EFECTO DE LA FLUENCIA EN EL DISEÑO DE COMPONENTES DE CLASE NUCLEAR SOMETIDOS A ALTA TEMPERATURA



FERNANDO OLEO BLANCO
Ingeniero de sistemas nucleares y análisis termohidráulicos
EMPRESARIOS AGRUPADOS – GHESA

DEFORMACIONES Y FLUENCIA

Durante el diseño de sistemas nucleares, térmicos u otras industrias como la aeronáutica o fusión, se ha de tener en especial consideración la temperatura de operación de los sistemas y la variación de la misma durante transitorios. Las razones principales del tratamiento explícito de la temperatura son el cambio de las propiedades termo-mecánicas de los materiales y las cargas y deformaciones mecánicas que se generan al variar la temperatura de un sistema. En este artículo se tratará principalmente la variación de las propiedades mecánicas de los materiales en regímenes de alta temperatura, donde tiene lugar el efecto de la fluencia. En este artículo, se hará un resumen básico y general del código de diseño ASME Boiler and Pressure Vessel, sección III, División 5 [1]. Este código fue creado específicamente para tratar el diseño de sistemas nucleares de fisión donde la fluencia tiene lugar y no es despreciable. Pero antes de introducir las particularidades del código, se hace un refresco de las deformaciones en los materiales, el efecto de la fluencia y la interacción fluencia-fatiga.

Deformaciones elasto-plásticas

Cuando un material, un componente, etc. está sometido a un esfuerzo, se deforma. Un ejemplo sencillo sería el gancho que sujeta un cuadro. El gancho se deformará debido al peso del marco y el cuadro. Permanecerá en ese estado durante días, meses y años ya que la carga que sostiene no varía. Este tipo de deformaciones son denominadas elasto-plásticas, ya que no varían con el tiempo u otros parámetros excepto de los propios esfuerzos en el material, la carga y las condiciones ambientales. La deformación plástica se da cuando el límite elástico del material es sobrepasado y es aquella que permanecerá aunque la carga se retire. Por ello, las deformaciones plásticas son un tipo de deformación inelástica. La mayoría de diseños nucleares tradicionales y actuales en operación utilizan el modelo de deformaciones elasto-plástico para sus diseños y cálculos de SSCs (Systems, Structures and Components). El código americano principal para diseño de sistemas nucleares bajo el modelo elasto-plástico es ASME BPVC III Div. 1 [1]. Otro código de diseño muy extendido es el francés RCC-M [2].

Antes de introducir la fluencia es importante aclarar que, aunque las deformaciones en el modelo elasto-plástico no dependan del tiempo durante el cual el componente está sometido a un esfuerzo, hay otros efectos que sí dependen del tiempo y afectan a las deformaciones o propiedades mecánicas de los componentes. Los efectos más comunes son la oxidación, erosión y fatiga (aplicación de cargas cíclicas) de los componentes. En la industria nuclear también existe el endurecimiento o degradación de los materiales cuando estos están sometidos a un foco de radiación o flujo neutrónico. Todos estos efectos están cubiertos por los códigos de diseño mencionados o suplementarios. Los efectos referidos anteriormente, serán obviados en este artículo para permitir una discusión clara de la fluencia.

Reblandecimiento de los materiales metálicos con la temperatura

Otro efecto conocido de los materiales es su reblandecimiento cuando se calientan. Un componente que apenas se deforma a temperatura ambiente con cierto esfuerzo, puede verse deformado en gran medida si es calentado, pudiendo llegar a romper. En la industria metalúrgica se usa este efecto para la fabricación de piezas mediante la técnica de la forja, ya que los materiales son más fácilmente conformados a altas temperaturas. Para sistemas que operan a temperaturas moderadas, este efecto implica la necesidad de usar componentes más masivos, grandes y caros para poder so-

portar los estreses a los que se verán sometidos. La variación de las propiedades termo-mecánicas de los materiales con la temperatura está documentada en los códigos de diseño o en catálogos. Sin embargo, generalmente, aunque se opere a temperaturas superiores a las ambientales, las deformaciones que tendrán lugar en los componentes seguirán siendo elasto-plásticas.

Altas temperaturas y fluencia: deformaciones elasto-visco-plásticas

Las propiedades y comportamientos descritos anteriormente son válidos mientras el material o componente no operen a altas temperaturas. En el momento en el que un material es estresado a temperaturas elevadas, no solo se deformará elasto-plásticamente, sino que empezará a fluir. La propia palabra, fluencia, hace referencia al flujo, la deformación continua que tendrá el material según avance el tiempo, como un fluido que se mueve por un conducto. La fluencia también es conocida como la viscosidad del material, en este artículo, se usará el término de fluencia, creep en inglés. Este flujo del material tiene también la propiedad de ser una deformación inelástica, es decir, retirando la carga, no se recupera la forma original. La fluencia es altamente dependiente de la temperatura del material y de los estreses a los que está sometido el mismo. Generalmente, la fluencia tiene una dependencia exponencial con la temperatura y potencial o exponencial con los estreses y se suele representar como la derivada temporal de la deformación (ε̇).

Caso ideal: fluencia bajo esfuerzo constante

La presencia de la fluencia en el material indica que el material no solo se deformará una cantidad fija para un esfuerzo dado, sino que la deformación irá aumentando con el tiempo. En la **Figura 1** se comparan de forma cualitativa las deformaciones de un mismo componente sometido a un mismo esfuerzo constante a distintas temperaturas. Como se puede apreciar, las deformaciones iniciales (ε, ε' y ε'') serán mayores según se eleve la temperatura, pues el material se reblandece y es más fácil de deformar. Las deformaciones a temperatura ambiente y caliente son constantes en el tiempo una vez aplicada la carga "F" en un tiempo "t0". Para el caso de muy alta temperatura, donde ya tiene lugar la fluencia, la deformación irá aumentando con el transcurso del tiempo. Este aumento de la deformación se divide generalmente en tres fases: la fluencia primaria (I), secundaria (II) y terciaria (III). La fluencia primaria (I) es característica por ir disminuyendo su magnitud en el tiempo. Dicho de otra forma, el material fluye rápidamente tras ser sometido a esfuerzos, pero esta velocidad disminuye hasta alcanzar un valor estable. La fluencia secundaria (II), también conocida como fluencia mínima, es característica por ser constante en el tiempo. Finalmente, la fluencia terciaria (III) está relacionada con la fractura por fluencia y tiene lugar cuando el material ha fluido tanto, que han empezado a formarse grietas en el componente, generando concentraciones de tensiones, que a su vez estos hacen que el material fluya aún más rápido, haciendo crecer las grietas, causando un aumento de las tensiones, etc. Esta retroalimentación positiva entre el crecimiento de grietas y aumento de tensiones hará que la fluencia crezca rápidamente y el componente falle, indicado en el diagrama por una "X" a un tiempo "t*" de horas en operación.

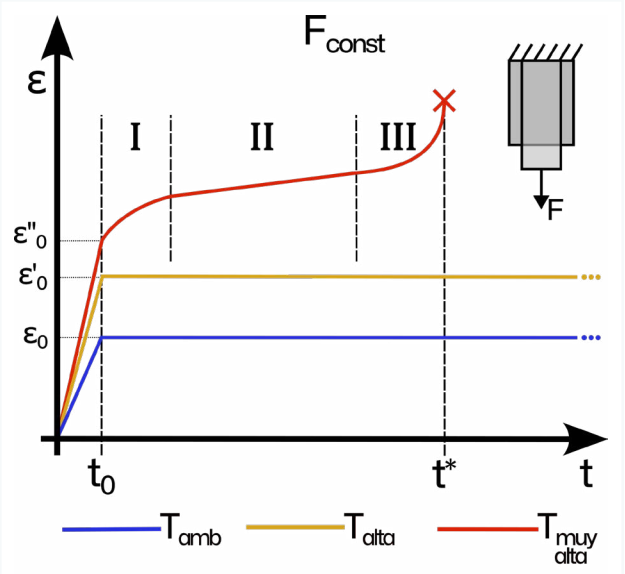

Figura 1. Esquema de la evolución temporal de la deformación bajo carga constante a distintas temperaturas.

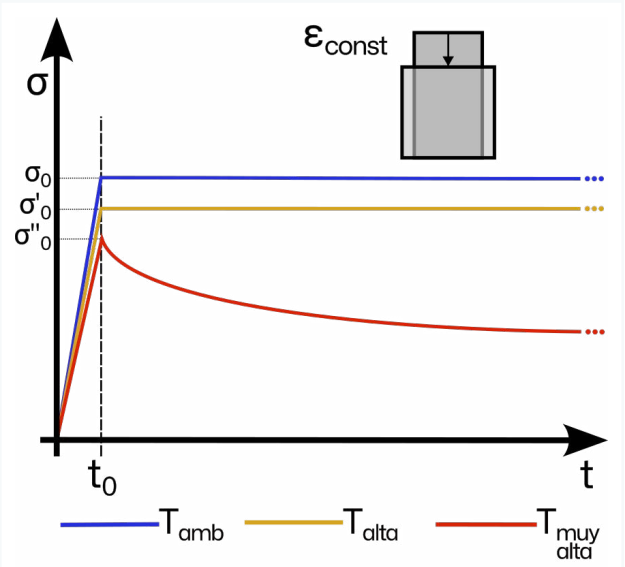

Figura 2. Esquema de la evolución temporal de los estreses bajo deformación constante a distintas temperaturas.

La evolución de la deformación bajo fluencia indica que el flujo material tendrá lugar a favor de los estreses y fuerzas aplicadas. Por lo tanto, ya que el componente se deformará más según pasen las horas, la fluencia se puede asemejar a una reducción progresiva de las propiedades mecánicas en función del tiempo. Este cambio equivaldría a una degradación de la capacidad estructural del componente. El código ASME BPVC III Div. 5 refleja esta observación reduciendo las tensiones permitidas para los materiales en función del tiempo de operación para la temperatura analizada.

Caso ideal: fluencia bajo deformación constante

Contrastando con el caso anterior, donde la carga es constante para un componente ficticio, está el caso en el que una deformación constante es impuesta. Esta configuración está indicada en la **Figura 2**, donde se mide

la evolución de las tensiones en el tiempo. En este nuevo caso se observa que las tensiones son constantes en el tiempo para los casos de temperatura ambiente y caliente. Para el componente sometido a alta temperatura, las tensiones se ven reducidas con el paso del tiempo. Se puede apreciar que la reducción de tensión satura en una cantidad dada, no nula, ya que el material fluye cada vez más lentamente según menores sean las tensiones. También se puede apreciar que el componente no rompe, independientemente del tiempo que transcurra. Por ello, este tipo de cargas son consideradas "secundarias" (Q) por la Div. 5, ya que estas cargas nunca llevarán los componentes a ruptura si esta no ocurre al inicio. Este efecto, la reducción de los estreses en el caso de deformaciones constantes, es el que da otro sinónimo a la fluencia: "efecto de relajación de tensiones" *(stress relaxation effect)*. Sin embargo, aunque el material fluya reduciendo sus estreses, su vida útil es consumida, ya que su capacidad estructural se ve reducida. Por lo tanto, es necesario limitar o minimizar la cantidad de fluencia que tiene lugar en un componente.

Interacción fatiga – fluencia

La fatiga daña el material con el número de ciclos que resiste. Por lo tanto, un material que trabaja a fatiga ha de diseñarse teniendo en cuenta los límites de ciclos de fatiga para la vida útil que se le quiere dar. La interacción fatiga – fluencia, conocida en inglés como Creep – Fatigue Interaction (CFI), es el estudio de la vida útil de los materiales cuando estos trabajan tanto a fatiga como a régimen de fluencia. Como se ha indicado anteriormente, la fluencia reduce la vida útil, disminuye la capacidad estructural del material; lo que supone una consecuencia similar al efecto negativo de la fatiga. Cuando la fluencia y fatiga se dan durante el uso de un componente, la vida útil se verá reducida sustancialmente. Es importante indicar que no es necesario que la fatiga y la fluencia se den concurrentemente, lo importante para estudios de interacción es si ambos efectos tienen lugar. Normalmente, el análisis de CFI requiere el cómputo del daño que sufre el material por fluencia y el daño que sufre por fatiga. La suma de estos daños tiene que ser menor que unos límites indicados, que dependen de cada material y código de diseño. En la **Figura 3** se indican las curvas límites para la suma de daño admitido por la Div. 5.

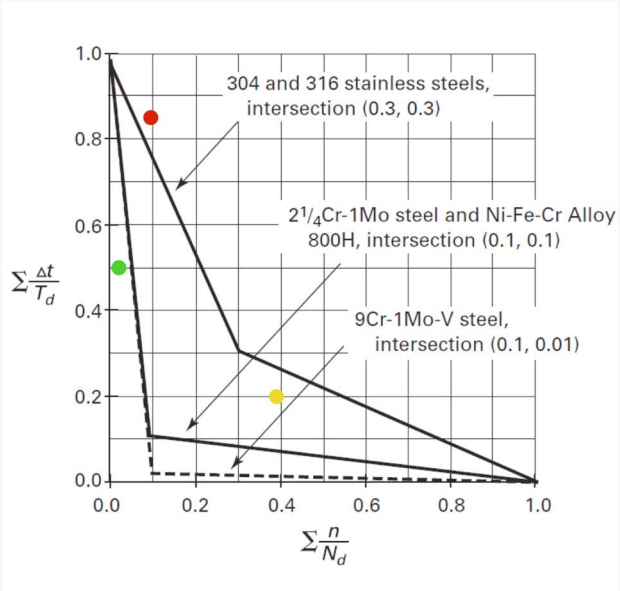

Figura 3. Envolvente del daño por interacción fatiga – fluencia. Los ejes indican el daño acumulado por fatiga (abscisas) y fluencia (ordenadas). Se representan tres casos ejemplares: el punto rojo supera los límites de daño admisibles, el amarillo solo sería aceptable si se usan los aceros 304 o 316 y el verde entraría dentro de los límites de cualquier material. Fuente ASME III Div. 5 (2021), Figura HBB-T-1420-2.

Modelización de la fluencia y efectos viscosos

Modelos matemáticos

Desde principios del siglo XX, se ha estudiado la fluencia y se han propuesto modelos matemáticos con el objetivo de modelarla. Una de las primeras leyes de comportamiento fue propuesta en 1910 por Andrade para la descripción de la fluencia primaria [3]. En 1929 Norton [4] propuso un modelo para la fluencia secundaria en sistemas unidimensionales, siendo generalizada a estados multiaxiales por Odqvist [5] en 1934. Desde entonces, se han ido refinando los modelos para distintos tipos de materiales, rangos y periodos de fluencia (I, II y/o III), tiempo para ruptura y distintos tipos de comportamientos de los elementos metálicos: plasticidad, endurecimiento cinemático, kinemático, etc. Un extracto de la formulación del modelo de fluencia para el acero 316(H) según ASME III Div. 5, anexo HBB-T-1832 está indicado en la ecuación (1), donde queda evidenciada la dependencia exponencial-potencial de la fluencia respecto a las tensiones (σ) y exponencial respecto a la temperatura (T), indicada por el término de Arrhenius.

$$\dot{\varepsilon}_m = A\left[sinh\left(\frac{145.037681\beta\sigma}{n}\right)\right]^n \frac{-Q}{e^{R(T+273.15)}} \quad (1)$$

Diagramas isócronos

Una forma más intuitiva y directa para calcular el efecto de la fluencia y capacidad estructural de componentes durante su análisis y diseño, es el uso de ábacos isócronos. Los ábacos están generados a partir de tests de fluencia y se crean para cada material y una temperatura dada. Su uso es muy intuitivo ya que se pueden interpretar como curvas de tracción realizadas a velocidades cada vez más lentas. La **Figura 4** muestra el ábaco para el acero inoxidable 316(H) a 677 ºC. En este diagrama se han indicado dos líneas referenciando las dos situaciones ideales presentadas anteriormente: la azul, para el caso de estrés constante y la naranja, representando el caso de deformación constante. En el ejemplo de estreses constantes, se comienza el estudio cuando el material se estresa inicialmente (curva *"Hot tensile"*) a 138 MPa y por ello se deformará unos 0.3%. Manteniendo el estrés constante, nos desplazamos hacia la derecha, en el eje de abscisas creciente, y las intersecciones con las curvas tensiles indicará cuánto más se ha deformado según haya transcurrido ese tiempo. Esto resultará en que el material se deformará 0.65% al transcurrir una hora, 0.85% a las tres horas, 1.35% a las diez horas y aproximadamente 2.3% a las treinta horas. Si el material se mantuviera estresado durante más tiempo, se puede estimar que ya no habrá

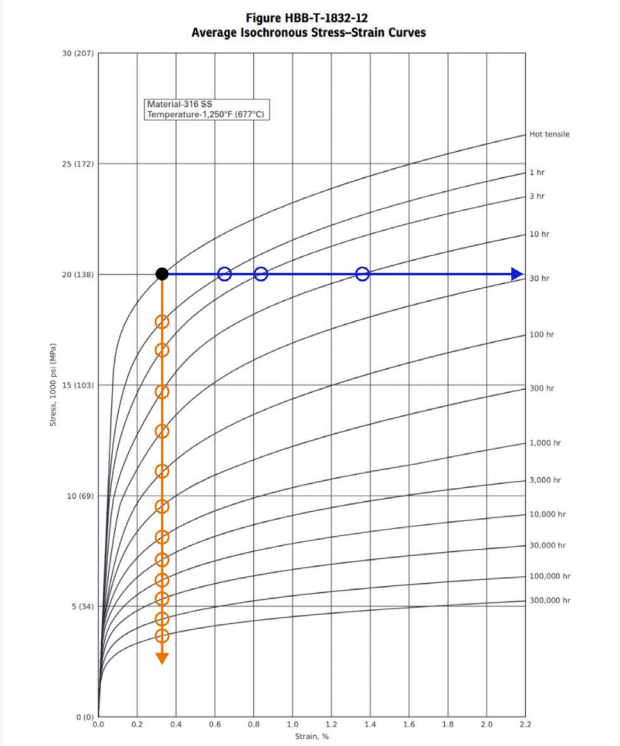

Figura 4. Diagrama isócrono del acero 316(H) a 677 °C. La línea azul indica el caso ideal de tensión constante y la naranja el caso ideal de deformación constante. Fuente ASME III Div. 5 (2021).

una curva de tracción con mayor duración que alcance ese nivel de estreses, lo que indica que el componente fallará por fluencia excesiva. Para el caso de deformaciones constantes se sigue un procedimiento similar. Inicialmente el componente estaría deformado 0.3% y resistiría una carga de 138 MPa. En este caso, debido a la relajación de estreses que tiene lugar, la curva se desplaza negativamente en el eje de ordenadas. El componente, después de fluir durante una hora soportaría unos 118 MPa, a las treinta horas de 100 MPa, a las mil horas de operación 55 MPa aproximadamente, etc.

Es importante indicar que los casos reales de cargas y deformaciones estarían contenidos en el cuadrante delimitado por los dos casos ideales. Para el caso de transitorios térmicos tendrían que usarse varios diagramas isócronos para capturar fidedignamente el comportamiento del material.

DISEÑO DE COMPONENTES SEGÚN ASME BPVC III, DIV. 5

Orígenes, Aplicación y Estructura de la División 5

La American Society of Mechanical Engineers, creó la División 5 de su código Boiler and Pressure Vessel Components para tratar el diseño de sistemas nucleares de fisión donde la fluencia tiene lugar y no es despreciable, y los efectos cruzados entre la fluencia y la fatiga.

El antiguo apartado NH de la División 1, que cubría los diseños a temperaturas superiores a las admitidas en la Div. 1, se unió con las reglas de diseño de grafito, dando lugar a la nueva División 5 en la edición 2011 del ASME BPVC. El uso de la Div. 5 ha de hacerse siempre que los componentes nucleares estén en régimen de fluencia, aunque para componentes de clase B, clase 2 según Div. 1, existen ciertas excepciones. Se considera régimen de fluencia todos los componentes que estén a temperaturas superiores de las indicadas en la tabla HAA-1130-1 de la Div. 5, reproducida aquí en la Tabla I. Otro código usado en la industria que trata diseños de alta temperatura es el RCC-MRx [6], usado por ejemplo en ITER.

Debido a su origen, la División 5 no es un código autoexplicativo, donde se exponen todas las indicaciones y aspectos necesarios, sino que se apoya en el contenido que ya está presente en la División 1. Por ello, la Div. 5 está estructurada siguiendo los mismos apartados que las subsecciones NB, NC, NF y NG de la Div. 1. También se apoya continuamente en las subsecciones NCA y NCD para los requisitos de calidad. Esta estructura facilita la identificación de la información a la que sustituye, amplia o mantiene de la Div. 1. La Div. 5, además de extender el rango de temperaturas para el diseño de componentes nucleares metálicos, incluye materiales no metálicos, principalmente el grafito y algún material compuesto; y es aplicable a cualquier tipo de reactor: sales o metales fundidos, gases, espectro rápido, lento, etc.

Material	Tmax, ºC (ºF)
Aceros al carbono	370 (700)
Aceros de baja aleación	370 (700)
Aceros inoxidables martensíticos	370 (700)
Aceros inoxidables austeníticos	425 (800)
Aleaciones Níquel-Cromo-Hierro	425 (800)
Aleaciones Níquel-Cobre	425 (800)

Tabla 1.Temperatura (Tmax) a partir de la cual hay que tener en cuenta la fluencia (ASME III Div. 5).

La Div. 5 tiene las siguientes subsecciones: HA para requisitos generales, HB para componentes barrera de presión de Clase A, HC para componentes barrera de presión de Clase B, HF para soportes metálicos de Clase A y B, HG para soportes del reactor de Clase SM y finalmente, HH para componentes no metálicos en el reactor. Las subsecciones HB a HG tienen dos subapartados, A, para diseños a baja temperatura, y B, para diseños de alta temperatura.

Diseño de componentes metálicos de Clase A

La clasificación de esfuerzos descrita en la Div. 5 sigue la misma metodología que la Div. 1 y sección VIII: descompone los esfuerzos primarios en locales (PL), de flexión (Pb), membrana (Pm), pico o concentrados (F). Los esfuerzos primarios pueden llevar a ruptura el componente. Los esfuerzos secundarios (Q), se son generalmente autolimitantes y se reducen con la deformación del material. La particularidad de la Div. 5 está en la definición de los parámetros materiales que han de usarse en los cálculos. La Div. 5 usa los parámetros de intensidad de estreses S0 y Sm, equivalentes a S y Sm en la Div. 1 y sección II, para el diseño SSCs. Estos parámetros dependen únicamente de la temperatura. Para el análisis del sistema durante su servicio, la Div. 5 utiliza los parámetros St, Smt, Sr y εt. Son estos valores los que de-

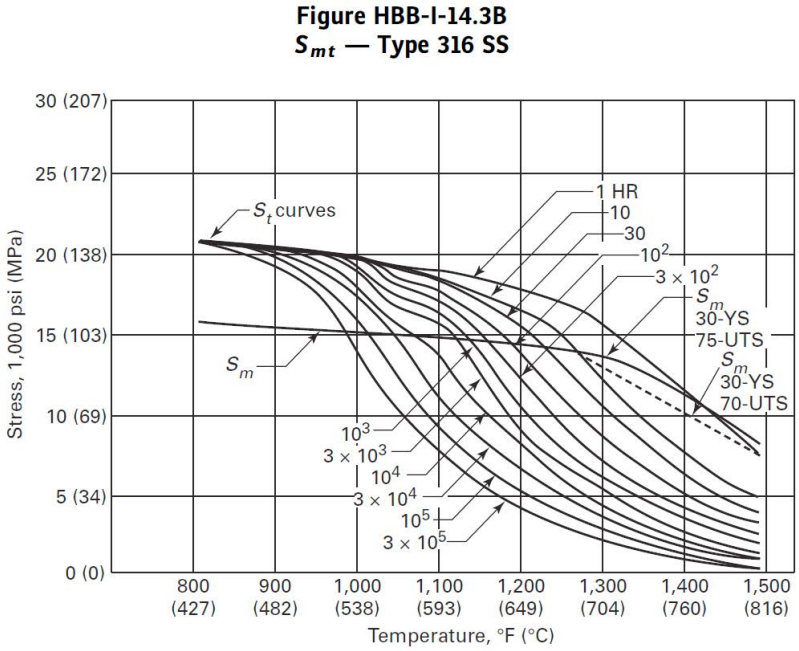

Figura 5. Curvas Sm, St para el acero inoxidable 316(H). Los valores del parámetro Smt es el menor de ambas curvas con un factor de reducción a altas temperaturas. Fuente ASME III Div. 5 (2021).

penderán tanto de la temperatura del análisis como el tiempo de vida útil que se le quiera dar al componente. Un ejemplo de Sm, St, Smt está indicado en la **Figura 5**. Sr es la intensidad de estreses máxima permitida en caso de accidente severo y está directamente relacionada con el tiempo a ruptura del material por fluencia terciaria (III). εt es el rango máximo de deformaciones del material debido al efecto de cargas cíclicas. Excepto para casos severos, la Div. 5 limita la deformación por esfuerzos de membrana al 1%, de flexión al 2% y locales al 5%, de ahí que la **Figura 4** no muestre valores mayores de deformación que el 2.2%. Los límites de deformación son la suma total de la elongación elástica, plástica y fluencia. La Div. 5 también requiere cálculos de Interacción Fatiga – Fluencia y de pandeo. Debido a que el diseño de componentes por el método elástico es bastante limitante, la Div. 5 introduce modelos y describe métodos de cálculo inelásticos, descritos en los apéndices HBB-T y HBB-Z (edición 2023).

Debido la cantidad de propiedades que se han de conocer sobre los materiales, la Div. 5 limita la Clase A, para aceros de baja aleación 2¼Cr-1Mo y 9Cr-1Mo-V; inoxidable 304 y 316; y el INCOLOY® 800H. También limita los materiales de aportación en soldadura y el tipo y tamaño de las mismas.

CONCLUSIONES

Además de lo aquí explicado, existen otros muchos aspectos no cubiertos que hay que tener en cuenta para el diseño real de reactores de alta temperatura. Hay que considerar el aislamiento térmico del sistema, lo que lleva complicaciones de espacio y montaje. Algunos diseños tendrán que ser precalentados, lo que añade complejidad al sistema y su operación. Operar a tan altas temperaturas obliga a que el soportado del sistema permita una gran expansión térmica, pero aun así ha de soportar y proteger a los circuitos en casos de sismo o disrupción… Por ello, el diseño final requerirá un análisis iterativo, laborioso y exhaustivo.

En este corto artículo se ha introducido el fenómeno de la fluencia y el impacto que tiene sobre los materiales. Para ello se han dado pinceladas sobre el ASME BPVC III Div. 5, introduciendo su estructura y contenido. Sin embargo, nuestra pequeña aportación no hace justicia a las 700 páginas de código. De ahí que el autor recomiende al lector leer el libro en la referencia [7].

REFERENCIAS

[1] ASME BPVC Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 5-High Temperature Reactors. The American Society of Mechanical Engineers.

[2] AFCEN RCC-M, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands.

[3] Andrade Edward Neville Da Costa, «On the viscous flow in metals, and allied phenomena», Proceedings of the Royal Society, Londres, Reino Unido, 1910.

[4] F. H. Norton, The Creep of Steel at High Temperatures, 1929.

[5] F. K. G. Odqvist, «Creep stresses in a rotating disc», Proceedings of the Fourth International Congress for Applied Mechanics, Cambridge, Reino Unido, 1934.

[6] AFCEN RCC-MRx, Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations: High-Temperature, Research and Fusion Reactors.

[7] Maan H. Jawad y Robert I. Jetter, Design & Analysis of ASME Boiler and Pressure Vessel Components in the Creep Range, 2022. ■

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a la Sociedad Nuclear Española (SNE) por premiar la ponencia en la Reunión Anual de 2024, en Córdoba, de este mismo artículo.