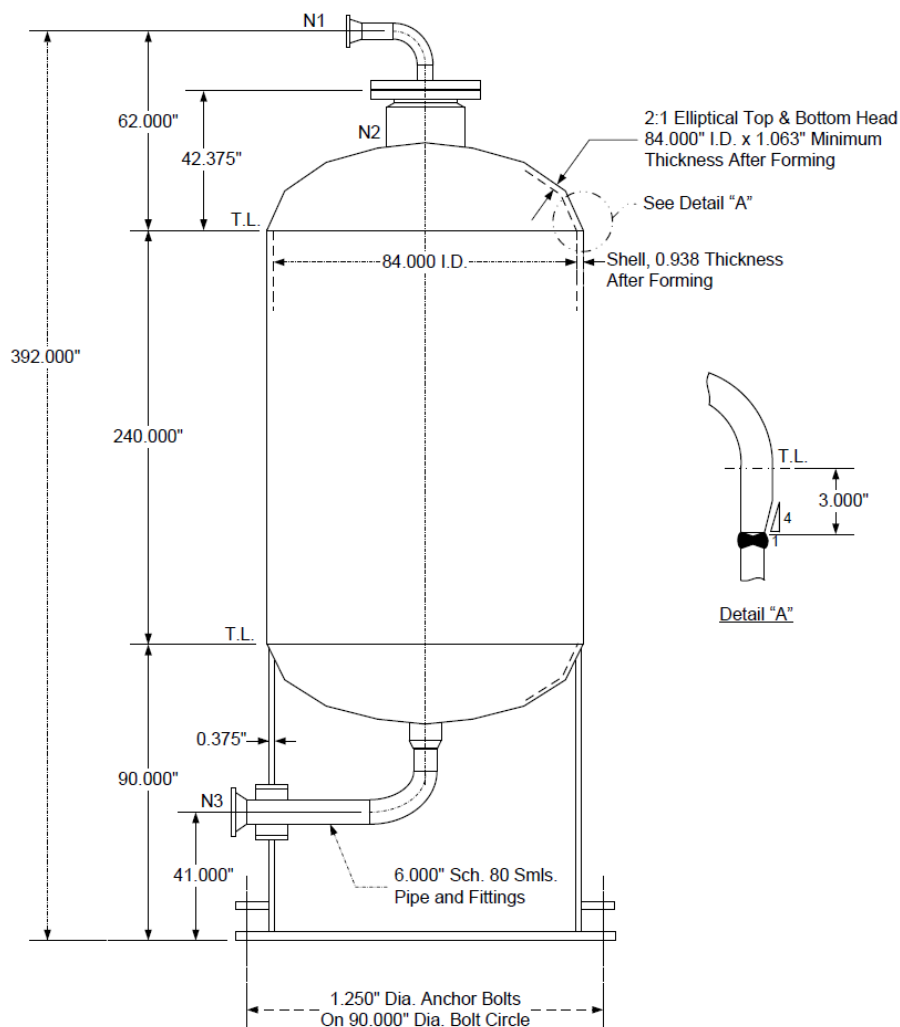


Figura 5. Configuración del equipo a presión.

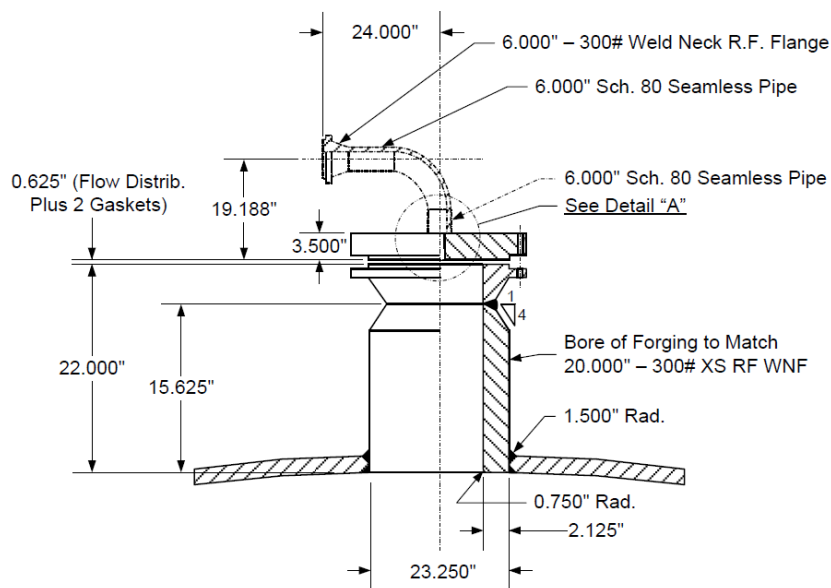


Figura 6. Geometría de la tubuladura de entrada superior.

Las características y requisitos de carga cíclica establecidos en la especificación de diseño del usuario son los siguientes:

- Material – envoltante y fondos = SA-516 Gr. 70 Normalizado
- Material – forjas = SA-105
- Presión de operación = 380 psig a 125 °F
- Margen de corrosión = 0.125 inches
- Vida requerida = 20000 ciclos completos de presión
- Número de paradas/arranques = 20

La soldadura de la tubuladura al fondo está mecanizada y sometida a un examen volumétrico completo, recibiendo tanto las superficies interiores (ID) como exteriores (OD) un examen visual (VT) y mediante partículas magnéticas (MT) o líquidos penetrantes (PT). La soldadura de la envoltante al fondo está tal y como quedó tras la soldadura (*as-welded*), su superficie exterior recibió la misma inspección que la soldadura de la tubuladura al fondo, mientras que a la superficie interior solo se le practicó el examen volumétrico completo.

a) PASO 1 – Determinar el histograma de cargas del equipo.

Por la especificación de diseño del usuario, un ciclo completo de presión interna es el único evento que debe ser considerado. La presión interna del equipo varía entre 0 psig y la presión de operación, 380 psig un total de 20000 ciclos a una temperatura constante de 125 °F.

- b) PASO 2 – Determinar los factores de evaluación de fatiga, C_1 y C_2 .

De acuerdo a la Tabla 14.3 del código API 579-1/ASME FFS-1, los factores aplicables para este cálculo son determinados para un recipiente de construcción integral. Dado que no hay tubuladuras ni ningún accesorio unido al equipo en la zona de la calota del fondo, los factores son:

$$C_1 = 3$$

$$C_2 = 2$$

- c) PASO 3 – Determinar el número de ciclos de presión totales, $N_{\Delta FP}$, y comprobar el criterio inicial de evaluación.

$N_{\Delta FP}$ = Número total de ciclos de presión + número de paradas

$$N_{\Delta FP} = 20000 + 20 = 20020 \text{ ciclos}$$

Para comprobar el criterio inicial de evaluación, $N_{\Delta FP} \leq N_a^{SC_1}$, el número de ciclos permitidos para un rango de presión igual a SC_1 debe ser obtenido de la curva de fatiga correspondiente del Anexo 14B del código API 579-1/ASME FFS-1, donde S es la tensión admisible a la temperatura de diseño y C_1 el valor determinado en el paso anterior. Basado en esta ecuación, el criterio de evaluación será más restrictivo para el material del fondo y la envolvente dado que una mayor tensión admisible implicará un menor número de ciclos admisibles. De todas formas, se incluyen los cálculos para los dos materiales.

El número de ciclos admisibles para cada componente se determina según el Anexo 14B del código API 579-1/ASME FFS-1. Para los materiales de fabricación de este equipo, la curva de fatiga a seleccionar es la de una probeta sin entalla de acero al carbono con una temperatura del ciclo menor de 700 °F y una resistencia última a tracción, σ_{uts} , menor de 80 ksi:

$$N = (10)^X$$

$$X = -4706.5245 + 1813.6228Y + 6785.5644/Y - 368.12404Y^2 -$$

$$-5133.7345/Y^2 + 30.708204Y^3 + 1596.1916/Y^3$$

$$Y = \log_{10}\left(28.3E3\left(\frac{S_a}{E_T}\right)\right)$$

Siendo,

E_T = el módulo de elasticidad del material a la temperatura del ciclo.

S_a = la amplitud de la tensión, igual a SC_1 para el criterio de evaluación de fatiga.

El número de ciclos admisibles calculado para cada material del equipo se resume en la siguiente tabla:

Tabla 1. Número de ciclos permitidos, $N(SC_1)$

Componente	Material	E_T (ksi)	S (ksi)	$S_a = SC_1$ (ksi)	X	$N(SC_1)$
Tubuladura	SA-105	29100	23.30	69.90	3.234	1713
Fondo/Envolvente	SA-516-70N	28780	24.55	73.65	3.156	1431

Dado que 20020 ciclos no es menor que 1431 ciclos, el criterio de evaluación de fatiga no se cumple y, por lo tanto, es necesario llevar a cabo un análisis a fatiga más detallado del equipo. Los siguientes pasos del método de evaluación de nivel 1 fijados por el código no necesitan ser evaluados.

3.3.1.2 Nivel 2. Método A

Evaluar la vida a fatiga del fondo superior y de las regiones de metal base de la envolvente del equipo a presión del apartado anterior, ver Figuras 1 y 2, de acuerdo al Método A del Nivel 2 de la norma API 579-1/ASME FFS-1 2016.

- a) PASO 1 – Determinar el histograma de cargas del equipo.

Por la especificación de diseño del usuario, un ciclo completo de presión interna es el único evento que debe ser considerado. La presión interna del equipo varía entre 0 psig y la presión de operación, 380 psig.

- b) PASO 2 – Realizar un análisis elástico de tensiones del equipo basado en el histograma de cargas del paso anterior.

Modelo de elementos finitos:

Se generó un modelo axil-simétrico a partir de la geometría de las Figuras 1 y 2 descontando el espesor de corrosión indicado al que se le aplicó una presión interior de 380 psig y un empuje equivalente sobre la tubuladura.

Resultados del análisis elástico:

En la Figura 7 se pueden ver las localizaciones donde el rango de tensiones equivalente del equipo es mayor.

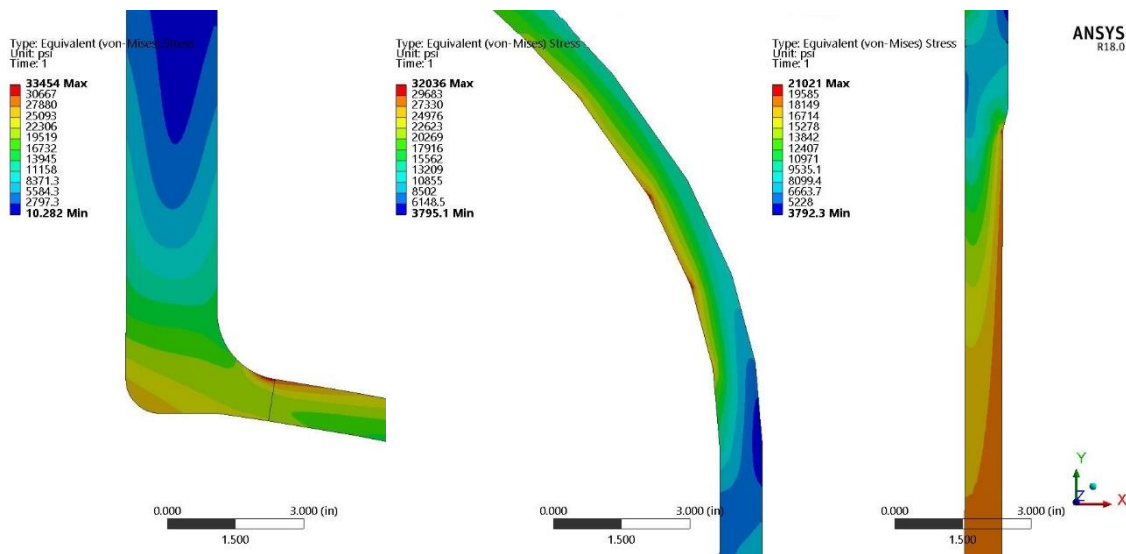


Figura 7. Rango de tensiones equivalentes (presión interior de 380 psig).

- c) PASO 3 – Determinar los rangos de tensiones cíclicas en las localizaciones consideradas en el paso anterior y el método de conteo de ciclos del Anexo 14C del código API 579-1/ASME FFS-1 2016.

M = Número total de ciclos de presión + número de paradas

$$M = 20000 + 20 = 20020 \text{ ciclos}$$

- d) PASO 4 – Determinar el rango de tensiones equivalentes para el ciclo determinado en el paso anterior.

- 1) PASO 4.1 – Obtener el tensor de tensiones al principio y al final de cada uno de los ciclos definidos en el PASO 3, ${}^m\sigma_{ij,k}$ y ${}^n\sigma_{ij,k}$.

$$\Delta\sigma_{ij,k} = {}^m\sigma_{ij,k} - {}^n\sigma_{ij,k}$$

- 2) PASO 4.2 – Calcular el rango de tensión primaria más secundaria más pico equivalente para cada uno de los ciclos definidos.

Al no haber cargas térmicas, $\Delta\sigma_{ij,k}^{LT}=0$ y $\Delta S_{LT,k}=0$. Así, las ecuaciones para determinar los componentes del rango de tensiones y el rango de tensiones equivalente se reducen a la forma siguiente la Opción 1 del Apartado 14.4.3.2.2 del código. Además, dado que el punto de inicio en el ciclo de carga es la presión interna de 0 psig, la tensión inicial, ${}^m\sigma_{ij,k}$ es 0, y la

ecuación de los componentes del rango de tensiones se reduce a $\Delta\sigma_{ij,k} = -^m\sigma_{ij,k}$, y el rango de tensiones equivalente es:

$$\Delta S_{P,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\Delta\sigma_{11,k} - \Delta\sigma_{22,k})^2 + (\Delta\sigma_{11,k} - \Delta\sigma_{33,k})^2 + (\Delta\sigma_{22,k} - \Delta\sigma_{33,k})^2 + 6(\Delta\sigma_{12,k}^2 + \Delta\sigma_{13,k}^2 + \Delta\sigma_{23,k}^2) \right]^{0.5}$$

La ecuación anterior es la tensión equivalente de von Mises en el punto final del ciclo.

- 3) PASO 4.3 – Determinar la amplitud efectiva equivalente de las tensiones para los ciclos definidos.

$$S_{alt,k} = \frac{K_{e,k} \cdot \Delta S_{P,k}}{2}$$

Para determinar factor reductor de fatiga, $K_{e,k}$, deben ser calculados en primer lugar S_{PS} y $\Delta S_{n,k}$ empleando el método descrito en el Apartado 14.4.3.2.2 del código, donde $\Delta S_{n,k}$ es el rango de tensiones equivalentes de las tensiones linearizadas primaria de membrana, primaria de flexión y secundarias ($P_L + P_B + Q$) para cada localización objeto de evaluación. Las líneas de clasificación de tensiones (SCL) se muestran en la Figura 8. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

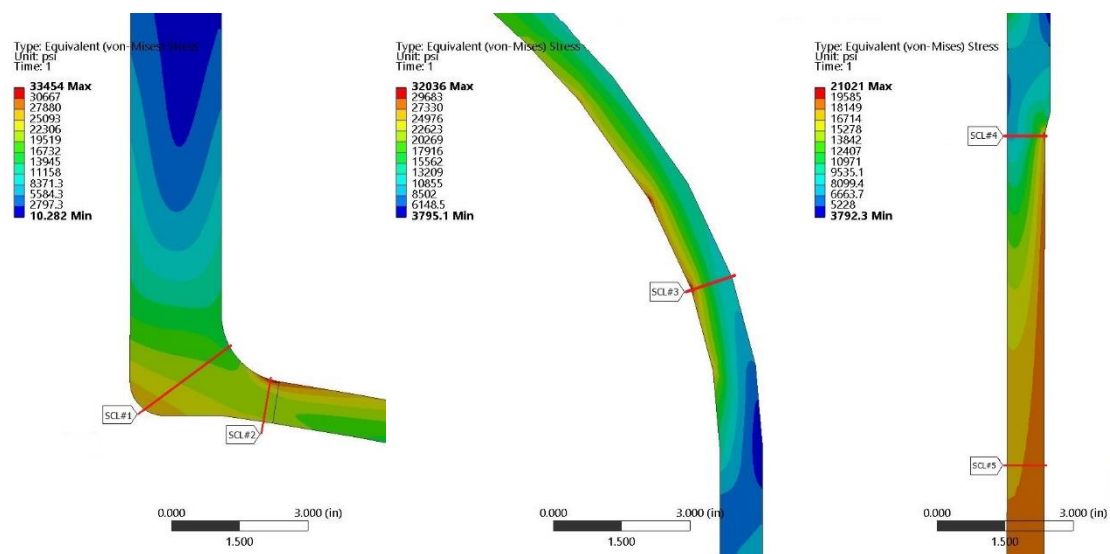


Figura 8. Líneas de clasificación de tensiones.

Tabla 2. Valores calculados para el rango de tensiones equivalentes primarias más secundarias.

Componente	SCL	Localización	$\Delta S_{n,k}$		
			PTB-3 (ksi)	ANSYS (ksi)	Ratio (%)
Tubuladura	1	Anillo tubuladura en la esquina interior del radio	27.060	27.364	1.1
Tubuladura	2	Transición de la tubuladura en el radio de acuerdo exterior	29.877	29.087	-2.6
Fondo	3	Calota (interior)	26.821	27.579	2.8
Envolvente	4	Soldadura fondo-envolvente (interior)	7.637	7.826	2.5
Envolvente	4	Soldadura fondo-envolvente (exterior)	17.193	16.589	-3.5
Envolvente	5	Metal base	19.938	18.965	-4.9

S_{PS} es el máximo de $[3S, 2S_y]$, donde S es la tensión admisible del material a la temperatura del ciclo y S_y es el límite elástico del material a la temperatura del ciclo (125 °F). La Tabla 3 resume los valores de S_{PS} para cada componente.

Tabla 3. Valores calculados de S_{PS} .

Componente	S (ksi)	S_y (ksi)	S_{PS} (ksi)
Tubuladura	23.30	34.90	69.90
Fondo	24.55	36.85	73.70
Envolvente	24.55	36.85	73.70

Comparando $\Delta S_{n,k}$ con S_{PS} se verifica que $\Delta S_{n,k} \leq S_{PS}$ en cualquier caso y, por tanto, $K_{e,k} = 1.0$ para todos ellos. La tensión alternante efectiva puede entonces ser calculada para cada componente, cuyos valores se resumen en la Tabla 4.

Dado que las soldaduras no son modeladas en detalle en el modelo de elementos finitos, se deberá incluir un factor reductor de la resistencia a fatiga, K_f , según la siguiente ecuación que afectará a todos los componentes del tensor de tensiones de membrana más flexión linearizadas. Los valores recomendados de K_f están proporcionados en las Tablas 14.5 y 14.6 del código. For the machined nozzle to head weld a K_f of 1.0 is applicable. Para la soldadura

del fondo a la envolvente en condición *as-welded*, los valores de K_f de 3.0 and 1.2 son aplicables para las superficies interiores y exteriores respectivamente.

$$\Delta\sigma_{ij,k} = K_f \left({}^m\sigma_{ij,k}^{MB} - {}^n\sigma_{ij,k}^{MB} \right)$$

Tabla 4. Tensión alterante equivalente efectiva $S_{alt,k}$.

Componente	Localización	K_f	$K_{e,k}$	$\Delta S_{p,k}$ (ksi)	$S_{alt,k}$ (ksi)
Tubuladura	Anillo tubuladura en la esquina interior del radio	1.0	1.0	27.863	13.932
Tubuladura	Transición de la tubuladura en el radio de acuerdo exterior	1.0	1.0	33.454	16.727
Fondo	Calota (interior)	1.0	1.0	31.265	15.633
Envolvente	Soldadura fondo-envolvente (interior)	3.0	1.0	7.7201	11.580
Envolvente	Soldadura fondo-envolvente (exterior)	1.2	1.0	21.021	12.613
Envolvente	Metal base	1.0	1.0	18.961	9.481

- 4) PASO 4.4 – No necesario ya que $K_{e,k} = 1.0$.
- 5) PASO 4.5 – Determinar el número de ciclos admisibles, N_k , para tensión alternante equivalente calculada en el PASO 4.3 utilizando una curva a fatiga de los materiales de construcción proporcionada en el Anexo 14B del código.

Para los materiales de fabricación de este equipo, la curva de fatiga a seleccionar es la de una probeta sin entalla de acero al carbono con una temperatura del ciclo menor de 700 °F y una resistencia última a tracción, σ_{uts} , menor de 80 ksi:

$$N = (10)^X$$

$$X = -4706.5245 + 1813.6228Y + 6785.5644/Y - 368.12404Y^2 - 5133.7345/Y^2 + 30.708204Y^3 + 1596.1916/Y^3$$

$$Y = \log_{10} \left(28.3E3 \left(\frac{S_a}{E_T} \right) \right)$$

Siendo,

E_T = el módulo de elasticidad del material a la temperatura del ciclo.

$S_{alt,k}$ = la amplitud de la tensión.

6) PASO 4.6 – Determinar el daño a fatiga para el ciclo $k^{\text{ésimo}}$.

El número real de repeticiones, n_k , que debe soportar el equipo fue determinado en el Paso 3, 20020 ciclos. El daño por fatiga para dicho ciclo se calcula:

$$D_{f,k} = \frac{n_k}{N_k}$$

Así, el daño a fatiga calculado en la zona crítica (radio exterior de la tubuladura) es de 0.093.

De idéntica manera, el daño a fatiga de la calota del fondo es de 0.068, ver Tabla 5.

e) PASO 5 – Calcular el daño acumulado usando la siguiente ecuación.

$$D_f = \sum_{k=1}^M D_{f,k} \leq 1.0$$

Habida cuenta de que solo hay un único rango de tensiones, $D_f = D_{f,k}$ para cada región evaluada y $D_f \leq 1.0$, por lo que todas las localizaciones cumplen los requerimientos establecidos para vida a fatiga de la especificación de diseño del usuario en condiciones de operación.

Tabla 5. Número permitido de ciclos, N_k .

Componente	Localización	E_T (ksi)	$S_{alt,k}$ (ksi)	X	N_k (ciclos)	$D_{r,k}$
Tubuladura	Anillo tubuladura en la esquina interior del radio	2.91E+0 4	13.93 2	5.69 3	4.927E-05	0.041
Tubuladura	Transición de la tubuladura en el radio de acuerdo exterior	2.88E+0 4	16.72 7	5.33 3	2.151E-05	0.093
Fondo	Calota (interior)	2.88E+0 4	15.63 3	5.47 2	2.965E+0 5	0.068
Envolvente	Soldadura fondo-envolvente (interior)	2.88E+0 4	11.58 0	6.78 6	6.138E-06	0.003
Envolvente	Soldadura fondo-envolvente (exterior)	2.88E+0 4	12.61 3	6.05 6	1.138E+0 6	0.018
Envolvente	Metal base	2.88E+0 4	9.481	8.50 5	3.195E+0 8	0

f) PASO 6 – Repetir los pasos 4 y 5 para cada tipo de ciclo identificado.

Dado que el único tipo de ciclo especificado son los ciclos de presión, no es necesario repetir los pasos 4 y 5.

3.3.2 FRACTURA

El propósito de este cálculo es evitar una rotura frágil catastrófica del equipo de acuerdo a la filosofía de diseño del código ASME BPVC Sección VIII evitando la iniciación de la fractura frágil. Sin embargo, no asegura el equipo frente a grietas generadas como consecuencia de la operación que ocasionen fugas ni la detención de la misma.

3.3.2.1 Nivel 1

Un reactor esférico fue fabricado en 1958 de acuerdo al código ASME Sección VIII División 1. El material empleado en su fabricación es un acero C-1/2Mo, SA-204 Gr. A. Se dispone de la siguiente información:

- Material = SA-204 Gr. A (año 1958)
- Condiciones de diseño = 650 psig@300 °F
- Tensión admisible = 16250 psi
- Diámetro interior = 144 in
- Presión de operación = 390 psig
- Espesor nominal = 1.6875 in
- Espesor real de pared = 1.7165 in
- Eficiencia de la unión soldada = 0.95
- Margen de corrosión = 0.1563 in
- Datos de ensayos de impacto no disponibles.
- El equipo fue sometido a un tratamiento térmico post-soldeo *PWHT*
- Temperatura de exposición crítica = 60 °F

El cálculo de Nivel 1 para la sección de la envolvente se hizo siguiendo el procedimiento establecido en el Apartado 3.4.2.1 del código API 579-1/ASME FFS-1 para recipientes a presión.

- a) PASO 1 – Determinar el punto inicial para la temperatura mínima admisible (MAT).

El acero SA-204 Gr.A es uno de los aceros de baja aleación no enumerados en las Curvas B, C o D de la Tabla 3.2 del código. Por tanto, se empleó la Curva A de la Figura 9 para determinar la temperatura mínima admisible (MAT) entrando con el espesor gobernante no corroído, t_g , siendo

éste el espesor nominal de la pared, 1.6875 in, para obtener una temperatura mínima admisible (MAT) de 93 °F.

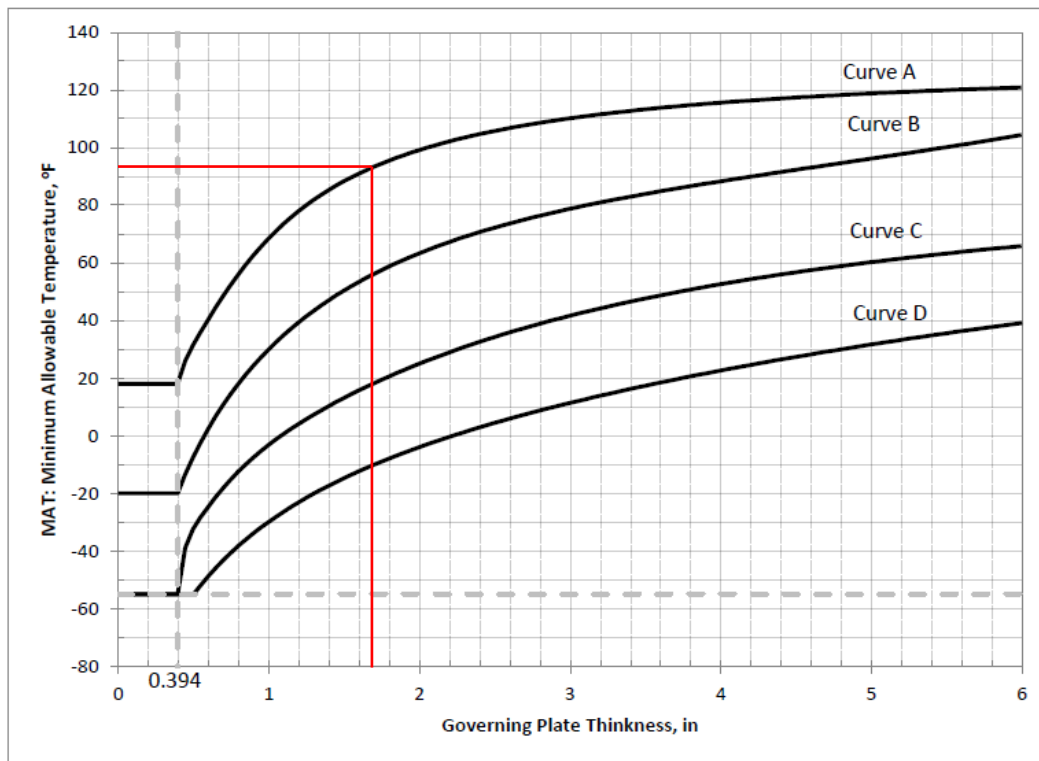


Figura 9. Temperatura mínima admisible (MAT).

El equipo fue sometido a un tratamiento térmico post-soldado (PWHT); sin embargo, el acero SA-204 Gr. A es un acero ASME P3 Grupo 1 por lo que la MAT determinada anteriormente no puede ser reducida en 30 °F.

b) PASO 2 – Repetir el paso anterior para todos los componentes del equipo.

La MAT del equipo será la mayor de las determinadas para los diferentes componentes. En este caso, al no haber más componentes que analizar, no es necesario repetir el primer paso.

Así, siendo la MAT igual a 93 °F, mayor que la temperatura de exposición crítica (CET), 60 °F, el criterio de cálculo de Nivel 1 no es satisfecho.

3.3.2.2 Nivel 2. Método A

El cálculo de Nivel 2 para la sección de la envolvente se hizo siguiendo el procedimiento establecido en el Apartado 3.4.3.1 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 para recipientes a presión. Para ello, se trata de demostrar que la presión y temperatura de operación está dentro de la zona de seguridad para la tensión de diseño del componente y la temperatura mínima admisible.

a) PASO 1 – Determinar el punto inicial para la temperatura mínima admisible (MAT).

El valor de la MAT determinada según el Nivel 1, ver Apartado 3.3.2.1, es 93 °F.

b) PASO 2 – Determinar los siguientes parámetros.

Tensión admisible (S)	= 16250 psi
Presión de diseño (P)	= 650 psig
Radio interior (R)	= 72 in
Espesor mínimo (t_{\min})	= 1.6875 in
Pérdida de espesor con respecto al espesor nominal (LOSS)	= 0, el espesor real es mayor que el espesor nominal.
Margen de corrosión futuro (FCA)	= 0.1563 in, el margen de corrosión futuro es igual al establecido en condiciones de diseño.
Eficiencia de junta, (E)	= 0.95
Eficiencia de junta, (E^*)	= $\max(0.80, E) = 0.95$
Espesor corroído (t_c)	= $t - FCA - LOSS = 1.7165 - 0.1563 - 0.0 = 1.5602$ in
Radio interior corroído (R_c)	= $(D/2) + FCA + LOSS = (144/2) + 0.1563 + 0.0 = 72.1563$ in

c) PASO 3 – Determinar el ratio de tensión, R_{ts} .

R_{ts} es la relación de tensiones entre el estado futuro y el de diseño, el código permite determinarlo de tres formas distintas: en función del espesor, en función de las tensiones o en función de la relación presión – temperatura. En este caso, se emplea la segunda de las opciones permitidas:

$$R_{ts} = \frac{S^* E^*}{SE}$$

Para ello es necesario determinar la tensión de membrana en la envolvente del recipiente a presión en función de la presión interna. Para ello, se emplea la expresión dada en el Apartado 2C.3.4 del Anexo 2C del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 en el caso de que $P \leq 0.665SE$ y $t_{\min} \leq 0.356R$:

$$\sigma_m = \frac{P}{2E} \left(\frac{R}{t} + 0.2 \right)$$

$$P = 650 \text{ psig} \leq 0.665SE = 0.665 \times 16250 \times 0.95 = 10265.9375 \text{ psi} \quad \text{OK}$$

$$t_{\min} = 1.6875 \text{ in} \leq 0.356R = 0.356 \times 72 = 25.632 \text{ in} \quad \text{OK}$$

Así, utilizando esta expresión se tiene que la tensión futura en el equipo es:

$$S^* E^* = \frac{P}{2} \left[\left(\frac{R_c}{t_c} \right) + 0.2 \right] E^* = \frac{P}{2} \left[\left(\frac{72.1563}{1.5602} \right) + 0.2 \right] 0.95 = 22.065 \times P$$

A partir de ella se construye una tabla en función de la presión con el valor del ratio de tensiones:

Tabla 6. Ratio de tensiones, R_{ts} .

P (psi)	S^*E^* (psi)	R_{ts}
650	14342	0.93
584	12886	0.83
520	11474	0.74
455	10040	0.65
390	8605	0.56
325	7171	0.46
263	5803	0.38
260	5737	0.37
195	4303	0.28

d) PASO 4 – Determinar la reducción en la MAT basada en la relación de tensiones R_{ts} .

Dado que la MAT fue determinada según el Nivel 1 se tiene que si el valor de R_{ts} es menor o igual que su valor umbral determinado mediante la Figura 10 entonces $MAT = -155$ °F. En caso contrario,

$MAT = \max[(MAT_{PASO 1} - T_R), -55 \text{ } ^\circ\text{F}]$, siendo T_R la reducción de temperatura correspondiente a la relación de tensiones determinada en la Figura 10.

En este caso, teniendo en cuenta el año de construcción, 1958, y que la tensión de diseño admisible a temperatura ambiente es menor de 17500 psi se ha de emplear la curva de la Nota 2. Así, el valor umbral de R_{ts} es 0.40.

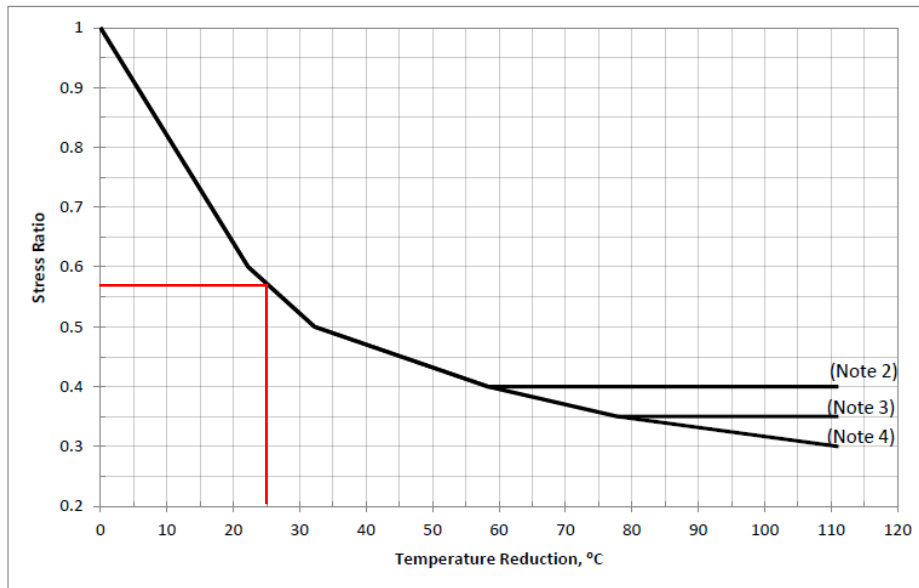


Figura 10. Reducción de la MAT basada en el exceso de espesor disponible para aceros al carbono y de baja aleación.

Los valores de la temperatura mínima reducida, MAT, para los distintos valores de presión de operación se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Temperatura mínima admisible reducida, MAT.

P (psi)	R_{ts}	T_R ($^\circ\text{F}$)	MAT ($^\circ\text{F}$)
650	0.93	39	54
584	0.83	50	43
520	0.74	59	34
455	0.65	68	25
390	0.56	77	16
325	0.46	113	-20
263	0.38		-155
260	0.37		-155
195	0.28		-155

En este caso particular, la presión de operación del reactor es 390 psig y la temperatura de exposición crítica, CET, de 60 °F. De acuerdo a la Tabla 7, la MAT reducida es de 16 °F, menor que la CET. Por tanto, el criterio de Nivel 2 para evitar la fractura frágil es satisfecho para las condiciones de operación.

3.3.3 FLUENCIA

Mediante los procedimientos establecidos en la Parte 10 del código se puede determinar si el componente objeto de estudio está en condiciones de seguir siendo operado y también su vida remanente cuando la temperatura de operación está por encima del valor a partir del cual es necesario evaluar la fluencia.

3.3.3.1 Nivel 1

Un calentador de crudo experimenta una temperatura anormal durante un corto periodo de tiempo (excursión). La refinería necesita conocer el daño adicional inducido a los tubos para evaluar el impacto de dicho suceso en la vida remanente de los tubos. Esta información será usada para ayudar a determinar si se puede esperar a sustituir los tubos del calentador en la próxima parada programada o, si por el contrario, hay que adelantar la misma. Evaluar la vida remanente de los tubos (basándose en la historia pasada más la excursión) y determinar si están en condiciones de seguir siendo operados hasta la siguiente parada programada.

Datos del calentador

- Material = SA-335 Gr. P22 (año 1998)
- Condiciones típicas (j=1) = 210 psig@1115 °F
- Diámetro exterior = 8.625 in
- Espesor de fabricación = 0.322 in
- Margen de corrosión futuro (FCA) = 0.10 in
- Eficiencia de la unión soldada = 1.0
- Longitud no soportada = 144 in
- Envolverte cilíndrica
- Tiempo de operación pasada (j=1) = 131400 horas (condiciones típicas de operación)
- Tiempo de operación pasada (j=2) = 336 horas (excursión)

- Tiempo de operación futura ($j=1$) = 43800 horas (condiciones típicas de operación)

Datos de la excursión

- Presión de excursión = 210 psig
- Temperatura de excursión = 1220 °F
- Duración de la excursión = 336 horas

Datos de inspección

No hay signos visuales de daño en el tubo: ni ampollas ni pérdidas de metal ni deformaciones excesivas fueron detectadas. Las lecturas del espesor por ultrasonidos indican una ligera pérdida de espesor generalizada pero dentro de los límites del margen de corrosión original. Analizando los registros de inspección, ésta fue la primera excursión en el rango de la fluencia de este componente. Por último, no hay soldaduras en el hogar.

El análisis del comportamiento en servicio en el régimen de fluencia de Nivel 1 se lleva a cabo según el Apartado 10.4.2.2 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 (componente sometido a múltiples condiciones de operación). En este estudio se supone que los tubos están soportados adecuadamente de forma que la condición de diseño limitante es la tensión circunferencial como consecuencia de la presión interna. Además, como las curvas de los tubos están localizadas fuera del hogar del calentador (donde tuvo lugar la operación anormal – excursión), solo la parte central cilíndrica de los tubos es analizada.

Parte cilíndrica de los tubos:

- PASO 1 – Determinar la temperatura y presión máxima de operación y tiempo en servicio.

Ninguna unión soldada del componente sufrió el proceso de excursión de temperatura, por lo que no es necesario añadir los 25 °F a la temperatura máxima de operación.

$$T_{\max}^1 = 1115 \text{ °F} \quad P_{\max}^1 = 210 \text{ psig} \quad \text{tiempo}_{\text{total}}^1 = 131400 + 43800 = 175200 \text{ horas}$$

$$T_{\max}^2 = 1220 \text{ °F} \quad P_{\max}^2 = 210 \text{ psig} \quad \text{tiempo}_{\text{total}}^2 = 336 \text{ horas}$$

- PASO 2 – Determinar la tensión nominal de los tubos para cada condición de operación.

¹ Condiciones típicas de operación.

² Condiciones de excursión.

La tensión nominal calculada según el Anexo 2C del código para envolventes cilíndricas, Apartado 2C.3.3, incluye los efectos de la reducción espesor de las paredes de los tubos como consecuencia de su vida en servicio. Como ya se comentó anteriormente, en este ejemplo la única carga que se considera es la presión por lo que las tensiones de membrana circunferenciales y longitudinales pueden ser calculadas mediante su expresión analítica:

$$R = OD/2 - t_{nom} + FCA = 8.625/2 - 0.322 + 0.1 = 4.0905 \text{ in}$$

$$t_c = t_{nom} - FCA = 0.322 - 0.1 = 0.222 \text{ in}$$

$$\text{Tensión de membrana circunferencial, } \sigma_m^C = \frac{P}{E} \left(\frac{R}{t_c} + 0.6 \right) = \frac{210}{1} \left(\frac{4.0905}{0.222} + 0.6 \right) = 3995 \text{ psi}$$

$$\text{Tensión de membrana longitudinal, } \sigma_m^L = \frac{P}{2E} \left(\frac{R}{t_c} - 0.4 \right) = \frac{210}{2 \cdot 1} \left(\frac{4.0905}{0.222} - 0.4 \right) = 1893 \text{ psi}$$

La tensión máxima del componente será la mayor de las componentes calculadas, es decir, $\sigma_{max} = 3995 \text{ psi}$.

c) PASO 3 – Determinar las curvas de daño correspondientes al material de fabricación.

La envolvente cilíndrica está fabricada en SA-335 Gr. P22 (año 1998), acero en estado recocido de composición química 2.25Cr-1.0Mo. Las curvas de evaluación y de daño correspondientes son las representadas en las Figuras 11 y 12 respectivamente:

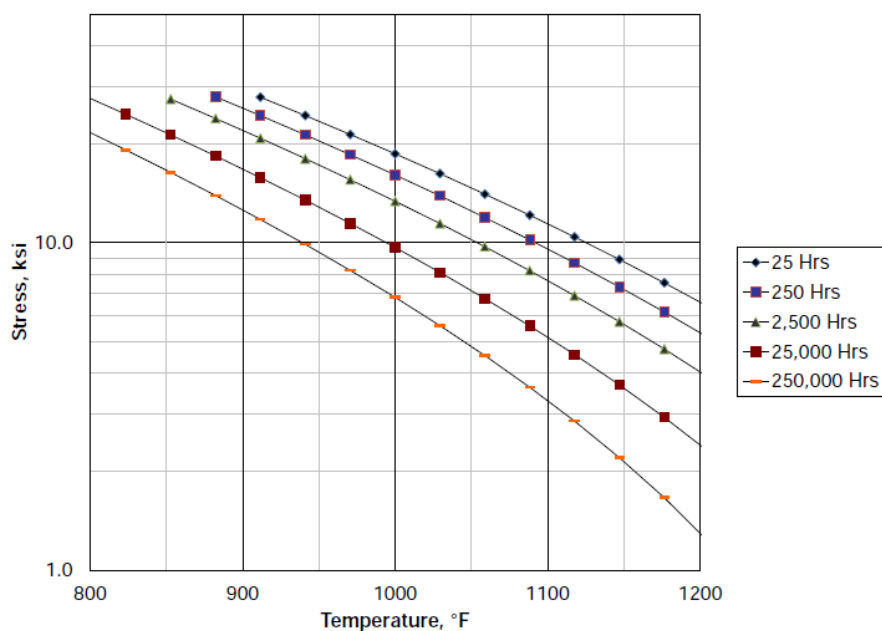


Figura 11. Criterio de evaluación Nivel 1 para aceros recocidos 2.25Cr-1.0Mo. Curva de evaluación.

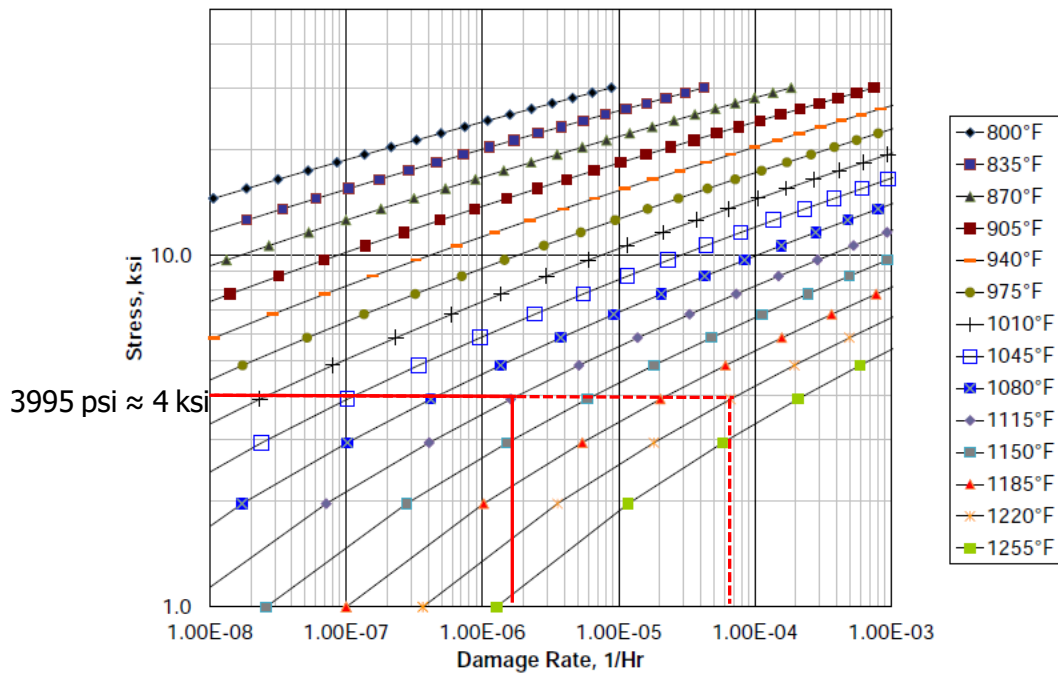


Figura 12. Criterio de evaluación Nivel 1 para aceros recocidos 2.25Cr-1Mo. Curva de daño.

- d) PASO 4 – Determinar la velocidad de daño por fluencia, R_c^j , y su daño asociado, D_c^j , siendo j cada una de las condiciones de operación (normal y excursión).

El daño asociado se determina mediante la siguiente expresión, $D_c^j = R_c^j t_{se}^j$, siendo t_{se}^j el tiempo de exposición a las condiciones de operación correspondientes.

Condiciones típicas de operación:

$$R_c^1 = 1.75E-6 \text{ Hr}^{-1} \text{ (ver Figura 12, tensión máxima 3995 psi @ 1115 } ^\circ\text{F)}$$

$$D_c^1 = R_c^1 t_{se}^1 = 1.75E-6 * 175200 = 0.3066$$

Condiciones de excursión:

$$R_c^2 = 6.5E-5 \text{ Hr}^{-1} \text{ (ver Figura 12, tensión máxima 3995 psi @ 1220 } ^\circ\text{F)}$$

$$D_c^2 = R_c^2 t_{se}^2 = 6.5E-5 * 336 = 0.0218$$

- e) PASO 5 – Determinar el daño por fluencia para el número total de condiciones de operación.

$$D_c^{\text{total}} = D_c^1 + D_c^2 = 0.3066 + 0.0218 = 0.3284$$

f) PASO 6 – Verificación Nivel 1.

El daño total acumulado para el número total de condiciones de operación debe ser menor o igual que 0.25. En este caso el daño total acumulado es 0.3284, valor que excede el límite establecido en el código. Por lo tanto el equipo no cumple el requisito establecido para la evaluación frente a fluencia de Nivel 1.

3.3.3.2 Nivel 2

Se analiza en este apartado el comportamiento a fluencia de Nivel 2 del mismo caso expuesto en el subapartado anterior según el Apartado 10.4.3 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 en el que se especifica que la temperatura del componente objeto de estudio se ha de suponer uniforme para cada condición de operación. La metodología para la determinación del daño acumulado por fluencia es la descrita en el Apartado 10.5.2.3 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016.

Parte cilíndrica de los tubos:

a) PASO 1 – Determinar el histograma de cargas pasado y futuro.

La Tabla 8 resume los ciclos de operación pasados y futuros del equipo.

Tabla 8. Histograma de cargas pasado y futuro.

	Pasado		Futuro
	Operación normal (m=1)	Excursión (m=2)	(m=3)
Presión de operación (P)	210 psig	210 psig	210 psig
Temperatura de operación (T)	1115 °F	1220 °F	1115 °F
Duración (t _{se})	131400 horas	336 horas	43800 horas

b) PASO 2 – Discretización de cada tipo de ciclo.

Cada uno de los distintos tipos de ciclos de operación (pasado normal, pasado excursión y futuro normal) se dividen en 2 sub-pasos (n) a fin de ilustrar cómo se aplica la metodología propuesta a pesar de que en este caso concreto no sería necesaria su división ya que las condiciones de operación permanecen constantes en cada uno de ellos. Así, en la Tabla 9 se puede ver la discretización hecha para cada uno de los ciclos de operación.

c) PASO 3 – Determinar la temperatura de cálculo, nT , para cada incremento de tiempo, nt .

Como se comentó al inicio de este subapartado, la metodología propuesta en el código obliga a considerar la temperatura constante en cada uno de los n intervalos en los que se dividen los ciclos de operación. En este caso, habida cuenta de que la temperatura del calentador permanece constante durante los ciclos de operación, es evidente que la temperatura en cada uno de los intervalos será constante e igual a la del ciclo de operación, ver Tabla 9.

Tabla 9. Histograma de cargas pasado y futuro. Discretización.

	Pasado				Futuro	
	Operación normal ($m=1$)		Excursión ($m=2$)		(m=3)	
Discretización	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Presión de operación (P)	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig
Temperatura de operación (T)	1115 °F	1115 °F	1220 °F	1115 °F	1115 °F	1115 °F
Duración (t_{se})	65700 h	65700 h	168 h	168 h	21900 h	21900 h

d) PASO 4 – Determinar los componentes del tensor de tensiones, ${}^n\sigma_{ij}$, para cada incremento de tiempo, nt .

El tensor de tensiones se puede determinar mediante un cálculo por elementos finitos aunque, en este caso, habida cuenta de la simplicidad de la geometría (cilindro de pared delgada) y de las cargas mecánicas a las que está sometido (presión interior) es posible determinar dicho tensor a partir de

las expresiones analíticas de las tensiones principales dadas en la Tabla 10.2 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016.

$$OD/t_{nom} = 8.625/0.322 = 26.8 > 6$$

Cilindro de pared delgada

Espesor requerido para cargas adicionales, t_{sl}

$t_{sl} = 0$ (solo presión interior)

Factor de Lorentz, L_f

$L_f = 1$ (cilindro)

$${}^n\sigma_1 = {}_{hoop}^n\sigma_{mean} = \frac{P(D_{mean})}{2(t_{comp})} L_f = \frac{P(OD - t_{nom} + FCA)}{2(t_{nom} - FCA)} = \frac{210(8.625 - 0.322 + 0.1)}{2(0.322 - 0.1)} = 3974 \text{ psi}$$

$${}^n\sigma_2 = {}_{long}^n\sigma_{mean} = \frac{P(D_{mean})}{4(t_{comp} - t_{sl})} L_f = \frac{{}^n\sigma_1}{2} = \frac{3974}{2} = 1987 \text{ psi}$$

$${}^n\sigma_3 = {}_{radial}^n\sigma_{mean} = 0.0$$

Por último, se determina la tensión equivalente de von Mises a partir de las tensiones principales:

$${}^n\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

$${}^n\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{(3974 - 1987)^2 + (1987 - 0.0)^2 + (0.0 - 3974)^2}{2}} = 3442 \text{ psi}$$

La Tabla 10 recoge las tensiones calculadas para cada incremento de tiempo.

Tabla 10. Tensiones para cada incremento de tiempo.

	Pasado				Futuro	
	Operación normal (m=1)		Excursión (m=2)			
Discretización	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Presión de operación (P)	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig	210 psig
Temperatura de operación (T)	1115 °F	1115 °F	1220 °F	1115 °F	1115 °F	1115 °F
Duración (t _{se})	65700 h	65700 h	168 h	168 h	21900 h	21900 h
ⁿ σ ₁ (psi)	3974	3974	3974	3974	3974	3974
ⁿ σ ₂ (psi)	1987	1987	1987	1987	1987	1987
ⁿ σ ₃ (psi)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ⁿ σ _{eqv} (psi)	3442	3442	3442	3442	3442	3442

e) PASO 5 – Determinar si el componente tiene la protección adecuada frente a colapso plástico.

La tensión primaria de referencia de cada incremento de tiempo, ⁿσ_{ref}^p, debe ser menor o igual que 0.75 veces el límite elástico mínimo del material evaluado a la temperatura correspondiente a dicho intervalo de tiempo.

En este caso, cilindro de pared delgada sometido a presión interior, la tensión no varía a través del espesor, por lo que la componente de flexión, P_b, es nula y el valor de la membrana, P_L, coincide con el de la componente mayor que es la tensión circunferencial, ⁿσ₁. Además, el tensor de tensiones es constante en el tiempo para los tubos objeto de estudio por lo que la tensión primaria de referencia para cada incremento de tiempo es:

$${}^n\sigma_{ref}^p = \frac{{}^n P_b + \left({}^n P_b^2 + 9({}^n P_L^2) \right)^{0.5}}{3} = \frac{0 + (0^2 + 9(3974^2))^{0.5}}{3} = 3974 \text{ psi}$$

El límite elástico del material de fabricación del calentador, SA-335 Gr. P22, a las temperaturas de operación normal y excursión se obtuvieron del código ASME BPVC Sección 2 Parte D:

$$\sigma_{ys} @ 1115 \text{ °F} = 19851 \text{ psi}$$

$$\sigma_{ys} @ 1220 \text{ }^{\circ}\text{F} = 15034 \text{ psi}$$

$n_{\sigma_{ref}} = 3974 \text{ psi} \leq 0.75 * 15034 = 11276 \text{ psi}$, por lo que se garantiza la protección frente a colapso plástico de los tubos del calentador.

f) PASO 6 – Determinar las tensiones principales y la tensión equivalente de von Mises.

La Tabla 10 recoge las tensiones principales y equivalentes calculadas para cada incremento de tiempo.

g) PASOS 7 y 8 – Determinar la vida remanente, n_L , para las condiciones ($n_{\sigma_{eqv}}$ y n_T) de cada incremento de tiempo.

En este análisis se emplea el método Omega, el cual proporciona una relación del endurecimiento por deformación con la velocidad de deformación por fluencia, es decir, la velocidad de deformación por fluencia es función de la tensión, la temperatura y la deformación por fluencia acumulada. La vida remanente según este método es:

$$n_L = \frac{1}{\varepsilon_{co} \Omega_m}$$

Donde:

$$\log_{10} [\dot{\epsilon}_{co}] = - \left[(A_0 + \Delta_{\Omega}^{sr}) + \left(\frac{A_1 + A_2 S_l + A_3 S_l^2 + A_4 S_l^3}{T_{refa} + T} \right) \right]$$

$$\Omega_m = \Omega_n^{\delta_{\Omega} + 1} + \alpha_{\Omega} n_{BN}$$

$$\Omega_n = \max [(\Omega - n_{BN}), 3.0]$$

$$\log_{10} [\Omega] = \left[(B_0 + \Delta_{\Omega}^{st}) + \left(\frac{B_1 + B_2 S_l + B_3 S_l^2 + B_4 S_l^3}{T_{refa} + T} \right) \right]$$

$$\delta_{\Omega} = \beta_{\Omega} \cdot \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} - 1.0 \right)$$

$$n_{BN} = - \left(\frac{A_2 + 2 A_3 S_l + 3 A_4 S_l^2}{T_{refa} + T} \right)$$

$$T_{refa} = 460.0 \quad \text{for } ^{\circ}F$$

$$T_{refa} = 273.0 \quad \text{for } ^{\circ}C$$

$$S_l = \log_{10} [\sigma_e]$$

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2}$$

Las constantes correspondientes al material de fabricación de los tubos es SA-335 Gr. P22, acero en estado recocido de composición química 2.25Cr-1.0Mo, se recogen en la Tabla 11. Estos valores se obtuvieron del Anexo 10B, Tabla 10B.1 del código API 579-1/ASME FFS-1 2016.

Tabla 11. Tensiones para cada incremento de tiempo.

	Parámetro velocidad de deformación - $\dot{\epsilon}_{co}$		Parámetro Omega - Ω	
	2.25Cr-1Mo Recocido	A ₀	-21.860	B ₀
	A ₁	51635.000	B ₁	7205.000
	A ₂	-7330.000	B ₂	-2436.000
	A ₃	-2577.000	B ₃	0.000
	A ₄	0.000	B ₄	0.000

El cálculo de la vida remanente de los tubos del calentador según el método Omega se resume en la Tabla 12.

Tabla 12. Vida remanente para cada incremento de tiempo.

	Pasado				Futuro (m=3)	
	Operación normal (m=1)		Excursión (m=2)			
Discretización	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Temp. de operación, T (°F)	1115	1115	1220	1115	1115	1115
Duración, t _{se} (h)	65700	65700	168	168	21900	21900
ⁿ σ ₁ (ksi)	3.974	3.974	3.974	3.974	3.974	3.974
ⁿ σ ₂ (ksi)	1.987	1.987	1.987	1.987	1.987	1.987
ⁿ σ ₃ (ksi)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ⁿ σ _{eqv} (ksi)	3.442	3.442	3.442	3.442	3.442	3.442
α _Ω (cilindros)	2	2	2	2	2	2
β _Ω (método Omega)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
S ₁	0.537	0.537	0.537	0.537	0.537	0.537
n _{BN}	6.411	6.411	6.010	6.010	6.411	6.411
·	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244
·	78.404	78.404	45.742	45.742	78.404	78.404
Ω _n	71.993	71.993	39.732	39.732	71.993	71.993
Ω _m	217.169	217.169	109.574	109.574	217.169	217.169
ε̇ _{co} (h ⁻¹)	1.111E-08	1.111E-08	8.111E-07	8.111E-07	1.111E-08	1.111E-08
L (h)	414508	414508	11252	11252	414508	414508

h) PASOS 9 y 10 – Calcular el daño por fluencia acumulado cada ciclo (pasado de operación normal, pasado de excursión y futuro de operación normal) mediante la siguiente expresión:

$${}^m D_c = \sum_{n=1}^N \frac{n_t}{n_L}$$

Así, para el ciclo pasado de operación normal se tiene que:

$${}^1 D_c = \sum_{n=1}^2 \frac{n_t}{n_L} = \frac{{}^1 t}{{}^1 L} + \frac{{}^2 t}{{}^2 L} = \frac{65700}{414508} + \frac{65700}{414508} = 0.317$$

$${}^2D_c = \sum_{n=1}^2 \frac{n_t}{n_L} = \frac{{}^1t}{{}^1L} + \frac{{}^2t}{{}^2L} = \frac{168}{11252} + \frac{168}{11252} = 0.030$$

$${}^3D_c = \sum_{n=1}^2 \frac{n_t}{n_L} = \frac{{}^1t}{{}^1L} + \frac{{}^2t}{{}^2L} = \frac{21900}{414508} + \frac{21900}{414508} = 0.106$$

i) PASO 11 – Calcular el daño total por fluencia acumulado para todos los ciclos de operación.

$${}^{total}D_c = \sum_{m=1}^M mD_c \leq D_c^{allow} = 1.0$$

$${}^{total}D_c = \sum_{m=1}^3 mD_c = {}^1D_c + {}^2D_c + {}^3D_c = 0.317 + 0.030 + 0.106 = 0.453 \leq 1.0$$

El daño total por fluencia acumulado en los tubos del calentador, ${}^{total}D_c = 0.453$, es menor que el daño permitido, $D_c^{allow} = 1.0$, por lo que es aceptable que el componente continúe en operación durante 5 años más.

3.3.4 ANÁLISIS DE TENSIONES

Se presenta a continuación el análisis de tensiones de un secador de alimentación según el Anexo 2D del código API 579-1/ASME FFS-1 2016 el cual remite al código de diseño ASME BPVC Sección VIII División 2 evaluando los siguientes modos de fallo:

- Protección frente a colapso plástico – método de carga límite:
 - Condiciones de diseño (44.6 barG @ 80 °C y 12 barG @ 340 °C):
 - Caso de carga 1: 1.5 (P + Ps + D)
 - Caso de carga 2: 1.3 (P + Ps + D) + 1.1 W + 1.1 L
 - Caso de carga 3: 1.3 (P + Ps + D) + 1.1 E + 1.1 L
- Protección frente a fallo local – análisis elástico:
 - Caso de carga: P + Ps + D
- Protección frente a fallo por pandeo Tipo 1 (bifurcation buckling):

- Condiciones de diseño (44.6 barG @ 80 °C y 12 barG @ 340 °C):
 - Caso de carga 1: $P + P_s + D + L$
 - Caso de carga 2: $0.9 P + P_s + D + 0.6 W$
 - Caso de carga 3: $0.9 P + P_s + D + 0.7 E$

En los casos de carga definidos previamente, las abreviaturas de las cargas empleadas se describen como sigue:

- P presión interna.
- Ps presión hidrostática del líquido, considerado lleno en operación normal.
- D peso propio del equipo, considerando el peso propio del acero así como el del aislante, absorbente y otros internos.
- L cargas en las tubuladuras.
- W carga de viento. Presión definida de acuerdo a norma local.
- E cargas de sismo. Definidas de acuerdo a la norma ASCE 7-10.
- T carga térmica.

Así, el método de carga límite fue empleado para validar la protección frente a colapso plástico, mientras que el método de tensiones elásticas fue empleado para analizar fallo local y pandeo.

Dichos análisis se llevaron a cabo mediante la técnica de los elementos finitos, empleando el software ANSYS en su versión 18.2 considerando una tolerancia de corrosión de 3 mm en las partes en contacto con el fluido.

Las propiedades de los materiales de fabricación del mismo se indican en la Tabla 13.

En las Figuras 13 a 15 se muestra la variación con la temperatura de las propiedades térmicas, mecánicas y tensión de comparación de los distintos materiales de fabricación del equipo respectivamente.

Tabla 13. Materiales de fabricación del secador de alimentación.

		SA-516 Gr. 60	S275 JR	SA-350 LF2 Cl1	SA-193 B7
Componente		Envolvente, fondos y faldón	Soportes de aislamiento	Bridas y cuello de tubuladuras	Pernos
Composición		Acero al carbono			1Cr-1/5Mo
Densidad	Kg/m ³	7750			
Conductividad térmica	W/m K	25 °C	60.4		41.0
		100 °C	58.0		40.6
		200 °C	53.6		40.1
		250 °C	51.4		39.5
		300 °C	49.2		38.7
		350 °C	47.0		37.8
Calor específico	J/kg K	25 °C	431		446
		100 °C	480		481
		200 °C	516		527
		250 °C	534		547
		300 °C	553		566
		350 °C	575		586
Módulo elástico	GPa	25 °C	202		204
		100 °C	198		200
		200 °C	192		193
		250 °C	189		190
		300 °C	185		186
		350 °C	179		183
Coeficiente de Poisson		0.3			
Coeficiente de expansión térmica	m/m K	25 °C	1.15E-5		
		100 °C	1.21E-5		
		200 °C	1.27E-5		
		250 °C	1.30E-5		
		300 °C	1.33E-5		

	350 °C	1.36E-5			
Límite elástico MPa	25 °C	221		248	724
	100 °C	201		227	671
	200 °C	189		213	632
	250 °C	182	-	204	614
	300 °C	172		194	595
	350 °C	162		183	568
	Tensión admisible MPa	25 °C	147		165
100 °C		134		151	223
200 °C		126		142	211
250 °C		121	-	136	205
300 °C		115		129	198
350 °C		108		122	190

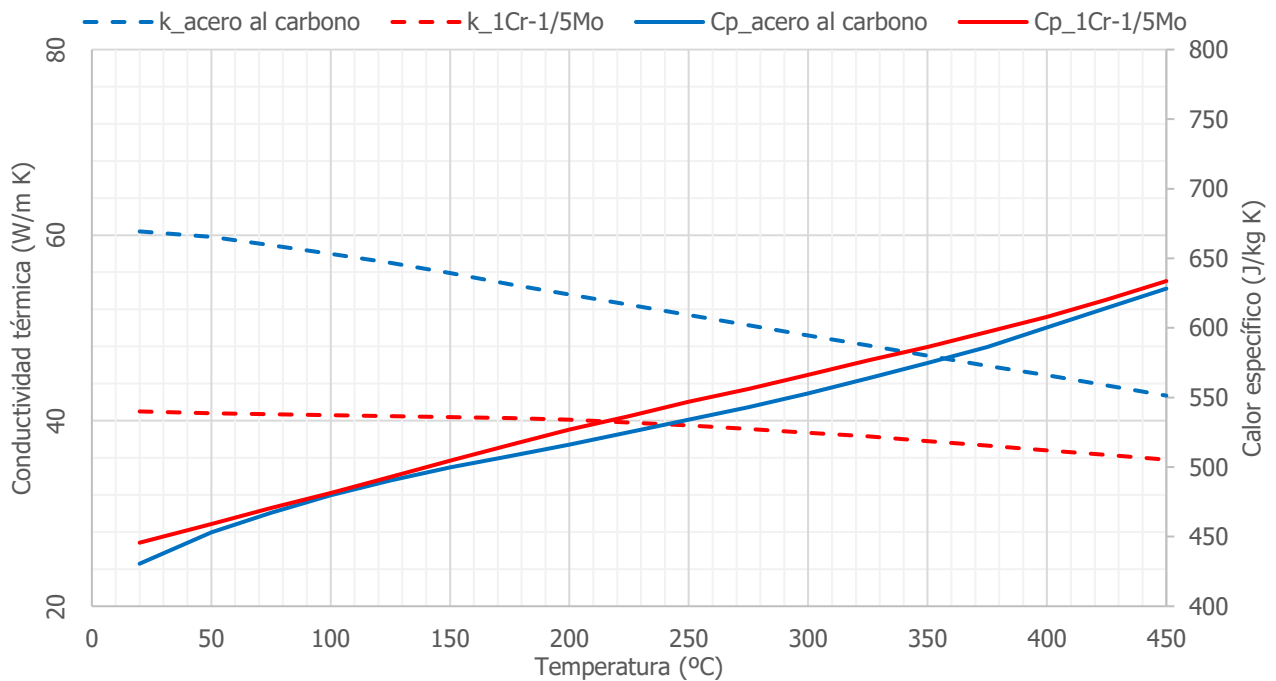


Figura 13. Variación de las propiedades térmicas en función de la temperatura.

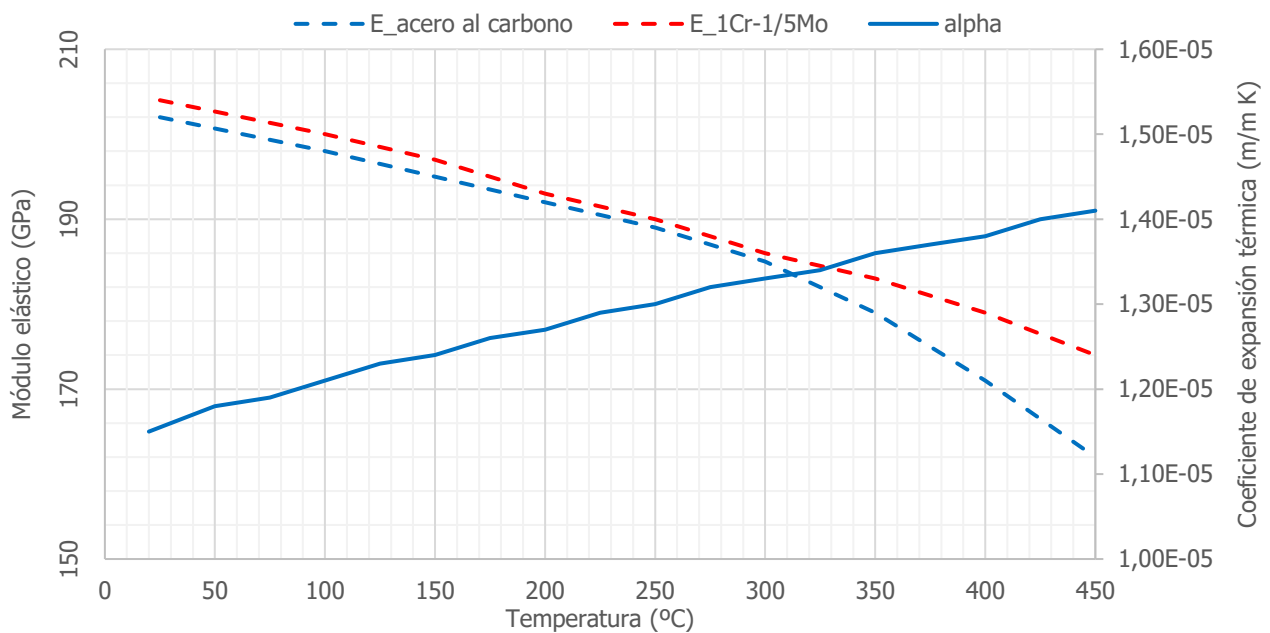


Figura 14. Variación de las propiedades mecánicas en función de la temperatura.

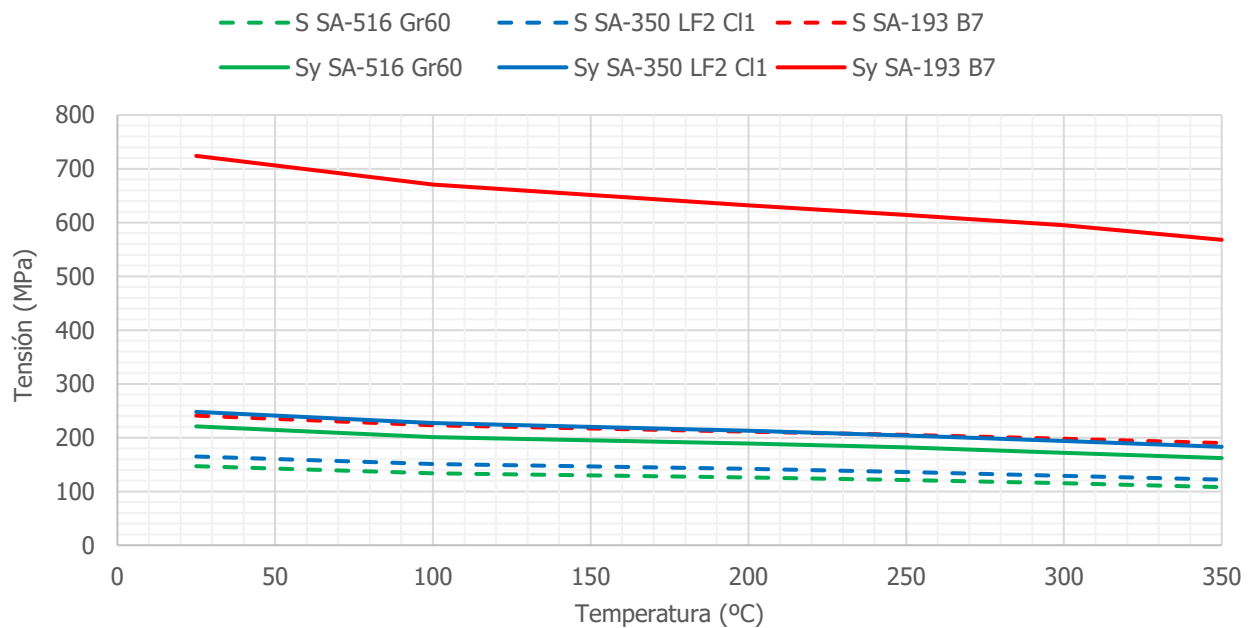


Figura 15. Variación del límite elástico y la tensión de comparación en función de la temperatura.

El modelo 3D desarrollado para el análisis del secador de alimentación se generó descontando el espesor de corrosión, 3 mm, en las partes en contacto con el fluido (carcasa, fondos y tubuladuras).

Teniendo en cuenta la relación radio-espesor de la envolvente y fondos del equipo se consideró un modelo sólido de dichas partes, mientras que el faldón, dado el menor espesor de las chapas que lo componen, se modelizó con elementos tipo lámina o "shell".

A partir del modelo geométrico se generó el modelo de elementos finitos, el cual se realizó de manera realista mediante la utilización de elementos tipo sólido en 3D, SOLID185, en envolvente, fondos y tubuladuras, y elementos tipo lámina, SHELL181, en el faldón y soportes del aislamiento.

El elemento tipo sólido 3D SOLID185 tiene 8 nodos con 3 grados de libertad en cada uno de ellos, las traslaciones según las tres direcciones, mientras que el elemento tipo lámina SHELL181 tiene 4 nodos con 6 grados de libertad, traslaciones y rotaciones según las tres direcciones, ver Figura 16.

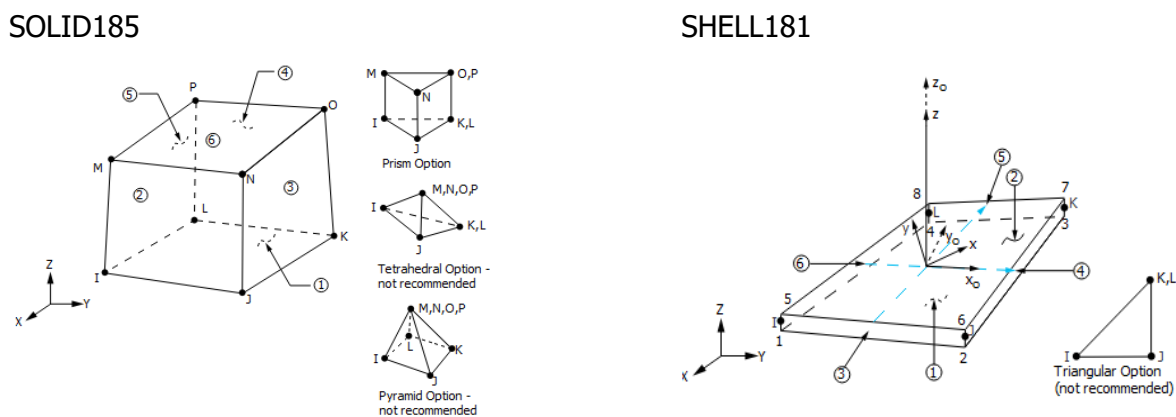
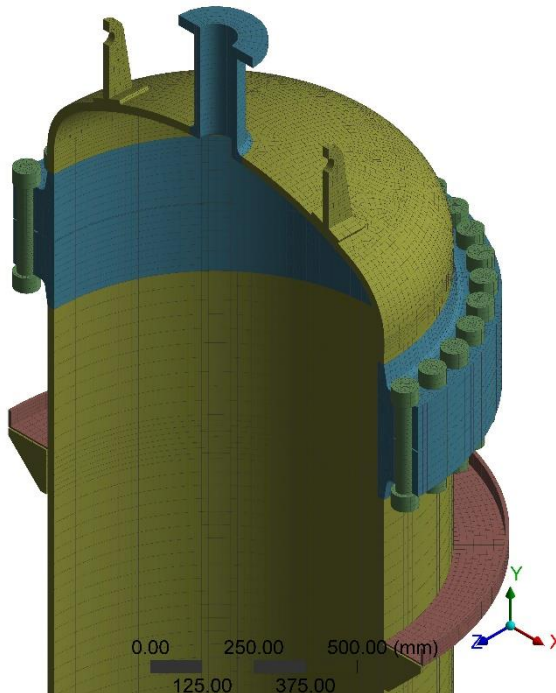


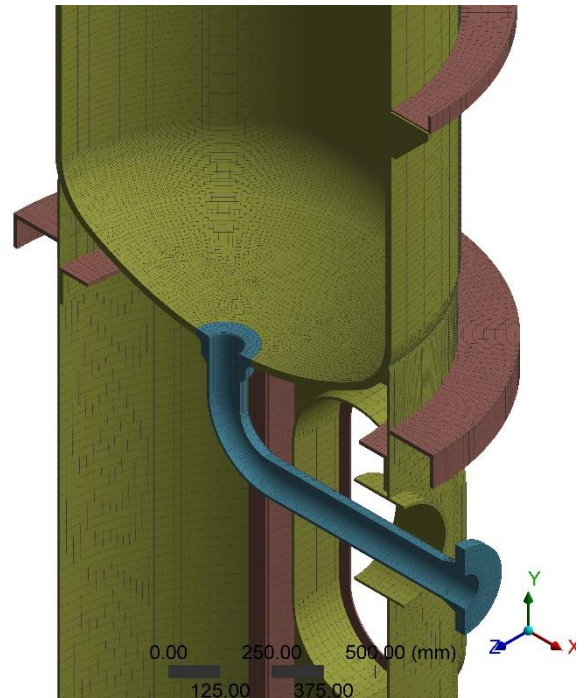
Figura 16. Tipos de elementos.

Así, el modelo de elementos finitos finalmente generado consta de 502385 nodos y 416350 elementos. En la Figura 17 se muestran diferentes detalles del modelo de elementos finitos del equipo.

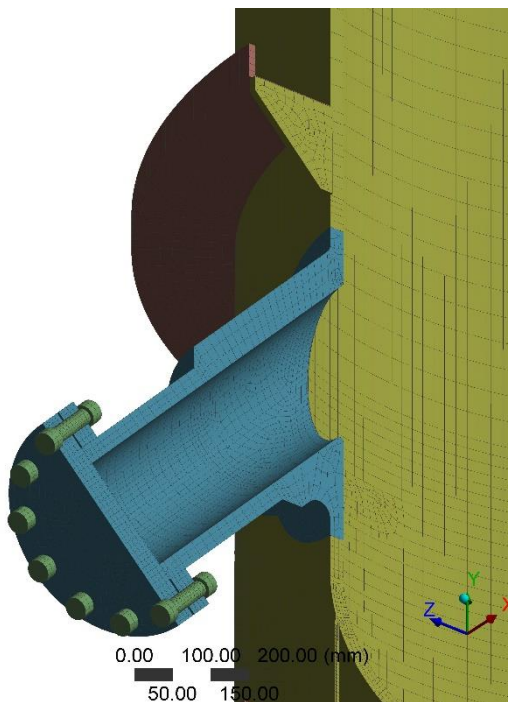
Brida del cuerpo y fondo superior.



Fondo inferior y faldón.



Tubuladura E.



Acceso al faldón.

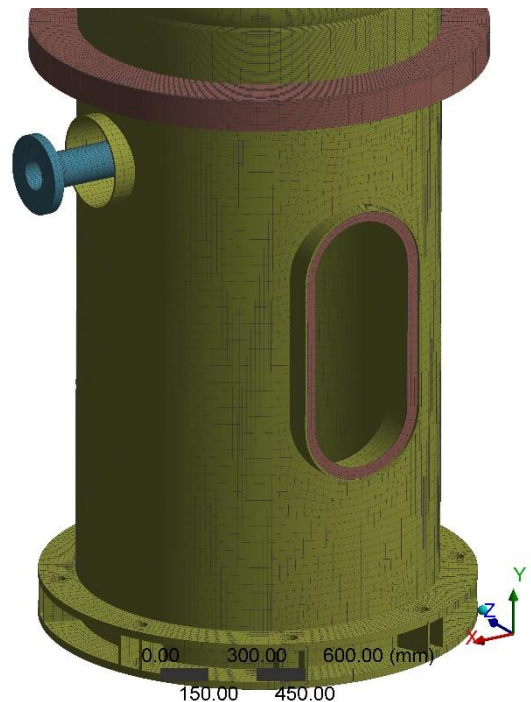


Figura 17. Detalles del modelo geométrico del secador de alimentación.

En el modelo, como condiciones de contorno del equipo se consideró el anillo de la base del faldón apoyado, es decir, el desplazamiento según el eje Y nulo, y se impidió el giro respecto al eje del

equipo de las aristas correspondientes a los pernos de fijación del mismo, de este modo se permite la expansión radial que pueda aparecer como consecuencia de la dilatación térmica.

En los casos de carga definidos se distinguen dos condiciones, diseño y operación, cuyas características se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14. Condiciones de diseño.

Condiciones de diseño		
	Secado	Regeneración
Presión	44.6 kg/cm ²	12 kg/cm ²
Temperatura	80 °C	340 °C

Además, en las uniones atornilladas de la brida del cuerpo y de la tubuladura E se consideró la pretensión en los pernos indicada en la Tabla 15.

Tabla 15. Pretensión en los pernos de las bridas.

	Tensión en los pernos	Espárragos	Carga de pretensión
Brida de unión envolvente-fondo	1114 kg/cm ²	Ø1-3/4"	193.6 kN
Brida ciega de la tubuladura E	1040 kg/cm ²	Ø3/4"	39.3 kN

De este modo, las cargas aplicadas sobre el modelo, peso propio (D), presión interna (P), presión hidrostática (Ps), cargas vivas (L), carga de viento (W), carga de sismo (E) y carga térmica (T), para condiciones de diseño y de operación son descritas a continuación.

El peso propio del equipo (D), 5250 kg incluyendo aislamiento e internos, fue considerado mediante una densidad equivalente y la aceleración de la gravedad. 9.81 m/s².

Se aplicó sobre toda la superficie interior del tanque el valor de la presión interna (P) definido en la Tabla 14 en función de las condiciones analizadas, operación o diseño. Además, en las tubuladuras de entrada (A) y salida (B) se consideró la reacción correspondiente a la fuerza que compensa la presión en el área de las mismas.

El peso del fluido interno se consideró teniendo en cuenta la presión hidrostática del mismo sobre las paredes del equipo, considerando que en operación normal está lleno y que el peso total (equipo + fluido) es de 10600 kg.

Las cargas sobre las tubuladuras se aplicaron sobre el modelo según se indica en la Tabla 16.

Tabla 16. Fuerzas y momentos en tubuladuras.

	Fuerza (kg)			Momento (kg/m)		
	F_R	F_C	F_L	M_C	M_L	M_T
4" – tubuladura A & B	815.7	1020	0	269	0	244.7
6" – tubuladura E	1223.6	917.7	1223.6	367	479.2	560.8

<p>Nomenclatura</p> <p>Fuerzas:</p> <p>F_R = axial</p> <p>F_L = longitudinal</p> <p>F_C = circunferencial</p> <p>Momentos:</p> <p>M_T = torsional</p> <p>M_L = longitudinal</p> <p>M_C = circunferencial</p>	
--	--

La carga de viento de diseño aplicada sobre el modelo fue definida de acuerdo a la norma local considerando lo siguiente:

- Velocidad de diseño (10 m) 75 km/h
- Tipo de estructura 2
- Factor de forma (C) 1.5

De este modo la carga exterior de viento (presión/succión) obtenida es de 50.6 kg/m²

La carga de sismo se determinó de acuerdo con ASCE 7-10 considerando lo siguiente:

- SDS 1.125 g
- Zona clase C

- Factor de importancia (IP) 1.25

De este modo se determinaron las aceleraciones a aplicar sobre el modelo que son las siguientes:

- La componente impulsiva y convectiva se combinan por el método de suma directa, siendo aceleraciones horizontales de valor:
 - Impulsiva 0.47 g
 - Convectiva 0.25 g
- Las aceleraciones verticales se definen como sigue:
 - Componente hidrodinámica sobre paredes y fondo del equipo, es decir, añadida a la presión hidrostática 0.225 g
 - Inercia vertical de la estructura 0.225 g

3.3.4.1 Evaluación de la protección frente a colapso plástico

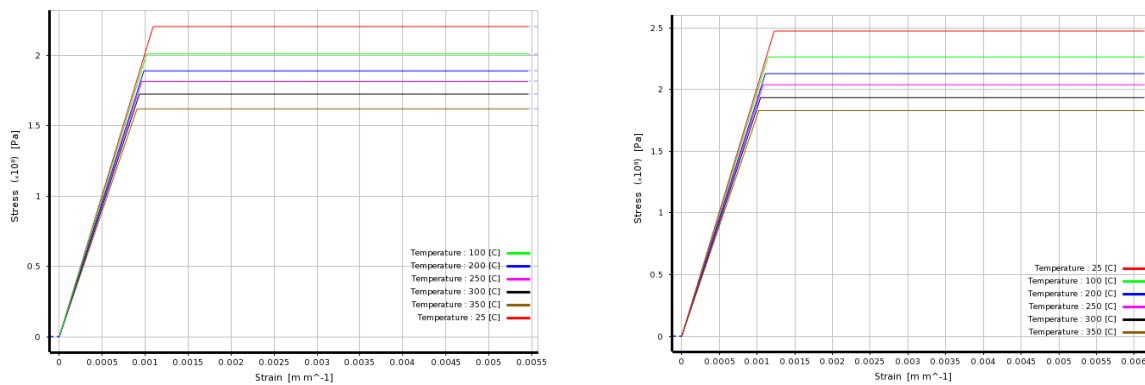
La evaluación de la protección frente a colapso plástico del equipo, en condiciones de diseño y de operación, se realizó aplicando el método de carga límite según el código ASME BPVC Sección VIII División 2.

Así, la protección de un componente frente a colapso plástico queda validada usando el método de carga límite si se alcanza la convergencia del análisis, esto es, si el componente es estable bajo las cargas aplicadas para cada caso de carga considerado.

Para ello, en los análisis se empleó un modelo de material elástico perfectamente plástico con la teoría de los pequeños desplazamientos. En la Figura 18 se muestra el modelo de material empleado para cada uno de los materiales de fabricación del equipo.

SA-516 Gr. 60

SA-350 LF2 Cl1



SA-193 B7

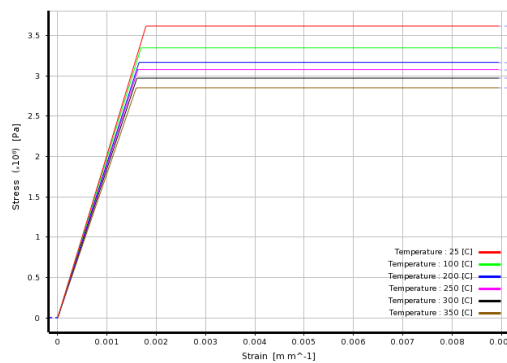


Figura 18. Modelo de material elástico perfectamente plástico.

Condiciones de diseño

Los casos de carga (combinaciones y factores de mayoración) definidos de acuerdo al código para la evaluación mediante el método de carga límite en condiciones de diseño son los siguientes

- Caso de carga 1: 1.5 (P + Ps + D)
- Caso de carga 2: 1.3 (P + Ps + D) + 1.1 W + 1.1 L
- Caso de carga 3: 1.3 (P + Ps + D) + 1.1 E + 1.1 L

Además, se deben considerar los dos escenarios siguientes en las condiciones de diseño:

- Secado 44.6 barG @ 80 °C
- Regeneración 12 barG @ 340 °C

Así, dado que la convergencia fue alcanzada en el análisis estructural de todos los casos de carga definidos anteriormente, se verifica la protección frente a colapso plástico por el método de carga límite en condiciones de diseño.

3.3.4.2 Evaluación de la protección frente a fallo local

Además de verificar la protección frente a colapso plástico, y según se indicó anteriormente, debe verificarse la protección frente a fallo local, la cual se realiza mediante un análisis elástico según el código ASME BPVC Sección VIII División 2.

El análisis elástico se realiza en condiciones de diseño, por tanto deben considerarse los dos escenarios posibles (secado 44.6 barG @ 80 °C; regeneración 12 barG @ 340 °C), y para la siguiente combinación de cargas:

$$\text{Caso de carga:} \quad P + P_s + D$$

De este modo, la protección frente a fallo local del equipo mediante un análisis elástico quedará demostrada si se cumple el siguiente criterio:

$$S_1 + S_2 + S_3 \leq 4S$$

La Tabla 17 resume los valores máximos obtenidos para cada uno de los componentes del equipo junto con su valor de comparación correspondiente.

Tabla 17. Valor de comparación frente a fallo local: 4S (MPa).

	SA-516 Gr. 60	SA-350 LF2 Cl1	SA-193 B7	S275 JR
	Envolvente, fondos y faldón	Bridas y cuello de tubuladuras	Pernos	Soportes de aislamiento
80 °C	474 < 550 MPa	477 < 619 MPa	624 < 911 MPa	105 < 660 MPa
340 °C	244 < 438 MPa	315 < 494 MPa	631 < 766 MPa	29 < 660 MPa

3.3.4.3 Evaluación de la protección contra el colapso por pandeo

La evaluación de la protección contra el colapso por pandeo en condiciones de diseño se llevó a cabo de acuerdo al código ASME BPVC Sección VIII División 2 por medio del método de análisis elástico.

Entonces, la aceptabilidad de un componente en el análisis de pandeo depende del valor del factor de diseño obtenido del Apartado 5.4.1 de ASME BPVC Sección VIII División 2. Si se utiliza un análisis elástico sin considerar no linealidades geométricas para determinar la pre-tensión en el componente, el factor de diseño mínimo se define como sigue:

$$\phi_B = \frac{2}{\beta_{CR}}$$

Donde β_{CR} es el factor reductor obtenido del Apartado 5.4.1.3 de ASME BPVC Sección VIII División 2, que para los cilindros no rigidizados bajo presión externa es 0.8. De este modo el factor de diseño obtenido para el equipo es de 2.5.

Condiciones de diseño

Según la Tabla 5.3 de ASME BPVC Sección VIII División, los casos de carga definidos para la evaluación frente a colapso por pandeo en condiciones de diseño (44.6 barG @ 80 °C & 12 barG @ 340 °C) son los siguientes:

Caso de carga 1:	P + Ps + D + L
Caso de carga 2:	0.9 P + Ps + D + 0.6 W
Caso de carga 3:	0.9 P + Ps + D + 0.7 E

En la Tabla 18 se recogen los valores propios del primer modo de pandeo obtenido para cada caso de carga en condiciones de diseño. Como se puede observar, dichos valores son superiores al mínimo factor de diseño, 2.5.

Tabla 18. Valores propios del primer modo de pandeo en condiciones de diseño.

	44.6barG @ 80°C			12barG @ 340°C		
	P+Ps+D +L	0.9P+Ps+D+0 .6W	0.9P+Ps+D+0 .7E	P+Ps+D +L	0.9P+Ps+D+ 0.6W	0.9P+Ps+D+ 0.7E
Modo 1	101.68	109.27	78.977	115.29	169.71	71.306

CONCLUSIONES

La ejecución del proyecto ha permitido poner en marcha una nueva línea de actividad para ITMA, en concreto para las Unidades de Mecánica Estructural (ME), Ingeniería (ING) e Integridad Superficial y Corrosión (ISC), por lo que se considera que se ha alcanzado el objetivo general del proyecto.

Inicialmente la metodología FFS fue desarrollada para la industria del petróleo, pero la Unidad ISC la está integrando en los programas de Gestión de la Corrosión (específicos de cada instalación industrial).

La unidad de Ingeniería (ING) ha aplicado las metodologías desarrolladas para el análisis de tensiones, además de para equipos de la industria petroquímica, en tanques de almacenamiento de sales en centrales termosolares de concentración *CSP*. Actualmente se está estudiando junto con la unidad de Mecánica Estructural (ME) la aplicación de estas metodologías para determinar la vida remanente de torres eólicas y poder así extender su vida en servicio.

Adicionalmente, la unidad de Mecánica Estructural (ME) está asesorando a sus clientes en la caracterización a fractura y fatiga de equipos a presión para el sector Oil & Gas de tal modo que puedan optimizar el diseño y proceso de fabricación de sus equipos según las indicaciones de la norma; así como en la caracterización acelerada de la vida a fluencia de tubos de caldera en industria petroquímica.