PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE FATIGA EN EL RPR DEL REACTOR NUCLEAR CAREM 25

Raúl Ignacio Bustos

Dr. Carlos P. González Ferrari
Director

Ing. Federico Hermida
Co-director

Miembros del Jurado
Dr. Alejandro Yawny (Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche)
Ing. Agustín Rauschert (Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche)

Junio de 2015

Departamento de modelística – Área Mecánica– Gerencia CAREM

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

A mis padres, Roque y Liliana.
A mis hermanas, Julieta y Virginia.
A mis amigos, los viejos y los nuevos.

Índice de símbolos

RPR: Recipiente de Presión del Reactor.

$ASME$: American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de ingenieros mecánicos).

$B\&PVC$: Boiler and Pressure Vessel Code (Código de calderas y recipientes de presión).

$CAREM$: Central ARgentina de Elementos Modulares.

ODB: Output Database (Base de datos de salida).

DBA: Design By Analysis (Diseño por análisis).

GV: Generador de Vapor

σ: Tensión (Stress).

ε: Deformación (Strain).

E: Módulo de elasticidad del material (o Módulo de Young).

UTS: Ultimate tensile stress (Tensión última o resistencia a la tracción).

λ, μ: Parámetros de *Lamé*.

HCF: High-Cycle Fatigue (Fatiga de alto número de ciclos).

LCF: Low-Cycle Fatigue (Fatiga de bajo número de ciclos).

S_a: Intensidad de tensiones alternante.

n: Número de aplicaciones de ciclo.

N: Número de ciclos admisibles (obtenidos a partir de la curva de fatiga).

U: Factor de uso (Usage factor).

CUF: Cumulative Usage Factor (Coeficiente de daño acumulado).

$\boldsymbol{\sigma}$: Tensor de tensiones simétrico o Tensor de *Cauchy*.

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Tensor de pequeñas deformaciones.

$\boldsymbol{u}$: Campo vectorial de desplazamientos.

σ_{ij}: Componente del tensor de tensiones correspondiente a la fila i, columna j.

ε_{ij}: Componente del tensor de pequeñas deformaciones correspondiente a la fija i, columna j.

$RFCM$: Rainflow Counting Method (Método de conteo por Rainflow).

$LCCM$: Level-Crossing Counting Method (Método de conteo por cruce de nivel).

PCM: Peak Counting Method (Método de conteo por picos).

Índice de contenidos

Índice de símbolos **v**

Índice de contenidos **vii**

Índice de figuras **ix**

Índice de tablas **xi**

Resumen **xiii**

Abstract **xv**

1. Introducción **1**

1.1. Descripción de la tesis 3

2. Proyecto CAREM 25 **5**

2.1. Generalidades 5

2.2. Motivación de la presente tesis 7

3. Generalidades sobre fatiga **9**

3.1. El proceso de falla por fatiga 10

3.2. Sobre los estados de carga fluctuantes 10

3.3. Enfoques en el estudio de la fatiga 12

3.4. Fatiga de alto y bajo número de ciclos 12

3.5. Análisis de fatiga de acuerdo a ASME 15

3.5.1. Introducción 15

3.5.2. Procedimiento de cálculo de las diferencias de tensiones 17

3.5.3. La curva de diseño a la fatiga 19

3.5.4. Determinación del CUF 21

3.5.5. Consideraciones sobre el análisis para operación cíclica 21

4. Análisis de fatiga para un estado de carga **25**

4.1. Introducción 25

4.2. Formulación matemática del problema de elasticidad 3D y el MEF . . . 27
4.3. Sobre la elaboración de modelos usando Abaqus 30
4.4. Simulaciones de estados de carga de operación normal y anormal en el RPR 32
4.4.1. Descripción general 32
4.4.2. Sobre el mallado 32
4.4.3. Sobre los estados de carga 34
4.4.4. Resultado de la simulación en el RPR 35

5. Análisis de fatiga para múltiples estados de carga 39
5.1. Nociones generales 39
5.2. Métodos de conteo de ciclos 42
5.2.1. Método de Rainflow (RFCM) 42
5.2.2. Método de conteo por picos (PCM) 44
5.2.3. Método por cruce de nivel (LCCM) 45
5.3. Procedimiento general para la determinación del CUF 46
5.4. Análisis de fatiga en el RPR 47
5.4.1. Criterios adoptados 47
5.4.2. Aplicación de la metodología a un ejemplo sencillo 48
5.4.3. Simulaciones en el RPR 53
5.4.4. Sobre la aplicabilidad del modelo elástico lineal 57

6. Conclusiones 63

A. Scripts de Python 65
A.1. Análisis de fatiga para un estado de carga 65
A.2. Análisis de fatiga para múltiples estados de carga 71

Bibliografía 81

Agradecimientos 83

Índice de figuras

2.1. Esquema del recipiente de presión del reactor nuclear CAREM 25 . . . 6

3.1. Carga fluctuante sinusoidal y sus parámetros característicos 10
3.2. Carga variable real caracterizada por puntos de reversión. 12
3.3. Comportamiento tensión-deformación. Ciclo de histéresis estacionario asociado a ensayos por control de deformación. 14
3.4. Fatiga de alto y bajo número de ciclos. Variaciones de deformación elástica y plástica. 16
3.5. Curva S_a-N de diseño a la fatiga típica. 20

4.1. Esquema del Recipiente de Presión del Reactor. Detalle en zona de acometida. 33
4.2. Modelo tridimensional de elementos finitos. Detalle en zona de acometida. 33
4.3. Tipos de elementos asociados a geometrías tridimensionales. 34
4.4. Simulación de un estado de carga en el RPR. 36
4.5. Esquema simplificado de la estructura interna de un archivo de base de datos de salida. 37

5.1. Ejemplo de aplicación del método de Rainflow. 43
5.2. Ejemplo de aplicación del método de conteo por picos. 44
5.3. Ejemplo de aplicación del método de conteo por cruce de nivel. 45
5.4. Metodología general de análisis. 47
5.5. Ejemplo de aplicación del algoritmo de cálculo del CUF. 48
5.6. Variación temporal de la carga en el extremo libre. 49
5.7. Resultado de la simulación (por elementos) en un ejemplo simple. . . . 49
5.8. Ejemplo de aplicación del algoritmo: comparación entre un análisis llevado a cabo con los valores de tensión tomados en el baricentro de cada elemento y en los nodos de cada elemento. 50
5.9. Análisis en un elemento particular. 50
5.10. Variación temporal de las componentes del tensor de tensiones y de la tensión de Tresca, para el elemento bajo análisis, en cada evento. 51

5.11. Variación temporal de la diferencia de tensiones extrema, para el elemento bajo análisis, en ambos eventos. 52
5.12. Análisis de fatiga en un set de elementos del RPR, asumiendo un par de estados de carga. 54
5.13. Análisis de fatiga en un set de elementos del RPR, asumiendo tres estados de carga. 55
5.14. Resultados en un set de elementos del RPR, asumiendo tres estados de carga catastróficos. 56
5.15. Variación temporal de las componentes del tensor de tensiones y de la tensión equivalente de Tresca del elemento considerado, en cada evento. 57

Índice de tablas

3.1. Tipos de cargas fluctuantes elementales. 11

4.1. Materiales normalizados presentes en el RPR. 32

5.1. Ejemplo de aplicación: tabla final del método de Rainflow 44
5.2. Identificación de picos y valles 53
5.3. Cálculo del CUF aplicando el método de conteo por picos modificado. . 53

Resumen

Los componentes nucleares sometidos a la aplicación de cargas mecánicas y condiciones térmicas variables requieren de un apropiado análisis de *fatiga* para asegurar su integridad estructural una vez aplicados los ciclos contemplados en las especificaciones de diseño.

A tal fin, el código ASME establece, en su sección III, la metodología general de análisis de acuerdo al tipo de carga, a las condiciones de servicio y a las características de los materiales implicados. Al ser la fatiga un fenómeno multiparamétrico fuertemente asociado a la historia termomecánica del componente, dicha historia debe encontrarse disponible al momento de efectuar el análisis.

La presente tesis expone la metodología empleada en el *análisis de fatiga* del RPR del reactor nuclear CAREM 25, así como los criterios y métodos empleados para el caso de múltiples estados de carga, valiéndose para ello de la historia termomecánica resultante del análisis por elementos finitos llevado a cabo en el programa comercial *Abaqus*.

Palabras clave: FATIGA, RECIPIENTE DE PRESIÓN DEL REACTOR (RPR), CAREM 25, ASME

Abstract

The nuclear components which are submitted to the application of variable mechanical loads and thermal conditions requires of a proper *fatigue* analysis to ensure its structural integrity once applied the cycles described in the design specifications.

To this end, the ASME code establishes, in section III, the general methodology of analysis according to the load type, the service conditions and the characteristics of the involved materials. Being fatigue a multi-parametric phenomenon strongly related to the thermomechanical history of the component, such a history must be available at the moment of carry out the analysis.

The present thesis exposes the methodology applied in the *fatigue analysis* of the RPV of the CAREM 25 nuclear reactor, as well as the applied criteria and methods for the case of multiple load states, using for this purpose the thermomechanical history resultant of the finite elements analysis carried out at the commercial program *Abaqus*.

Keywords: FATIGUE, REACTOR PRESSURE VESSEL (RPV), CAREM 25, ASME

Capítulo 1

Introducción

"La plus grande vertu de l'homme est peut-être la curiosité."
— Anatole France - La vie littéraire (1888-1892)

La idoneidad de un componente sujeto a un nivel de servicio que involucra la aplicación cíclica de cargas mecánicas, de origen térmico o puramente mecánico, cuyo nivel no es suficiente para provocar la falla del material, debe evaluarse en el marco del análisis de tensiones y la teoría de fatiga.

La ciencia de materiales define a la *fatiga* como un daño estructural localizado y progresivo que ocurre cuando un material es sujeto a cargas fluctuantes susceptibles a producir fisuras. Múltiples factores afectan a la resistencia a la fatiga, esto es, al número de ciclos necesarios para la formación de fisuras, a saber: las condiciones geométricas del componente solicitado, las características superficiales y las condiciones del medio [1]. Finalizada la etapa de iniciación, tiene lugar la etapa de extensión o propagación (crecimiento estable de fisuras) que eventualmente culmina con la rotura del componente. Si bien este enfoque no considera las fisuras previas a la aplicación de las cargas cíclicas, esto es, las que son consecuencia directa del proceso de fabricación, resulta útil como aproximación al comportamiento real de materiales con fallas iniciales poco significativas.

La fatiga constituye una de las causas más frecuentes de falla en recipientes de presión [2], por lo que su prevención resulta esencial para preservar la *integridad estructural* del componente, salvaguardando así vidas humanas y bienes materiales.

El código ASME (*American Society of Mechanical Engineers* o Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) fue una de las primeras normas internacionales de estandarización en tratar en forma explícita el diseño de componentes sometidos a cargas fluctuantes, previniendo así el uso de detalles de diseño y fabricación inapropiados para servicios cíclicos [2].

Las pautas de diseño y verificación de componentes nucleares sometidos a cargas cíclicas se encuentran detalladas en la sección III de ASME (*Boiler and Pressure Vessel*

code - B&PVC). En general, la aceptación del diseño o verificación de un componente cargado se basa en que la intensidad de tensiones (definida de acuerdo a alguna tensión equivalente) en cada punto del componente no exceda un valor límite establecido. Dicho límite difiere dependiendo del tipo de tensiones involucradas en el cálculo de la intensidad de tensiones. Sin embargo, en el caso de una aplicación cíclica de cargas mecánicas variables de distintos orígenes cuyas intensidades no comprometen al componente, resulta útil considerar el número admisible de ciclos sin que se produzca la falla del componente cargado y definir un indicador de nivel de servicio apropiado. Dicho indicador recibe el nombre de *coeficiente de daño acumulado* y se calcula en cada punto del componente, a partir de la intensidad de tensiones en ese punto (dependiente de la historia termomecánica) y las características del material. En general, el daño acumulado en determinado punto del componente cargado, resulta de la *superposición* de múltiples estados de carga termomecánicos, y para que el componente no falle debe verificarse que el daño acumulado sea, en todos los puntos, inferior a la unidad.

El presente trabajo expone la metodología necesaria para efectuar el *análisis de fatiga* en el recipiente de presión del reactor nuclear CAREM 25 (un proyecto argentino cuyo diseño integrado ubica a los dispositivos de control, los mecanismos hidráulicos que accionan las barras de control y los generadores de vapor dentro del recipiente de presión), de acuerdo a los lineamientos del código ASME III. Dicho análisis involucra:

1. La determinación de la evolución temporal del campo de tensiones resultante de la aplicación secuencial de múltiples estados de carga termomecánicos, mediante la utilización del programa comercial de análisis por elementos finitos *Abaqus*.

2. El *postproceso* de los datos obtenidos de acuerdo a la metodología de diseño por análisis establecida en el código ASME III, que incluye la utilización de curvas características de naturaleza empírica propias de los materiales que conforman al RPR.

3. La visualización del campo de daño acumulado, de acuerdo a las consideraciones propias sobre la frecuencia e interacción de los estados de carga cíclicos aplicados.

El eje central de este análisis, se basa en el desarrollo de una herramienta computacional capaz de extraer los datos del *archivo de base de datos* (ODB: *output database*) generado por *Abaqus*, efectuar el análisis de postproceso de acuerdo a ASME III, y generar un campo escalar de daño acumulado al finalizar dicho análisis. La extracción e incorporación de datos en el ODB, así como el análisis de postproceso, se lleva a cabo mediante *scripts* en el lenguaje de programación orientado a objetos *Python*. Cabe mencionar que dicho análisis puede efectuarse en cualquier lenguaje de programación interpretrado que cuente con una colección de algoritmos numéricos asociados al álgebra lineal (*Scilab*, *Octave*, etc.).

1.1. Descripción de la tesis

En el presente trabajo se expone la metodología de análisis de fatiga aplicada al RPR del prototipo CAREM 25, bajo los lineamientos del código ASME III (B&PVC). La presentación del mismo consta de 6 (seis) capítulos, que se detallan a continuación:

- Capítulo 1, *Introducción*: Aquí se describe el objetivo del trabajo, los lineamientos generales y la organización de la tesis.
- Capítulo 2, *Proyecto CAREM 25*: En este capítulo se desarrollan los aspectos generales del prototipo de reactor nuclear integrado CAREM 25 y se describe la motivación del presente trabajo.
- Capítulo 3, *Generalidades sobre fatiga*: En este capítulo se desarrolla la teoría general sobre fatiga y se describe el enfoque brindado por el código ASME para el análisis de componentes nucleares sometidos a cargas cíclicas.
- Capítulo 4, *Análisis de fatiga para un estado de carga*: Aquí se exponen la metodología de cálculo y los resultados de la simulación correspondiente a un estado de cargas determinado. Se expone también una descripción del modelo empleado en el análisis por elementos finitos llevado a cabo en el programa comercial Abaqus.
- Capítulo 5, *Análisis de fatiga para múltiples estados de carga*: Aquí se exponen los resultados obtenidos bajo la aplicación de múltiples estados de carga termomecánicos, explicitando los modos de cálculo y las técnicas de análisis aplicadas en la combinación de los estados de carga. Además, se describe el criterio de validación del modelo elástico lineal, mediante las técnicas del DBA.
- Capítulo 6, *Conclusiones*: En este capítulo se establecen las conclusiones obtenidas a partir de la interpretación de los resultados.

Posteriormente, en un apéndice, se incluyen los *scripts* de *Python* correspondientes al análisis completo de fatiga en el RPR (extracción de datos del .odb, análisis de acuerdo a los lineamientos de ASME III, y escritura de datos en el .odb), para distintos números de estados de carga.

Capítulo 2

Proyecto CAREM 25

2.1. Generalidades

El reactor CAREM (sigla de Central ARgentina de Elementos Modulares) es un proyecto argentino de central nuclear de baja potencia (25 MWe), cuyo diseño innovador la encuadra entre las denominadas *centrales de última generación*. Sus características de diseño posibilitan su aplicación en el abastecimiento energético a regiones aisladas, en la provisión de energía para la desalinización de agua marina, en la investigación científica y en la formación de personal técnico calificado en la operación de centrales nucleares.

La principal característica del reactor CAREM es que se trata de un reactor *integrado*, esto es: tanto el circuito primario (núcleo, generadores de vapor y refrigerante primario), como los mecanismos de control (de reactividad y de accionamiento de las barras de control) y parte del circuito secundario, se encuentran contenidos en el recipiente de presión del reactor (RPR), circulando el refrigerante primario (agua liviana que también funciona como moderador) por el interior del RPR debido a un fenómeno de convección natural y no por la implementación de bombas de circulación. El no usar bombas implica que no es necesario el uso de generadores eléctricos de emergencia que deban proveer energía para el funcionamiento de las mismas (en casos especiales de operación) o de sistemas de control asociados a la seguridad, como es habitual en los reactores tradicionales [3] [4].

La utilización de *sistemas de seguridad pasivos*, esto es sistemas que no requieren órdenes humanas ni de sistemas de instrumentación y control para su actuación, sino que funcionan por principios físicos elementales, incrementan los niveles de seguridad del reactor CAREM, convirtiéndolo así en un reactor más seguro que los reactores convencionales. Este incremento de seguridad se debe a las características de diseño que descartan eventos que podrían llevar al sistema a condiciones accidentales, a saber: la ausencia de tuberías en el circuito primario descarta la ocurrencia de pérdida de

refrigerante por rotura de alguna de tales tuberías, la eliminación de bombas hidráulicas permite prescindir de generadores auxiliares de emergencia y la eliminación del presurizador permite omitir sistemas de instrumentación y control adicionales.

La Figura (2.1) muestra una representación simplificada y en corte, del recipiente de presión del reactor (RPR) [5]. El mismo consiste en 12 (doce) generadores de vapor, con 6 (seis) camisas tubulares cada uno, un núcleo central con elementos combustibles de uranio levemente enriquecido (UO_2 con $1,8\,\%$ y $3,1\,\%$ de enriquecimiento de ^{235}U) por donde asciende el fluido de trabajo primario por convección natural, descendiendo luego por la zona de los generadores de vapor, y un domo superior cuya función es operar como autopresurizador y controlar la temperatura.

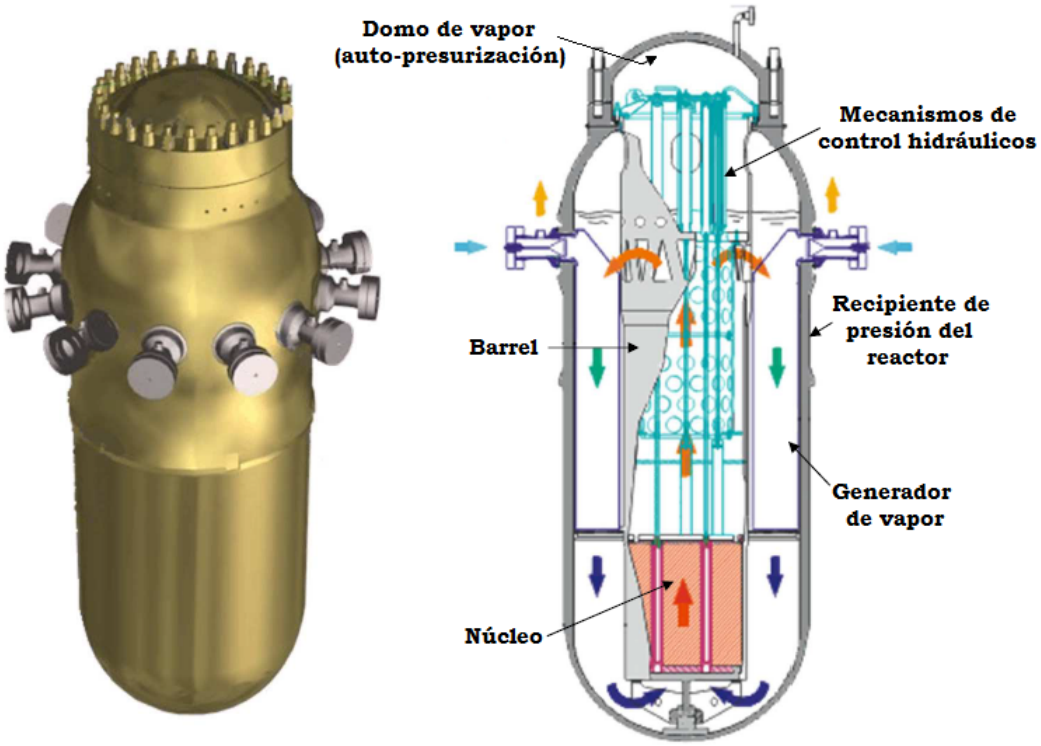


Figura 2.1: Recipiente de presión del reactor nuclear CAREM 25.

El reactor CAREM 25 dispone además, de dos conjuntos de barras de control, uno que actúa durante las maniobras de operación normal (sistema de ajuste y control), insertando o retirando material absorbente en la medida que sea necesario disminuir o aumentar la potencia del reactor, y otro que actúa cuando resulta necesario apagar el reactor (barras que caen por gravedad y extinguen por completo la reacción nuclear). El control de este doble sistema de barras se efectúa mediante dispositivos hidráulicos ubicados en el interior del recipiente de presión.

El concepto de integración aplicado en el reactor CAREM, si bien resulta innovador y fácilmente ajustable a mayores potencias, dota de una importancia superlativa a la integridad estructural del RPR. Resulta, por tanto, esencial estudiar la respuesta del

mismo ante distintas condiciones de carga (estacionarias y transitorias), verificando la idoneidad de los componentes mediante la aplicación de criterios de admisibilidad establecidos en el código ASME tanto para cargas estáticas como dinámicas.

2.2. Motivación de la presente tesis

La aplicación (cíclica o no) de cargas mecánicas y condiciones térmicas en el RPR, determina la necesidad de efectuar un diseño apropiado de los componentes que conforman al mismo (en cuanto a geometría y selección de materiales), de modo que estos *no fallen*: por deformación plástica generalizada, por colapso plástico incremental o por fatiga. El código ASME III, en su enfoque de diseño por análisis (DBA por su sigla en inglés) contempla estos tres modos de falla, fijando límites apropiados de acuerdo a un sistema de categorización de tensiones y estableciendo criterios para el caso de cargas cíclicas.

Una vez definida la geometría del recipiente y adoptados los materiales, resulta esencial efectuar un análisis puntual del estado de tensiones, y verificar la aptitud del componente analizado de acuerdo a los criterios establecidos por el código de diseño. Es importante tener en cuenta que ciertos modos de falla contemplan la *historia termomecánica* del componente, y en ellos debe considerarse adicionalmente el acoplamiento de distintos estados de carga (la fatiga de materiales sometidos a cargas fluctuantes constituye un ejemplo típico).

La presente tesis expone el análisis de fatiga en el RPR del reactor nuclear CAREM 25, de acuerdo a los lineamientos del código ASME III, explicitando los criterios de generalización de las pautas del código a estados de carga generales.

Capítulo 3

Generalidades sobre fatiga

"Haced como si no lo supiera y explicádmelo."
— Molière, El burgués gentilhombre (1670)

Los componentes que conforman al RPR del reactor nuclear CAREM 25 se encuentran sujetos a la aplicación de cargas cíclicas que tienen origen en los cambios en las condiciones mecánicas y térmicas del sistema, al evolucionar el mismo desde una configuración de cargas de presión, térmicas, de momento y fuerza, a otra. En presencia de dichas cargas fluctuantes, cuyo nivel no es suficiente para provocar la rotura del elemento, un fenómeno de deformación elastoplástica cíclica tiene lugar en determinadas zonas susceptibles, por sus características geométricas, a la iniciación de fisuras, o bien al crecimiento estable de aquellas preexistentes en el material del componente solicitado.

La aplicación de estados de carga cíclicos determina, en cualquier elemento estructural, la existencia de un *modo de falla* denominado *fatiga*, que contempla la aparición y/o crecimiento estable de fisuras, hasta la eventual rotura del componente, luego de cierto número de ciclos.

Al ser la fatiga un fenómeno complejo dependiente de muchos parámetros, existe en general una gran dispersión en los resultados experimentales asociados al mismo, lo cual condiciona enormemente la capacidad de predicción de vida útil de un componente sujeto a cargas fluctuantes [1].

La condición superficial, las características geométricas del elemento estructural, las propiedades del material involucrado y la naturaleza del medio cumplen un rol importante en la resistencia a la fatiga, esto es, en el número de ciclos necesarios para que aparezcan fisuras en un material idealizado sin fallas, y condicionan la etapa de crecimiento estable de fisuras, tanto las generadas durante la operación como las provenientes del proceso de manufactura. Por todo esto, la realización de ensayos específicos de fatiga bajo condiciones controladas permite incrementar la capacidad de predicción, asignando significativa importancia al tratamiento estadístico de datos experimentales

que sean comparables.

3.1. El proceso de falla por fatiga

En el ámbito de la ciencia y tecnología de materiales se entiende por *fatiga* a todo cambio estructural permanente, localizado y progresivo que ocurre cuando un elemento es sujeto a tensiones y/o deformaciones variables en el tiempo. Este fenómeno puede provocar la rotura del elemento estructural solicitado después de un número suficiente de fluctuaciones de carga.

Cuando el fenómeno de fatiga tiene lugar en componentes mecánicos libres de fallas (idealización válida en materiales con fallas iniciales poco significativas), en general, ocurren los siguientes eventos: generación de microfisuras, coalescencia de tales microfisuras para conformar otras de mayor tamaño, aparición de macrofisuras, propagación de las macrofisuras hasta exceder el valor de la tenacidad a la fractura del material y finalmente, rotura del componente (fractura). Estas etapas conforman al proceso de falla por fatiga, y son (en general) complicadas, puesto que se ven influenciadas por múltiples factores: estado de tensiones, geometría del componente solicitado, calidad superficial, características del material, tensiones residuales, propiedades del ambiente, etc. [6].

3.2. Sobre los estados de carga fluctuantes

El caso más simple de carga fluctuante es aquel que contempla una variación sinusoidal de la tensión en el tiempo. La Figura (3.1) muestra la representación de una carga fluctuante sinusoidal genérica, con sus parámetros característicos [7].

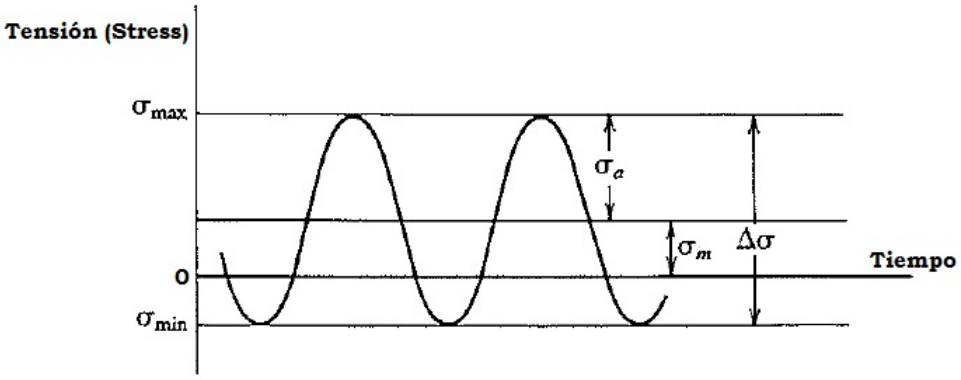


Figura 3.1: Carga fluctuante sinusoidal. Principales parámetros

Del gráfico surgen algunas definiciones útiles en el estudio de la fatiga:

- Rango de tensiones: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

- Amplitud de tensión: $\sigma_a = \dfrac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \dfrac{\Delta\sigma}{2}$
- Tensión media: $\sigma_m = \dfrac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
- Relación de tensiones: $R = \dfrac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
- Relación de amplitudes: $A = \dfrac{\sigma_a}{\sigma_m}$

La variación de los parámetros A y R determina distintos tipos de cargas fluctuantes. La Tabla (3.1) indica los más comunes.

La carga de *reversión total* se corresponde con el caso ideal en que el valor máximo de tensión y el valor mínimo de tensión son iguales en magnitud pero de signos contrarios ($R = -1$), lo cual se traduce en un valor medio nulo. Por otro lado, las cargas *de cero a máximo* y de *cero a mínimo* se corresponden con casos en que el mínimo valor de tensión y el máximo valor de tensión son nulos, respectivamente ($R = 0$ y $R = -\infty$). En estos últimos casos, el valor medio de tensión resulta o positivo o negativo, pero no nulo. Casos más generales de carga surgen a partir de otras combinaciones de R y A, pudiendo tener lugar un cambio de signo o no.

Tabla 3.1: Tipos de cargas fluctuantes elementales.

Tipo	R	A
Reversión total	-1	Infinito
Cero a máximo	0	1
Cero a mínimo	-Infinito	-1

Sin embargo, si bien los estados de carga generalmente aplicados son *variables*, los mismos no son necesariamente sinusoidales. Esto determina la necesidad de establecer criterios conservadores que permitan representar esos estados de carga reales como estados ficticios equivalentes de caracter sinusoidal o como una serie de ciclos armónicos equivalentes. La Figura (3.2) muestra un esquema de una carga variable que se encuentra caracterizada por puntos de reversión (puntos donde se produce un cambio de signo en la derivada temporal primera de la magnitud fluctuante) en vez de encontrarse caracterizada por ciclos.

Existen múltiples métodos en la literatura que permiten definir un *estado equivalente* al real conformado por una serie de ciclos simples de tensión, y resulta evidente que, de acuerdo a la naturaleza de la variación temporal de las cargas, la metodología de análisis a la fatiga se llevará a cabo de una forma o de otra, pues en el caso de cargas caracterizadas por ciclos, la definición de ciclos de aplicación y rangos de tensión resulta trivial mientras que en el caso de magnitudes variables caracterizadas por puntos de reversión, no.

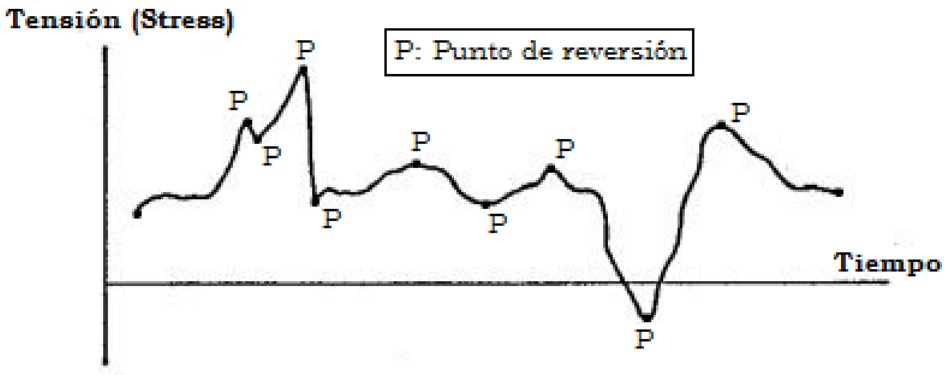


Figura 3.2: Carga variable real caracterizada por puntos de reversión.

3.3. Enfoques en el estudio de la fatiga

El análisis de fatiga en un elemento estructural sometido a cargas fluctuantes puede efectuarse de acuerdo a dos enfoques: el *de vida total* y el *tolerante a los defectos*.

El enfoque de vida total contempla el diseño contra la iniciación de fisuras, esto es, supone materiales sin fallas iniciales, donde la vida a la fatiga incluye el número de ciclos necesarios para iniciar una fisura dominante y producir su propagación hasta un valor crítico. Esta vertiente discrimina, además, la naturaleza de los mecanismos de falla de acuerdo al número de ciclos resultantes, en fatiga de alto número de ciclos (*High-Cycle Fatigue: HCF*) y fatiga de bajo número de ciclos (*Low-Cycle Fatigue: LCF*).

Por otro lado, el *enfoque tolerante a los defectos* adopta como filosofía que todos los componentes ingenieriles presentan fallas inherentes, y la predicción de vida del componente bajo análisis se determina de acuerdo a leyes empíricas basadas en la mecánica de fractura (leyes de Paris, Forman, McEvily, etc.) que gobiernan el crecimiento de fisuras preexistentes cuyas dimensiones iniciales pueden determinarse mediante técnicas no destructivas [8].

3.4. Fatiga de alto y bajo número de ciclos

El mecanismo de daño por fatiga puede ocurrir en componentes libres de fallas significativas por el desarrollo de fisuras durante el servicio, aunque su ocurrencia sea más probable en materiales con fisuras y fallas provenientes del proceso de manufactura.

El análisis de fatiga es de gran importancia en el diseño de máquinas rotantes y aeronaves, donde los componentes se ven afectados por cargas termomecánicas de alto número de ciclos, i.e. fatiga de alto número de ciclos (HCF). En estas situaciones, la principal preocupación es la *resistencia límite*, que constituye el nivel de tensión (stress) por debajo del cual puede aplicarse un número infinito de ciclos sin que se produzca falla por fatiga. Sin embargo, las cargas cíclicas en los componentes mecánicos de un reactor

nuclear tienen lugar, como ya se mencionó, por cambios en las condiciones térmicas y mecánicas del sistema, al evolucionar el mismo entre dos estados preestablecidos, por lo que el número de ciclos aplicados durante la operación es típicamente inferior a algunos miles (fatiga de bajo número de ciclos).

La principal diferencia entre la fatiga de alto y bajo número de ciclos es que la primera involucra poca o nula deformación plástica mientras que la segunda involucra amplitudes de deformación que exceden el valor correspondiente al comienzo de la deformación plástica. Esto determina la necesidad de basar las curvas de diseño de bajo número de ciclos en ensayos donde la deformación sea la variable controlada [9].

Las deformaciones plásticas constituyen un aspecto importante del proceso de *fatiga*, pues las fisuras asociadas a dicho proceso nuclean localmente a partir de las mismas. Es esta la razón por la cual los ensayos de fatiga por control de deformación caracterizan mejor al comportamiento a la fatiga de un material que los ensayos tradicionales por control de carga, aún cuando los primeros son más complicados de llevar a cabo.

Los ensayos por control de deformación usualmente se llevan a cabo en máquinas de ensayo servo-controladas de prueba a ciclo cerrado, que someten al material bajo estudio a un ciclado con amplitud de deformación constante, provocando una respuesta variable en la tensión. Dicho comportamiento tensión-deformación cíclico puede caracterizarse (para ciertos límites impuestos de deformación) mediante un *ciclo de histéresis*, variable al principio del ciclado (mientras se alcanzan las condiciones de estado estable) y fijo al final (cuando se alcanza la condición estacionaria). El área encerrada por el ciclo puede interpretarse como la energía por unidad de volumen disipada durante un ciclo, usualmente en forma de calor, o bien como el trabajo necesario para producir deformación plástica (en teorías de fatiga basadas en consideraciones energéticas).

La Figura (3.3) muestra un esquema general de *comportamiento tensión-deformación* de estado estacionario, donde se indican las variaciones de deformación elástica y plástica ($\Delta\varepsilon_e$ y $\Delta\varepsilon_p$, respectivamente). Cada una de estas variaciones se halla vinculada a un tipo de fatiga distinto (LCF o HCF) y sus descripciones admiten formulaciones matemáticas diferentes.

La fatiga de bajo número de ciclos es usualmente caracterizada por la relación de Coffin-Manson, publicada independientemente por L. F. Coffin en 1954 y por S. S. Manson en 1953, que establece:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f.(2N_f)^c \tag{3.1}$$

donde: $\Delta\varepsilon_p/2$ es la amplitud de deformación plástica, ε'_f es una constante empírica conocida como *coeficiente de ductilidad a la fatiga*, $2N_f$ es el número de reversiones a la falla y c es una constante empírica conocida como *exponente de ductilidad a la*

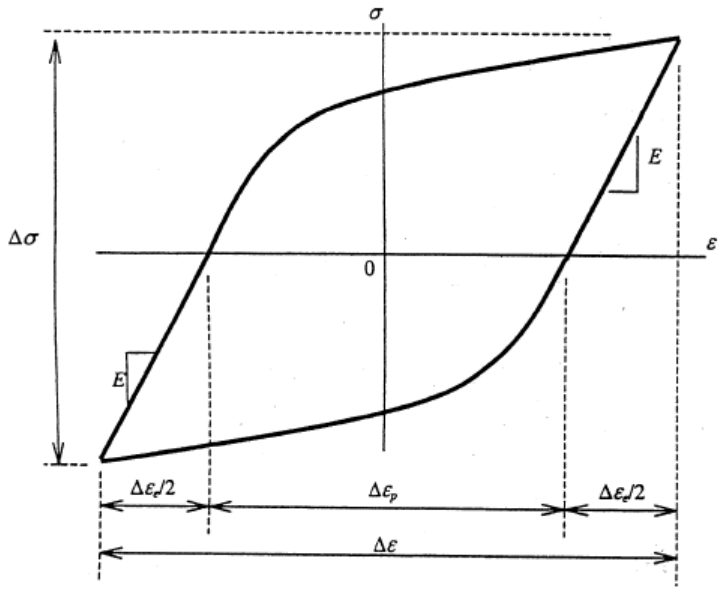


Figura 3.3: Comportamiento tensión-deformación. Ciclo de histéresis estacionario asociado a ensayos por control de deformación.

fatiga, comúnmente variable entre $-0,5$ y $-0,7$ para metales.

Históricamente, se ha brindado mayor atención a situaciones que requieren más de 10^4 ciclos para ocasionar la falla del componente, donde el nivel de tensión es menor y la deformación es predominantemente elástica (fatiga de alto número de ciclos, HCF).

En la HCF, el comportamiento de los materiales es comúnmente caracterizado por una curva denominada *curva de Wöhler* o *curva S-N*, que representa (para un dado material) la magnitud de la amplitud de tensión cíclica (S) en función del número de ciclos necesarios para que se produzca la falla por fatiga (N). La curva S-N es de naturaleza empírica, y se obtiene en laboratorios donde probetas estandarizadas son sometidas a ciclados sinusoidales de amplitud controlada. Diversas correcciones pueden aplicarse con el objeto de considerar factores tales como: corrosión, temperatura, presencia de tensiones residuales, nivel medio de tensión no nulo, cargas complejas, etc.

Matemáticamente, la fatiga de alto número de ciclos puede representarse mediante la *ley de Basquin*, que establece:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{E.\Delta\varepsilon_e}{2} \tag{3.2}$$

donde σ'_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga del material, b es el exponente empírico de Basquin (variable entre $-0,05$ y $-0,12$), N_f es el número de ciclos a la rotura del componente, E es el módulo de elasticidad del material y $\Delta\varepsilon_e/2$ es la amplitud de la deformación elástica [1] [8].

Expresando a la amplitud de deformación total como la suma de una componente

elástica y una plástica:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \tag{3.3}$$

y considerando la validez de las leyes de Coffin-Manson y de Basquin, es posible escribir una expresión para la amplitud de deformación total, válida en todo el rango de amplitudes de deformación:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \tag{3.4}$$

A partir de la expresión (3.4) puede determinarse el valor de la *vida de transición*, definida como el valor de N_f que hace iguales a las amplitudes de deformación elástica y plástica:

$$N_f = \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f}\right)^{1/(b-c)} \tag{3.5}$$

La distinción entre HCF y LCF resulta esencial en el análisis de fatiga, pues permite entender el mecanismo de desarrollo y crecimiento de fisuras que predomina en un componente sometido a cierto estado de cargas termomecánicas fluctuantes. La Figura (3.4) muestra la representación *amplitud de deformación* versus *número de reversiones*, donde puede observarse que, para grandes deformaciones o vidas cortas, la componente de deformación plástica es la componente dominante, mientras que para pequeñas deformaciones o grandes números de repeticiones, la componente elástica es la que predomina.

3.5. Análisis de fatiga de acuerdo a ASME

3.5.1. Introducción

El código ASME III (B&PVC), creado en 1963, incorporó (en su subsección NB, correspondiente a los denominados *componentes clase 1* que, por su diseño, tienen baja probabilidad de ocurrencia de fugas y presentan un sistema de seguridad doble) a la *fatiga* como un modo de falla, convirtiéndose de esta forma en el primer código internacional de estandarización en tratar en forma explícita la aptitud de componentes nucleares sometidos a cargas fluctuantes. La subsección NB provee la metodología de evaluación de fatiga para componentes nucleares, así como requerimientos de fabricación y ensayos no destructivos (END) de esos componentes, considerando el enfoque de vida total. Los requerimientos de diseño, fabricación e inspección planteados en el código, tienen por objeto garantizar un funcionamiento seguro de los elementos solicitados, maximizando su vida útil. Si bien la sección III fue revisada en numerosas ocasiones, los procedimientos generales de fatiga siguen siendo esencialmente los mismos desde su

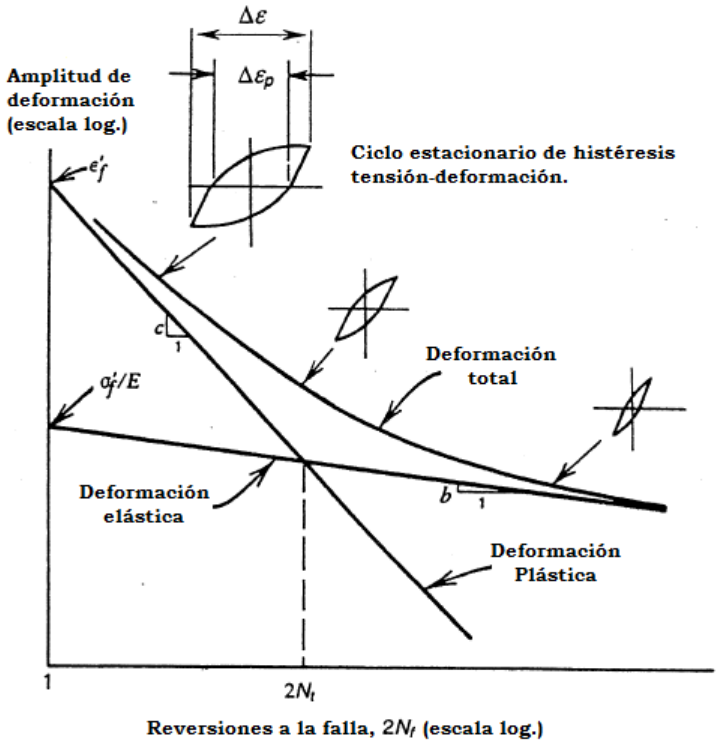


Figura 3.4: Fatiga de alto y bajo número de ciclos. Variaciones de deformación elástica y plástica.

introducción en 1963.

La base de los procedimientos de análisis brindados en la subsección NB es que el daño a la fatiga, debido a cargas cíclicas, es de caracter *acumulativo* y que la suma de este daño, durante la vida del componente, no debe exceder la unidad. El daño a la fatiga es definido mediante un factor de uso acumulativo (CUF), denominado también *coeficiente de daño acumulado*. Un factor de uso parcial (asociado al estado de carga i) se obtiene de la relación n_i/N_i, donde N_i es el número de ciclos admisible a un dado nivel de tensión, obtenido de la curva empírica de fatiga apropiada y donde n_i es el número de ciclos a ser aplicados durante la vida del componente de acuerdo a los requerimientos de diseño. Cuando tienen lugar múltiples condiciones de operación (i.e. estados de carga), cada una de ellas genera un factor de uso parcial, y el CUF puede determinarse estableciendo alguna regla de combinación apropiada. Asumiendo una relación de daño lineal (regla de Palmgren-Miner), el CUF se obtiene a partir de la suma directa de los factores de uso parciales.

$$CUF = \Sigma_i \frac{n_i}{N_i} \tag{3.6}$$

Otras hipótesis para estimar el CUF han sido propuestas en el pasado y muchas demostraron ser más precisas que la relación lineal, pero solo cuando la secuencia del ciclo de tensión es conocida con considerable detalle (lo cual no ocurre durante la etapa de

diseño). Pruebas experimentales han demostrado que la suposición lineal es adecuada para la mayoría de los estados de carga.[2]

El daño a la fatiga es cuantificado en términos de una intensidad de tensiones alternante (S_a), definida como la semidiferencia entre la máxima y la mínima tensión del ciclo (Tresca) en el punto bajo análisis.

$$S_a = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

La vida admisible en ciclos N asociada al valor de tensión alternante S_a se determina a partir de la curva apropiada de diseño del material involucrado (brindada por ASME), y es la que permite determinar el factor de uso bajo consideración.

Como ya se mencionó, los componentes que conforman al recipiente de presión del reactor son más susceptibles a experimentar fatiga de bajo número de ciclos (mecanismo de daño controlado por deformación) que fatiga de alto número de ciclos (mecanismo de daño controlado por carga). Los datos experimentales, que constituyen luego a la curva S_a-N final, se obtienen a partir de probetas normalizadas ensayadas en aire bajo condiciones controladas de deformación. La curva de falla por fatiga se obtiene, transformando primero la deformación aplicada en tensión, multiplicando por el módulo de Young, y ajustando luego los datos para obtener la denominada *curva de falla*. A partir de dicha curva, la aplicación de dos factores de corrección (uno asociado a los ensayos controlados por deformación y otro a los controlados por carga) genera dos nuevas curvas, que permiten definir, mediante un criterio conservador, una única curva, denominada *curva de diseño* o curva S_a-N.

La curva de diseño contempla la presencia de un valor medio de tensión (promedio de la máxima y la mínima tensión del ciclo de carga) no nulo, debido al impacto de dicho valor medio sobre el daño a la fatiga, en caso de experimentos por control de carga en vez de control de deformación. Los efectos del valor medio se incluyen de manera conservativa, desplazando hacia abajo al mejor ajuste de la curva de falla de acuerdo a una interpretación del diagrama de Goodman modificado, lo cual se corresponde con el peor escenario para el efecto del valor medio [10].

3.5.2. Procedimiento de cálculo de las diferencias de tensiones

La aptitud de un componente para resistir cierto servicio cíclico sin fallar por fatiga se determina en base a las tensiones en cada uno de los puntos del componente, y los ciclos de tensión admisibles deben ser adecuados para el nivel de servicio especificado en todos los puntos.

La determinación de la *diferencia de tensión* y de la *intensidad de tensiones alternante* puede llevarse a cabo de acuerdo a dos criterios, a saber: considerando constantes

a las direcciones de las tensiones principales (cuyas cargas asociadas se denominan *cargas proporcionales*) o bien considerando direcciones principales variables (cuyas cargas asociadas se denominan *no proporcionales*) [11].

Direcciones principales constantes

Para cualquier situación en la cual las direcciones de las tensiones principales en el punto considerado no cambian durante el ciclo, el cálculo de la intensidad de tensiones alternante en dicho punto se lleva a cabo de la siguiente forma:

a) *Tensiones principales*. Considerar los valores de las tres tensiones principales en el punto en función del tiempo (ciclo completo), teniendo en cuenta discontinuidades locales, globales y efectos térmicos que pueden variar durante el ciclo. Denotar las tensiones con σ_1, σ_2 y σ_3.

b) *Diferencia de tensiones*. Determinar las diferencias de tensiones $S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$, $S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$ y $S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$ en función del tiempo, para el ciclo completo. En lo que sigue se denota con S_{ij} a cualquiera de las tres diferencias.

c) *Intensidad de tensiones alternante*. Determinar los valores extremos del rango a través del cual cada diferencia de tensiones S_{ij} fluctúa y encontrar la magnitud absoluta de ese rango para cada S_{ij}. Llamar a esa magnitud S_{rij} y establecer $S_{aij} = 0,5.S_{rij}$. La intensidad de tensiones alternante del punto bajo análisis se define como el mayor valor de los S_{aij}.

Direcciones principales variables

Para cualquier situación en la cual las direcciones principales en el punto considerado cambian durante el ciclo, es necesario aplicar un procedimiento más general en la determinación de la intensidad de tensiones alternante. El procedimiento es el siguiente:

a) Considerar las seis *componentes* del tensor de tensiones simétrico σ_t, σ_l, σ_r, τ_{lt}, τ_{lr} y τ_{rt} en función del tiempo, para el ciclo completo, teniendo en cuenta discontinuidades estructurales tanto locales como globales, y efectos térmicos que pueden variar en el tiempo.

b) Elegir un instante de tiempo en el cual las condiciones se correspondan con uno de los extremos en el ciclo (ya sea un máximo o un mínimo) e identificar a las componentes de tensión en ese tiempo con el subíndice i. En la mayoría de los casos será posible definir al menos un tiempo durante el ciclo en el cual las condiciones sean un extremo. En algunos casos podría ser necesario probar con diferentes instantes de tiempo hasta encontrar aquel que resulta en la máxima intensidad de tensiones alternante. (Cabe mencionar que, en estados de carga complejos, la selección del tiempo asociado a las condiciones extremas requiere el establecimiento de algún criterio de análisis que defina

un indicador apropiado de tales condiciones.)

c) Sustraer cada una de las seis componentes de tensión σ_{ti}, σ_{li} , etc., de las correspondientes tensiones σ_t, σ_l, etc., en cada instante de tiempo durante el ciclo, y llamar a las componentes resultantes: σ'_t, σ'_l, etc.

d) En cada instante de tiempo durante el ciclo, calcular las tensiones principales σ'_1, σ'_2 y σ'_3 a partir de las seis componentes σ'_t, σ'_l, etc. Nótese que las direcciones de las tensiones principales pueden cambiar durante el ciclo pero cada tensión principal retiene su identidad mientras rota.

e) Determinar las diferencias de tensión: $S'_{12} = \sigma'_1 - \sigma'_2$, $S'_{23} = \sigma'_2 - \sigma'_3$ y $S'_{31} = \sigma'_3 - \sigma'_1$ en función del tiempo para el ciclo completo y hallar la magnitud absoluta mayor de cualquier diferencia de tensiones en cualquier tiempo. La intensidad de tensiones alternante será la mitad de esa magnitud.

En ambos procedimientos (direcciones principales constantes y variables) se obtienen tensiones alternantes que pueden ser usadas en las curvas de diseño a la fatiga para determinar el número admisible de ciclos asociado a las condiciones de operación.

3.5.3. La curva de diseño a la fatiga

Una curva S_a-N típica (curva de diseño a la fatiga) puede observarse en la Figura (3.5). Dicha imagen es una duplicación de la Figura I-9.1 (*Curvas de diseño a la fatiga para aceros al carbono, bajo carbono y alta resistencia, cuya temperatura no excede los* 700° *F* (aprox. 370° C)), disponible en los apéndices de la sección III, división I del código ASME (B&PVC). La gráfica representa dos curvas: una para materiales cuya resistencia a la tracción (tensión UTS) es menor a 80 ksi (aprox. 552 MPa) y la otra para materiales con UTS comprendida entre 115 y 130 ksi (i.e. entre 793 y 896 MPa), admitiéndose la correspondiente interpolación para materiales con UTS entre 80 y 115 ksi (i.e. entre 552 y 793 MPa). Ambas curvas representan apropiadamente a casi todos los materiales ferríticos usados en los recipientes de presión [12].

La curva representa la tensión alternante (S_a) en función del número (admisible) de ciclos que pueden aplicarse sobre el componente cargado sin que el mismo falle por fatiga. La misma se basa en resultados experimentales obtenidos a partir de probetas estandarizadas sometidas a ensayos de fatiga por control de deformación. Dichos datos constituyen la denominada *curva de falla*, definida como el mejor ajuste de los datos experimentales obtenidos. Desde su desarrollo en 1963, se obtuvieron nuevos datos de ensayos, que al ser considerados en la actualidad, no alteran significativamente los parámetros de la curva de ajuste [10].

La *curva de diseño* (curva final), se obtiene aplicando dos factores de corrección a la curva de falla, generándose así dos nuevas curvas. Uno de los factores es 2 sobre la tensión, y el otro es 20 sobre los ciclos. Ambas curvas se fusionan luego en una única

curva suave, considerando el caso más desfavorable. El factor de 20 en los ciclos es determinante en el bajo número de fluctuaciones de carga (inferior a 10^5 ciclos), que se corresponde con el régimen de control de deformación, mientras que el factor de 2 en tensión es el que determina la curva final en el alto número de ciclos y se encuentra asociado al control de carga. Esta reducción se efectúa luego del ajuste para el efecto de la tensión media y, en consecuencia, es comúnmente referido como el criterio 2&20.

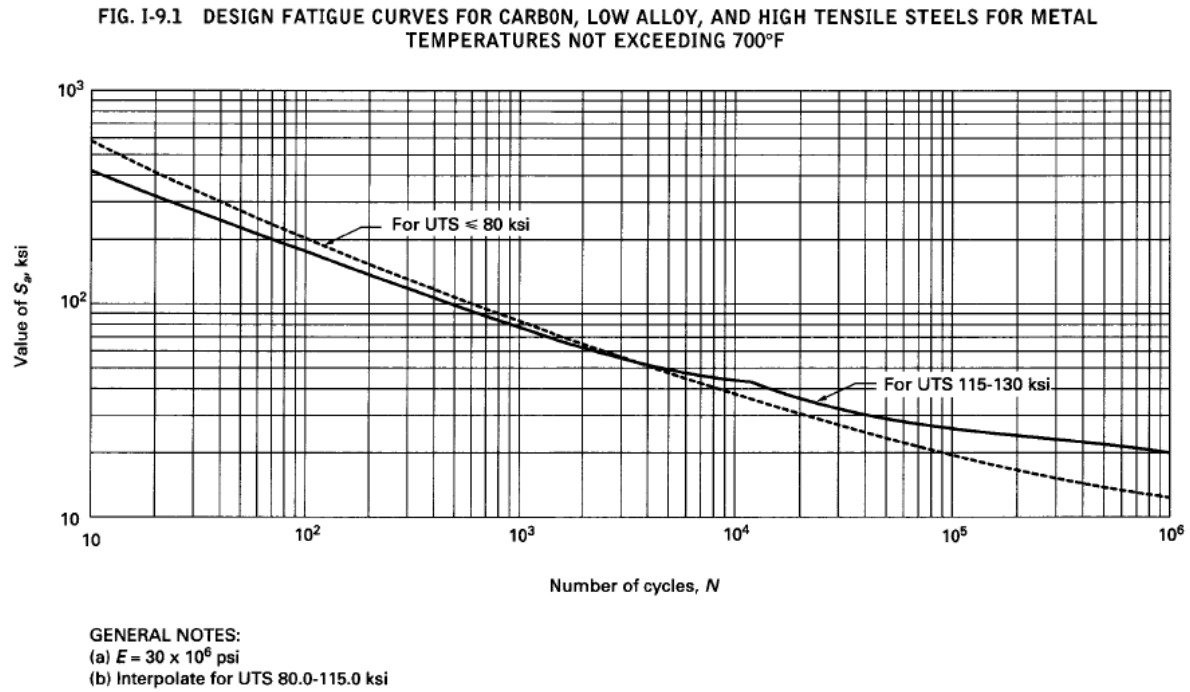


Figura 3.5: Curva S_a-N de diseño a la fatiga típica.

El criterio 2&20 constituye un criterio ingenieril *conservador* que reconoce que los datos experimentales a partir de los cuales se obtiene la curva de fatiga se llevan a cabo en pequeños especímenes sometidos a ciclados sinusoidales, mientras que la curva se utiliza para predecir el comportamiento real de componentes grandes sometidos a cargas fluctuantes no armónicas. La naturaleza multiparamétrica del fenómeno de fatiga, fortalece la idea y las discusiones todavía no cerradas, en el ámbito de la investigación y desarrollo de recipientes de presión, sobre la aplicación de factores de corrección y criterios conservadores que reconocen la *impredictibilidad* o el desconocimiento de ciertos parámetros relevantes en el estudio de la fatiga.

Las curvas y datos correspondientes a otros materiales, susceptibles a ser usados en componentes nucleares sometidos a cargas fluctuantes, se encuentran disponibles en los apéndices del código ASME III-división I.

3.5.4. Determinación del CUF

Si un componente es sometido a dos o más tipos de ciclos de carga, los cuales producen tensiones significativas, sus efectos acumulativos deben evaluarse de acuerdo al siguiente procedimiento:

1) Designar el número especificado de veces que cada tipo de ciclo de carga $1, 2, 3, ..., n$, será repetido durante la vida del componente como $n_1, n_2, n_3, ..., n_n$, respectivamente. En esta etapa, deben efectuarse consideraciones sobre la superposición de los ciclos de distintos orígenes que producen un rango de tensiones mayor que el correspondiente a los ciclos individuales.

2) Para cada tipo de ciclo de carga, determinar la intensidad de tensiones alternante S_a por los procedimientos de cálculo de las diferencias de tensiones establecidos en el código ASME (Subsección NB). Denotar a esas cantidades con S_{a1}, S_{a2}, S_{a3},..., S_{an}.

3) Para cada valor de S_{a1}, S_{a2}, S_{a3},..., S_{an}, usar la curva de diseño a la fatiga aplicable para determinar el máximo número de repeticiones admisible como si ese tipo de ciclo fuese el único actuante. Denotar a esas magnitudes con N_1, N_2, N_3,...,N_n.

4) Para cada tipo de ciclo de carga, calcular el factor de uso. Designarlos con U_1, U_2, U_3,...,U_n. Donde $U_1 = \frac{n_1}{N_1}$, $U_2 = \frac{n_2}{N_2}$, $U_3 = \frac{n_3}{N_3}$,..., $U_n = \frac{n_n}{N_n}$.

5) Determinar el coeficiente de daño acumulado a partir de la suma de los coeficientes asociados a los distintos ciclos: $U = U_1 + U_2 + U_3 + ... + U_n$. (relación de daño lineal de Palmgren-Miner).

6) El coeficiente de daño acumulado no debe exceder la unidad. Si lo hiciese, dicho punto sería susceptible a fallar por fatiga, de acuerdo a las condiciones de operación supuestas [13].

3.5.5. Consideraciones sobre el análisis para operación cíclica

La aptitud de un componente clase 1 (como el RPR) para un servicio especificado que involucra la aplicación cíclica de cargas mecánicas y condiciones térmicas, debe llevarse a cabo de acuerdo a los procedimientos desarrollados en el código ASME III-Subsección NB.

Las condiciones y procedimientos de la subsección NB se basan en una comparación entre las tensiones de pico (definidas por ASME de acuerdo a un sistema de categorización de tensiones, que las caracteriza como el valor en exceso que tiene lugar por sobre la suma de la tensión media, o de membrana, y la tensión de flexión) con los datos de deformación cíclica por fatiga.

Los datos de fatiga por deformación cíclica definen la denominada curva de diseño a la fatiga, que representa la intensidad de tensiones alternante S_a en función del número admisible de ciclos. Dicha intensidad de tensiones se calcula considerando un *comportamiento elástico* del material involucrado, pues, como ya se mencionó, la curva

de diseño se obtiene de datos de fatiga uniaxial por control de deformación que se transforman en tensión mediante la aplicación de la ley de Hooke. Por esto, resulta esencial verificar la aplicabilidad del modelo elástico lineal en el análisis de fatiga.

El código ASME proporciona un criterio conservador para evaluar si un material determinado presenta un comportamiento elástico lineal. Dicho criterio se basa en un *sistema de categorización de tensiones* vinculado directamente con los 3 (tres) modos de falla reconocidos por ASME en el enfoque del DBA, a saber: Deformación plástica generalizada, Colapso plástico incremental y Fatiga [14].

De acuerdo a esta clasificación de los modos de falla, se distinguen los siguientes tipos de tensiones:

- Tensión primaria: Cualquier tensión (normal o de corte) desarrollada por las cargas impuestas sobre el componente solicitado. Su característica fundamental es que no es *autolimitante* (no se atenúa debido a la deformación que ella misma produce).

- Tensión secundaria: Cualquier tensión (normal o de corte) desarrollada por las restricciones impuestas por elementos adyacentes al componente bajo análisis, o por auto-restricción del propio componente. Su característica fundamental es que es *autolimitante*.

- Tensión de pico: Diferencia entre la distribución real de tensiones y la suma de la tensión de membrana y de flexión, o bien aquel incremento de tensión por sobre la suma de las tensiones primaria y secundaria desarrolladas en discontinuidades locales o por tensiones térmicas locales, incluyendo los efectos, si existiesen, de concentración de tensiones [15].

Los límites impuestos por ASME sobre las tensiones primarias tienen por objeto proteger contra la deformación plástica generalizada y proveer un margen de seguridad contra la presión de colapso dúctil. Por otro lado, los límites sobre la suma de las tensiones primarias y secundarias buscan proteger al componente del colapso plástico incremental (*ratcheting*), y los límites en la tensión de pico tienen por objeto prevenir la falla por fatiga (en caso de aplicación de cargas cíclicas).

El criterio propuesto por ASME B&PVC (Subsección NB) para validar la *suposición elástica lineal* establece que el rango de la intensidad de tensiones derivada a partir del máximo valor (en cualquier punto a través del espesor) de la tensión primaria de membrana (local o general) más la tensión primaria de flexión y tensiones secundarias, no debe superar el valor del máximo rango permisible, definido como $3S_m$ (siendo S_m el valor de la intensidad de tensiones admisible a la temperatura de diseño). Este criterio debe satisfacerse en todos los tiempos, incluyendo los estados de carga transi-

torios, y debe recurrirse (en su ejecución) al uso de líneas de clasificación de tensiones apropiadamente escogidas [13] [16].

El código ASME III especifica además, que bajo determinadas condiciones, no es necesario efectuar un análisis de fatiga completo (como el estipulado antes), sino que puede asumirse que los límites impuestos sobre la intensidad de tensiones de pico (asociada al fenómeno de fatiga) son suficientes para garantizar un funcionamiento apropiado del componente cargado. Dichas condiciones se encuentran descriptas en detalle en el código, algunas de ellas son:

- Si el número de ciclos de presión, desde la presión atmosférica a la presión de servicio, no excede el valor del número admisible de ciclos (obtenido de la curva de diseño) correspondiente al máximo rango permisible ($3S_m$).

- Si el rango de fluctuación de presión en servicio normal no excede cierto valor dependiente de la presión de diseño, de la intensidad de tensiones admisible y de la curva de diseño del material.

- Si la diferencia de temperatura entre dos puntos adyacentes no cambia, durante el servicio normal, más allá de una cierta cantidad dependiente del material.

Si bien el código ASME III explicita las condiciones que eximen al diseñador de efectuar un análisis completo de fatiga, resulta prudente efectuar algunos en la etapa de diseño del RPR del prototipo CAREM 25, con el objeto de simular estados de carga (eventos) más o menos catastróficos, aún cuando los mismos no sean de ocurrencia probable o bien cumplan todas las condiciones establecidas para la eximición del análisis [13].

Capítulo 4

Análisis de fatiga para un estado de carga

4.1. Introducción

El análisis de fatiga de un componente nuclear sometido a cargas o condiciones termomecánicas variables depende del tipo de carga aplicado, de las propiedades del material, de las características geométricas del componente y de las condiciones del medio. En el caso general de cargas en donde se produce, para cada punto del material, una variación en las direcciones de las tensiones principales, la determinación de las diferencias de tensión debe efectuarse de acuerdo a lo establecido en el *procedimiento de cálculo de las diferencias de tensión*, presentado en el código ASME III (B&PVC).

El valor de la intensidad de tensiones alternante se obtiene (en forma directa) a partir de la evolución temporal de las diferencias de tensión $S_{ij}(t)$, puesto que al considerarse un único evento crítico, el mismo puede caracterizarse por su máximo rango de tensiones y número de ciclos, ignorando variaciones de menor amplitud.

Con el objeto de comprender la metodología de cálculo de la intensidad de tensiones alternante, considérese un punto del componente solicitado, cuya historia tensional se encuentra caracterizada por el tensor de tensiones $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{ij}]$. Asumiendo que la carga es tal que las direcciones principales *cambian* durante el ciclo, el código ASME III establece la necesidad de definir un tensor constante, asociado al punto bajo análisis, $\boldsymbol{\sigma_c} = [\sigma_{ij}(t_i)]$, donde t_i es el tiempo que maximiza el valor de la máxima diferencia de tensiones (o bien aquel en el cual se alcanzan las *condiciones extremas* del ciclo).

A partir de ambos tensores, el tensor diferencia (referenciado de acuerdo a las condiciones extremas) queda definido como: $\boldsymbol{\sigma'} = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma_c} = [\sigma_{ij}(t) - \sigma_{ij}(t_i)] = [\sigma'_{ij}(t)]$.

Las diferencias de tensión quedan completamente determinadas una vez que se conocen los autovalores σ'_1, σ'_2 y σ'_3 del tensor $\boldsymbol{\sigma'}$.

Esto es:

$$S_{12}(t) = \sigma'_1(t) - \sigma'_2(t)$$

$$S_{23}(t) = \sigma'_2(t) - \sigma'_3(t)$$

$$S_{31}(t) = \sigma'_3(t) - \sigma'_1(t)$$

Dichas diferencias de tensión permiten calcular la intensidad de tensiones alternante como la mitad de la mayor magnitud absoluta de todas las diferencias de tensión en todos los tiempos.

Cabe mencionar, que si bien el procedimiento establecido en el código no exige el ordenamiento de los autovalores, si en cada instante los mismos satisfacen que: $\sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3$, entonces la intensidad de tensiones alternante S_a puede calcularse como la mitad de la mayor magnitud absoluta de $S_{31}(t) = \sigma'_3(t) - \sigma'_1(t)$.

La utilización de la curva de fatiga correspondiente determina el número admisible de ciclos N asociado a la tensión alternante S_a. Luego, si se conoce el número de aplicaciones de carga n, el factor de uso característico del evento, en el punto considerado, viene dado por el cociente n/N (el cual, para evitar la falla por fatiga, debe ser inferior a la unidad).

Nótese que la metodología de cálculo del campo escalar de daño por fatiga se basa fuertemente en el conocimiento del estado tensional $\sigma_{ij}(t)$ *en cada punto* del componente estudiado, por lo que su determinación (mediante una implementación computacional) requiere de la *discretización* del dominio (tanto espacial como temporal) en el cual deben resolverse las ecuaciones gobernantes del problema sujetas a las condiciones de borde (geométricas y/o naturales) y a las condiciones iniciales.

Cuando el componente nuclear analizado presenta una elevada complejidad geométrica, a menudo resulta imposible obtener la solución analítica de las ecuaciones diferenciales asociadas al modelo del problema físico abordado, y debe recurrirse a la aplicación de *métodos aproximados*.

El más conocido y utilizado de tales métodos es el denominado *método de elementos finitos* (MEF), que constituye una herramienta de cálculo potente para la resolución aproximada de las ecuaciones diferenciales asociadas al problema bajo estudio.

En el presente trabajo, las simulaciones de los distintos estados de carga (aplicados sobre un modelo tridimensional elástico y lineal del recipiente de presión del reactor nuclear CAREM) se llevaron a cabo mediante la utilización de un programa comercial de análisis por elementos finitos denominado *Abaqus*, y a partir de las mismas pudieron obtenerse, en cada punto y en cada instante, los valores de las componentes del tensor de tensiones y la tensión equivalente de Tresca.

4.2. Formulación matemática del problema de elasticidad 3D y el MEF

Sea $\Omega \subset \Re^3$ un dominio (abierto y acotado) ocupado por un sólido, cuyo contorno $\partial\Omega = \Gamma$ está conformado por la unión disjunta de una frontera Γ_D (denominada *frontera de Dirichlet*) asociada a las condiciones de borde geométricas (CBG) y una frontera Γ_N (denominada *frontera de Neumann*) asociada a las condiciones de borde naturales (CBN)(i.e. $\partial\Omega = \Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_N$ y $\Gamma_D \cap \Gamma_N = \Phi$).

La *formulación fuerte* del problema de elasticidad estacionario puede expresarse en los siguientes términos:

Dados un campo vectorial representativo de las fuerzas volumétricas $\boldsymbol{f} \in [L^2(\Omega)]^3$, un campo prescrito en la frontera de Dirichlet $\boldsymbol{g} \in [H^1(\Gamma_D)]^3$ y un campo vectorial en la frontera de Neumann $\boldsymbol{h} \in [L^2(\Omega)]^3$, y conocidos los parámetros positivos λ y μ, se busca la solución $\boldsymbol{u} \in [H^1(\Omega)]^3$ y el tensor de tensiones simétrico $\boldsymbol{\sigma}$ tal que se cumpla:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = -\boldsymbol{f} \text{ en } \Omega \tag{4.1}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T) \text{ en } \Omega \tag{4.2}$$

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{u}) = \lambda \mathrm{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} \text{ en } \Omega \tag{4.3}$$

satisfaciendo las condiciones de borde:

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{g} \text{ en } \Gamma_D \text{ (Condición de borde geométrica)} \tag{4.4}$$

$$(\lambda \mathrm{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \widehat{\boldsymbol{n}} = \boldsymbol{h} \text{ en } \Gamma_N \text{ (Condición de borde natural)} \tag{4.5}$$

Donde, para cierto dominio ψ, L^2 es el conjunto de las *funciones de cuadrado integrable*, definido como:

$$L^2(\psi) = \{ \ u \text{ integrables } : \int_\psi u^2 \mathrm{d}\psi < \infty\} \tag{4.6}$$

y donde H^1 es el *espacio de Sobolev* de orden 1, definido como:

$$H^1(\psi) = \{u \in L^2(\psi) : \frac{\partial u}{\partial x_i} \in L^2(\psi), \forall i\} \tag{4.7}$$

La expresión (4.1) representa la condición de equilibrio de un elemento diferencial de sólido, la expresión (4.2) plantea la compatibilidad geométrica entre deformaciones y tensiones (pues $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el tensor de pequeñas deformaciones, el cual que puede interpretarse

como la componente simétrica del tensor gradiente de desplazamientos) y la expresión (4.3) representa la ley de Hooke generalizada escrita en términos de los *parámetros de Lamé* (λ y μ) que mantienen, con el módulo de elasticidad del material E y con el coeficiente de Poisson ν, las siguientes relaciones:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{4.8}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{4.9}$$

Con el objeto de evitar la complicación asociada al manejo de magnitudes de varios tipos (deformaciones, tensiones, desplazamientos), las ecuaciones anteriores pueden reformularse de modo que la única incógnita sea el campo de pequeños desplazamientos. La elección de los desplazamientos como variables básicas del problema obedece a que, conocidos estos, la obtención de los campos de deformaciones y tensiones requiere simples derivaciones y operaciones algebraicas ordinarias.

Para obtener tales expresiones, se parte de las ecuaciones de equilibrio, de las ecuaciones de compatibilidad y de la ley de comportamiento lineal isótropa, escritas (por comodidad) de acuerdo a la notación de indices repetidos:

$$\sigma_{ij,j} = -f_i \tag{4.10}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \tag{4.11}$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda u_{k,k}\delta_{ij} \tag{4.12}$$

Agrupando se tiene:

$$\mu u_{i,jj} + \mu u_{j,ij} + \lambda u_{k,kj}\delta_{ij} = -f_i \tag{4.13}$$

y como u es una función bien comportada, se cumple que: $u_{j,ij} = u_{j,ji}$, por lo que resulta:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} = -f_i \tag{4.14}$$

Las tres ecuaciones anteriores ($i = 1, 2, 3$) se conocen como *ecuaciones de Navier* y admiten ser expresadas en función de operadores usuales en teoría vectorial de campos, lo que resulta cómodo si se han de expresar en otros sistemas coordenados no cartesianos:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{u}) + \mu\Delta\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{f} \tag{4.15}$$

El problema a resolver, expresado en términos de una única magnitud incógnita resulta:

$$\begin{cases} (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{u}) + \mu\Delta\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{f} \text{ en } \Omega \\ \boldsymbol{u} = \boldsymbol{g} \text{ en } \Gamma_D \\ (\lambda \mathrm{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{u}))\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{u})) \cdot \widehat{\boldsymbol{n}} = \boldsymbol{h} \text{ en } \Gamma_N \end{cases} \tag{4.16}$$

La resolución del problema mediante la aplicación del método de elementos finitos, en su formulación variacional, exige la multiplicación de la ecuación diferencial por una función de prueba bien comportada, y su posterior integración en todo el dominio.

$$\int_\Omega [(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{u}) + \mu\Delta\boldsymbol{u}] \cdot \boldsymbol{v} \, \mathrm{d}\Omega = -\int_\Omega \boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{v} \, \mathrm{d}\Omega \tag{4.17}$$

La formulación fuerte de (4.16) es equivalente a la formulación débil de (4.17), para todo $\boldsymbol{v} \in [H^1_D(\Omega)]^3$ con $H^1_D(\Omega) = \{v \in H^1(\Omega) : v \text{ satisface las CBG en } \Gamma_D\}$

Al proponer una solución aproximada expresada como combinación lineal de ciertas funciones de forma, y elegir (de acuerdo a algún criterio) la función de prueba, la forma integral de (4.17) se transforma en un sistema lineal de ecuaciones algebraicas en los coeficientes de la combinación lineal.

A partir de la resolución de dicho sistema (por algún método conveniente) se obtiene la solución aproximada del problema original. En general, el método de elementos finitos permite obtener sistemas algebraicos conformados por una matriz del sistema del tipo rala, lo cual facilita su resolución.

Debe considerarse sin embargo, que en modelos reales, las condiciones del problema físico en general no son estacionarias sino transitorias, y la ecuación de equilibrio involucra una derivada temporal de segundo orden. Más aún, en problemas termomecánicos deben incluirse términos que involucren al campo escalar de temperaturas en todo el dominio, el cual constituye una solución del problema de conducción tridimensional del calor, sujeto a las condiciones de borde apropiadas. El problema térmico puede expresarse de acuerdo a:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\theta}{\partial t}(\boldsymbol{x}, t) = \alpha\Delta\theta + G \text{ en } \Omega \\ q_S = -k\dfrac{\partial\theta}{\partial n} \text{ en } \Gamma_q \\ \theta = \theta_b \text{ en } \Gamma_b \\ \theta(\boldsymbol{x}, 0) = \theta_0(\boldsymbol{x}) \text{ en } \Omega \text{ (Condición inicial)} \end{cases} \tag{4.18}$$

donde $\boldsymbol{x}$ es un vector de posición genérico, $\theta(\boldsymbol{x}, t)$ es el campo escalar de temperaturas en el sólido, α es la difusividad térmica del material, G es el término fuente de la ecuación del calor, q_S es el flujo de calor en la frontera de *Neumann* Γ_q, k es el

coeficiente de conductividad térmica del material, θ_b es la temperatura prescrita en la frontera de *Dirichlet* Γ_b (con $\Gamma_q \cup \Gamma_b = \Gamma = \partial\Omega$ y $\Gamma_q \cap \Gamma_b = \Phi$), y donde θ_0 es el campo inicial de temperaturas.

El acoplamiento entre los problemas elástico y térmico se expresa mediante una ley constitutiva modificada (expresión (4.19)), que involucra una propiedad térmica del material (β), en adición a las 2 constantes elásticas independientes (λ y μ).

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{u}) = \lambda \mathrm{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} - \beta(\theta - \theta_0)\boldsymbol{I} \text{ en } \Omega \tag{4.19}$$

Todos estos aspectos dificultan enormemente el procedimiento de resolución, en adición a la dificultad inherente al proceso de mallado (discretización del dominio) de geometrías tridimensionales complejas.

Si bien el procedimiento de resolución de las ecuaciones gobernantes mediante el método de elementos finitos es programable, para verificar el cumplimiento de las reglamentaciones del código ASME, es conveniente utilizar un programa comercial de elementos finitos ya comprobado y testeado, que resuelva, en una geometría tridimensional compleja, el problema transitorio asociado a cargas termomecánicas fluctuantes. En la presente tesis, se optó por el programa comercial Abaqus, por ser el utilizado en el departamento de modelística de la gerencia Mecánica del proyecto CAREM 25 [17] [18] [19].

4.3. Sobre la elaboración de modelos usando Abaqus

Abaqus es un entorno interactivo usado para crear modelos de elementos finitos, llevar a cabo análisis estáticos y dinámicos, efectuar monitoreos y diagnósticos de trabajo, y evaluar resultados.

La creación de un modelo en *Abaqus* requiere: definición de la geometría (a través de los elementos y sus nodos), definiciones de materiales, definición de condiciones iniciales y condiciones de borde, establecimiento de restricciones cinemáticas y de interacciones entre distintas partes, definiciones de cargas y amplitudes, definición de propiedades del entorno y ajustes en el control de la salida [20].

El programa se encuentra estructurado en 11 (once) módulos que conforman el proceso de generación del modelo y simulación de eventos , a saber: el módulo *PART*, donde se define la geometría de las piezas más elementales que constituyen al modelo; el módulo *PROPERTY*, donde se definen los materiales a usar y se crean las denominadas *SECTIONS* (una *section* contiene información acerca de las propiedades de una parte o una región de ella); el módulo *ASSEMBLY* donde se crean las *instances* de las partes creadas y se posicionan en forma relativa unas a otras de acuerdo al sistema

global de coordenadas (pues cuando se crea una parte la misma es referenciada con su propio sistema coordenado), pudiendo eventualmente crearse *instances* conformadas por subensamblajes, en adición a las partes individuales; el módulo *STEP* donde se crean los *pasos de análisis* (cuya secuencia provee un modo conveniente de capturar cambios en las cargas y en las condiciones de borde, así como eventuales cambios en la geometría) y se especifican las salidas requeridas (componentes del tensor de tensiones, tensiones equivalentes: Tresca o Von Mises, desplazamientos, temperaturas, etc.); el módulo *INTERACTION*, donde se especifican las interacciones térmicas y mecánicas entre regiones de un modelo o entre una región y su entorno; el módulo *LOAD*, donde se definen las cargas, sus amplitudes y las condiciones de borde; el módulo *MESH*, donde se encuentran las herramientas que permiten generar el *mallado* de las partes y ensamblajes; el módulo *OPTIMIZATION*, donde pueden llevarse a cabo tareas de optimización; el módulo *JOB*, donde se lleva a cabo el análisis del modelo creado; el módulo *VISUALIZATION*, donde pueden observarse los resultados; y el módulo *SKETCH*, donde pueden crearse perfiles bidimensionales que ayudan a definir la geometría de las partes [20].

Una vez definidos los parámetros del modelo, y finalizada la simulación del estado de cargas supuesto, *Abaqus* genera un archivo de base de datos de salida (*Output database*) con extensión .odb, en el cual se encuentra toda la información pertinente al análisis efectuado.

La interfaz de *scripting* de Abaqus es una API (*Application Programming Interface*) a los modelos y datos usados en Abaqus, formada como una extensión del lenguaje de programación orientado a objetos *Python*. Esta interfaz puede usarse para llevar a cabo las siguientes acciones:

- Crear y modificar componentes de un modelo de Abaqus.
- Crear, modificar y llevar a cabo análisis de trabajos de Abaqus.
- Leer de y escribir en una base de datos de salida.
- Visualizar resultados de un análisis.

El acceso a las funcionalidades de Abaqus a través de *scripts* (o programas) presenta enormes ventajas de procesamiento en comparación al *acceso manual tradicional*, además de presentar enorme versatilidad en lo que al lenguaje de programación se refiere, pues el analista puede optar por usar *Python* (mediante la *Abaqus scripting interface API*) o *C++* (mediante las funcionalidades de la *C++ API*).

En la presente tesis, el acceso a los datos almacenados en los archivos de base de datos se efectuó mediante scripts de *Python*, lo cual resultó extremadamente conveniente en archivos .odb asociados a simulaciones multiframes de modelos conformados por

muchos elementos (recuérdese que el *análisis de fatiga* es un análisis puntual basado en la historia tensional, de modo que efectuar dicho análisis en todos los puntos del RPR resulta una tarea imposible si no se cuenta con una forma no manual de acceso a los datos) [20].

4.4. Simulaciones de estados de carga de operación normal y anormal en el RPR

4.4.1. Descripción general

El análisis de fatiga en el recipiente de presión del reactor nuclear CAREM 25 se llevó a cabo considerando un modelo conformado por materiales lineal-elásticos isótropos y homogéneos. La Tabla (4.1) muestra los parámetros representativos de cada uno de los materiales normalizados presentes en el RPR.

Tabla 4.1: Materiales normalizados presentes en el RPR.

Material	UTS min	Fluencia min	Temp. máx.	E	ρ	ν
-	(MPa)	(MPa)	(°C)	(GPa)	(kg/m)	-
SA-508 Gr.3 Cl 1	550	345	371	207	7750	0.3
SA-182 FXM-19	690	380	427	195	8870	0.31

La Figura (4.1) muestra un esquema del recipiente de presión del reactor junto a un detalle en la zona de acometida, mientras que la Figura (4.2) muestra el modelo de elementos finitos empleado en las simulaciones.

Por simplicidad, y aprovechando la geometría del recipiente de presión, se consideró un modelo sólido tridimensional conformado por una porción del RPR delimitada entre dos planos meridionales dispuestos a 15° entre sí.

4.4.2. Sobre el mallado

Abaqus presenta una gran versatilidad en cuanto a la selección de los tipos de elementos empleados en el mallado. En geometrías sólidas tridimensionales, pueden utilizarse elementos tetraédricos, prismas triangulares o elementos hexaédricos. Como regla general, en el mallado de un sólido deben siempre utilizarse elementos tan poco deformados como sea posible, de modo que la velocidad de convergencia y la precisión de las simulaciones se vean incrementadas. La Figura (4.3) muestra un esquema de los elementos asociados a geometrías sólidas 3D.

En el modelo de elementos finitos empleado en el presente trabajo, se efectuó un mallado con elementos hexaédricos de 20 nodos (denominados $C3D20R$: *3D 20-node quadratic isoparametric element*) y elementos prismáticos de base triangular de 15

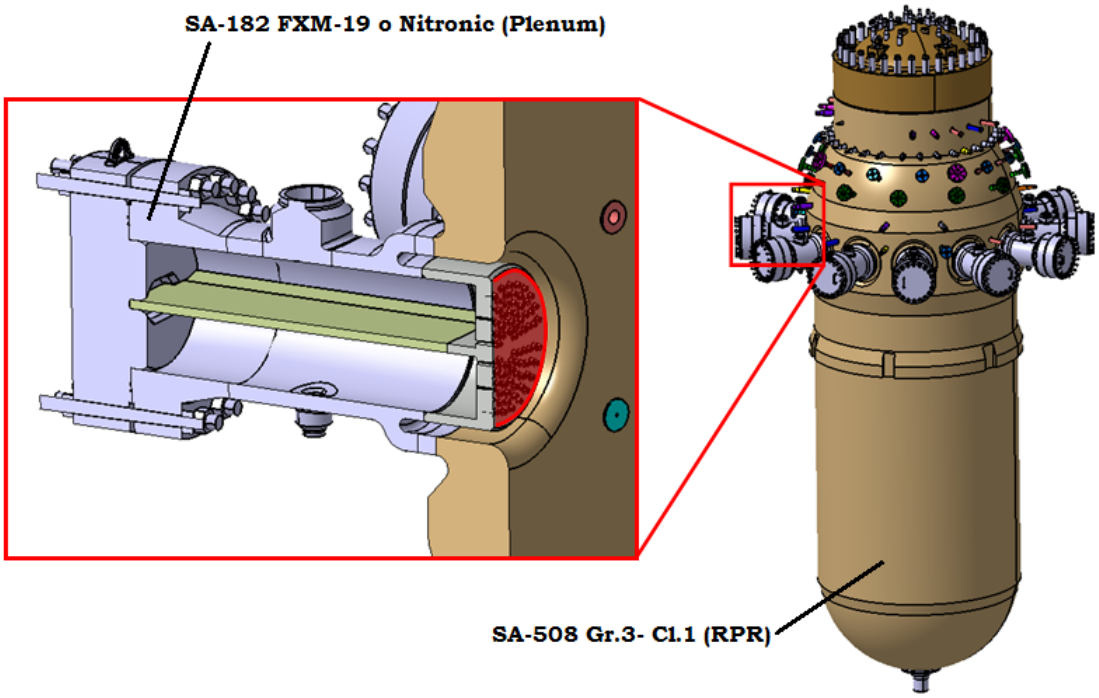


Figura 4.1: Esquema del Recipiente de Presión del Reactor. Detalle en zona de acometida.

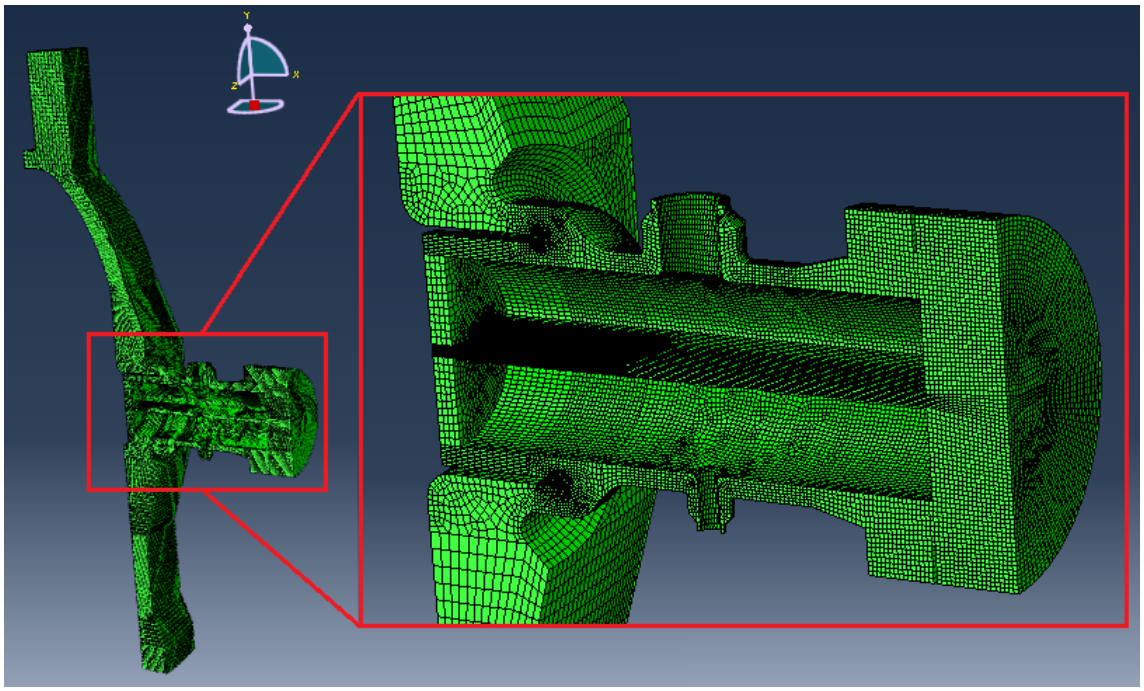


Figura 4.2: Modelo tridimensional de elementos finitos. Detalle en zona de acometida.

nodos (denominados $C3D15$: *15-node quadratic triangular prism element*), refinado en las zonas más complejas del RPR (zonas de curvaturas pronunciadas).

Cabe destacar que siempre resulta conveniente utilizar elementos de *integración reducida* (los cuales minimizan el número de puntos de integración), puesto que resultan computacionalmente menos costosos que los elementos de *integración completa*, además de reducir los efectos espurios (de origen numérico) como el *bloqueo por corte* y/o el *bloqueo volumétrico*. A modo de ejemplo, el elemento $C3D20$ es un elemento tridimensional hexaédrico de 20 (veinte) nodos que cuenta con 27 (veintisiete) puntos de integración, mientras que el elemento $C3D20R$ presenta solo 8 (ocho); luego, el ensamblaje de elementos es aproximadamente 3,5 veces más costoso para elementos tipo $C3D20$ que para elementos tipo $C3D20R$.

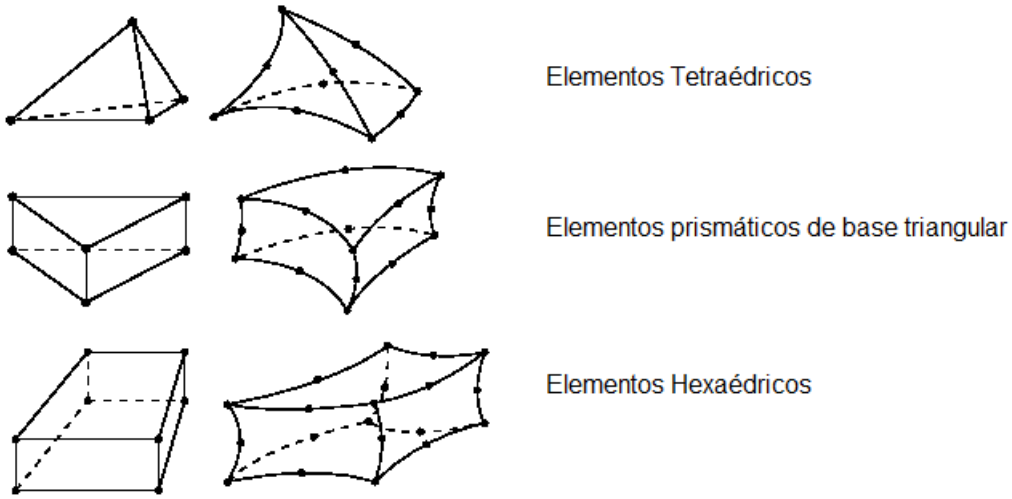


Figura 4.3: Tipos de elementos asociados a geometrías tridimensionales.

4.4.3. Sobre los estados de carga

Se entiende por *estado de carga* a cualquier cambio en las condiciones de carga impuestas sobre los componentes individuales, como consecuencia de un cambio en las condiciones generales de operación. El entendimiento de tales condiciones constituye la base para el diseño, dimensionado y análisis del comportamiento mecánico de los componentes y sus partes.

La especificación técnica sobre los estados de carga del RPR CAREM 25 reconoce como tales a aquellos originados por algunos de los siguientes factores:

- Presión interna y externa.
- Cargas de impacto, incluyendo fluctuaciones rápidas de presión.

- Peso del componente solicitado y su contenido normal bajo condiciones operativas o de ensayo, incluyendo la presión adicional de tipo estática o dinámica.
- Cargas sobre-impuestas por la presencia de otros componentes, equipos de operación, aislación, recubrimientos resistentes a la corrosión o erosión, cañerías, etc.
- Cargas variables debidas a vibraciones o sismos.
- Reacciones de cáncamos, anillos, bancadas u otro tipo de soportes.
- Efectos de la temperatura

Además, la especificación técnica dicta que todos los componentes deben ser analizados para 3 (tres) condiciones generales de carga, a saber:

- Estados de carga de diseño.
- Estados de servicio.
- Estados de carga de prueba.

El conjunto de cargas de diseño se define a partir de una selección e intensificación de las condiciones más frecuentes de servicio. Las cargas de servicio son aquellas aplicadas durante la operación del componente, establecidas de acuerdo a las condiciones de servicio a las que es sometido (Clase A: Condición normal de servicio, Clase B: Condición anormal de servicio, Clase C: Condición de emergencia o Clase D: Condición de falla). Finalmente, las cargas y condiciones de prueba se definen como aquellas que involucran: cargas de prueba hidrostática, cargas de inspección, cargas previstas por la ingeniería del componente, etc.

En todos los casos, por ser el RPR un componente clase 1, los cálculos y verificaciones deben efectuarse de acuerdo a lo establecido en la última versión vigente del código ASME III, sección NB.

La especificación técnica establece los lineamientos generales de análisis para evaluar la integridad estructural del componente, así como los criterios adoptados en los cálculos, y brinda los parámetros de diseño generales (A modo de ejemplo, la misma menciona que la presión de diseño es de 14,5 MPa y que la temperatura de diseño, necesaria para obtener las propiedades físicas y mecánicas de los materiales involucrados, es de $340°C$).

4.4.4. Resultado de la simulación en el RPR

Cada uno de los eventos simulados se encuentra asociado a un archivo de base de datos de salida, y su posterior evaluación a la fatiga depende no solo de los valores extremos alcanzados en cada repetición sino también del número de repeticiones.

En el presente trabajo, se supuso el caso más general de cargas (las no proporcionales) y se determinó el tensor de referencia en cada elemento de acuerdo al tiempo en el cual se alcanzó la máxima tensión equivalente de Tresca (este fue el *criterio* empleado para seleccionar el punto en el tiempo asociado a las condiciones extremas del ciclo).

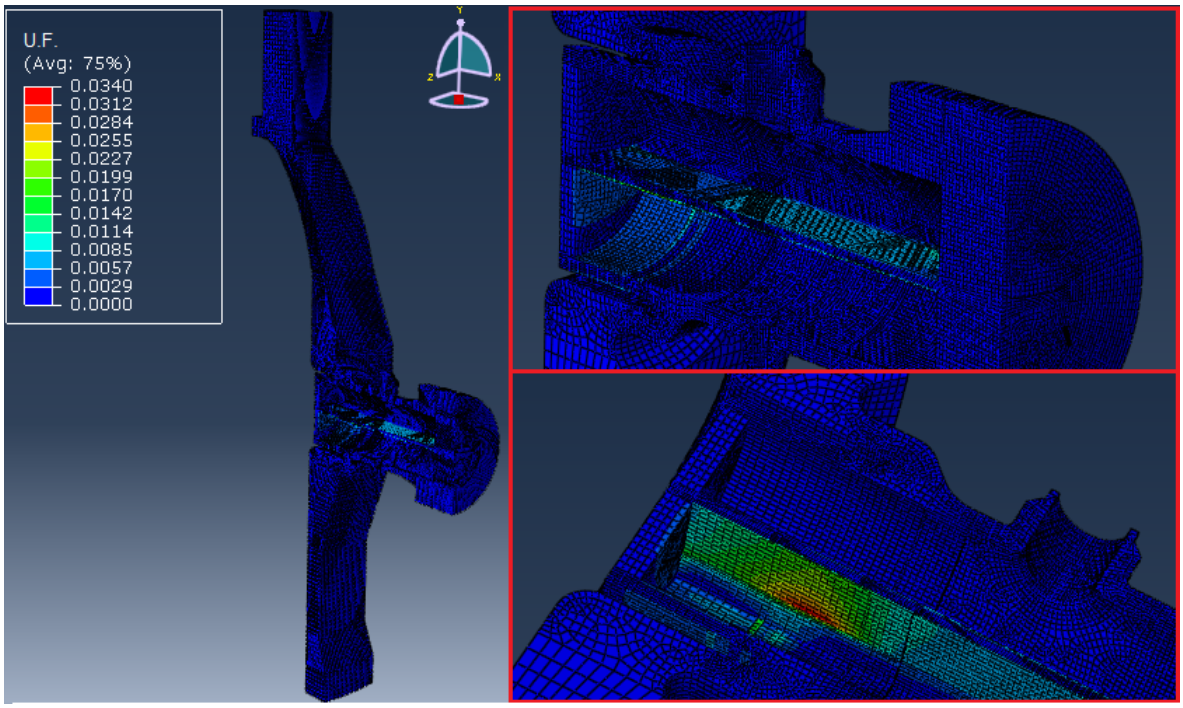


Figura 4.4: Simulación de un estado de carga en el RPR.

La Figura (4.4) muestra el resultado de la simulación de un evento consistente en un disparo espurio del sistema de extinción rápido (solo el transitorio térmico, sin considerar presión), repetido 900 (novecientas) veces. Dicho evento se traduce en una disminución de la potencia generada, una disminución de presión interna y un descenso en la temperatura. El algoritmo de cálculo del factor de uso se llevó a cabo considerando el procedimiento de direcciones principales variables y caracterizando a las condiciones extremas, como ya se mencionó, mediante la tensión equivalente de Tresca.

La dificultad del código radicó en el modo de asociación de cada elemento y sus datos, con las propiedades del material involucrado. La presencia de dicha dificultad se debe exclusivamente a la estructura interna de los archivos de base de datos, que organiza por un lado a los *datos del modelo* y por otro a los *datos resultantes del análisis* (La Figura (4.5) muestra un esquema de la estructura interna de un archivo de base de datos genérico). Para sortear dicha dificultad, se empleó el concepto de *identificador de material*, asociado con cada posición de un vector ordenado de etiquetas de elementos. De modo que, de acuerdo a la posición y al identificador, pudo determinarse el elemento en cuestión y el material (y por ende la curva de fatiga) correspondiente.

A partir de los datos obtenidos, puede inferirse que, bajo las suposiciones de repetición del evento considerado, no se producirá falla por fatiga (pues para todo punto,

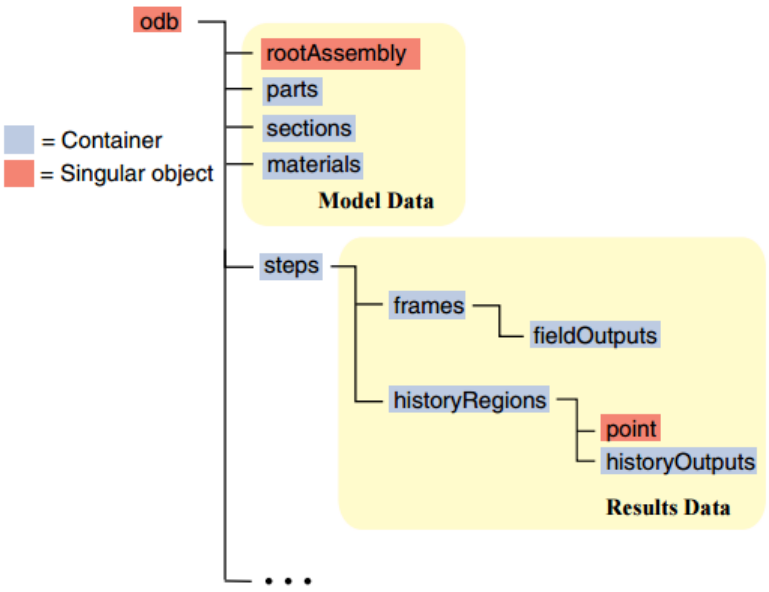


Figura 4.5: Esquema simplificado de la estructura interna de un archivo de base de datos de salida.

el factor de daño es inferior a la unidad).

El código correspondiente al análisis completo del RPR en un .odb con un solo step, se encuentra al final del presente trabajo. En el mismo puede observarse el modo de acceso a los diferentes datos del archivo de base de datos de salida (de acuerdo a la organización interna del mismo) y las funcionalidades del paquete de procesamiento de arreglos multidimensionales *NumPy* (*Numerical Python*), extremadamente útil en el desarrollo de la herramienta computacional de análisis de fatiga elaborada en el presente trabajo.

Capítulo 5

Análisis de fatiga para múltiples estados de carga

5.1. Nociones generales

El análisis completo de fatiga en componentes nucleares sometidos a cargas variables se basa en el estado de tensiones *en cada punto* del componente, procurando que las cargas de servicio especificadas se adecúen a los ciclos de tensión admisibles y considerando solo aquellas diferencias de tensión debidas a cargas fluctuantes incorporadas en las especificaciones de diseño [10].

Dichas especificaciones pueden incluir uno o más *eventos* que producen daño por fatiga (en el caso particular de seguir los lineamientos del código ASME, el mismo requiere de una evaluación que contemple solo los estados de carga encuadrados en las condiciones de servicio Clases A y B). Cada evento consiste en componentes de carga especificados en ciertos instantes de un periodo de tiempo que se repite determinado número de veces. Por ejemplo, un evento podría ser el encendido o apagado de la instalación analizada, ciertas condiciones transitorias de presión y temperatura, o cualquier otra acción cíclica o fluctuante [21].

Al tratarse la fatiga de un fenómeno multiparamétrico fuertemente asociado a la historia del estado tensional del componente, la secuencia de múltiples eventos resulta (en general) esencial en la predicción del comportamiento futuro del componente y en la evaluación de su aptitud ante cargas fluctuantes. Dicha secuencia puede encontrarse detallada en las especificaciones o bien ser aleatoria, y en general resulta desconocida durante la etapa de diseño.

Con el propósito de evaluar el peor escenario posible, una forma convencional de llevar a cabo el análisis es considerar la ocurrencia aleatoria de los eventos más perjudiciales en la vida a la fatiga, ignorando la transición entre eventos adyacentes. De esta forma, el orden de ocurrencia de los eventos no constituye un dato relevante en el

análisis.

Las cargas fluctuantes asociadas a cada evento pueden ser, como ya se mencionó, de dos tipos: *cargas proporcionales* (donde si bien el tamaño del círculo de Mohr varía en el tiempo en consonancia con la variación temporal de las magnitudes de tensión aplicadas, la orientación de los ejes principales permanece fija) y *cargas no proporcionales* (donde la orientación de los ejes principales cambia durante el ciclado).

La naturaleza del tipo de carga asociado a cada evento determina un modo distinto de cálculo del CUF, y aunque ambos modos se basan en la máxima diferencia de tensiones, el cálculo de dichas diferencias y la determinación de la intensidad de tensiones alternante varía significativamente de un caso a otro.

La metodología de cálculo de la intensidad de tensiones alternante (S_a) presentada en el código ASME III es aplicable solo cuando las diferencias de tensión pueden caracterizarse por ciclos, donde resulta factible establecer el valor de la intensidad de tensiones alternante a partir del módulo de la máxima fluctuación de amplitud en todo el periodo. Sin embargo, en casos más generales, donde las diferencias de tensión pueden caracterizarse solamente mediante puntos de reversión, es necesario definir otras metodologías que permitan conciliar distribuciones de tensión reales con ciclos simples de reversión, representando *historiales de tensión* de amplitud variable mediante *historiales ficticios* caracterizados por una serie de ciclos simples.

Cuando en el análisis tienen lugar múltiples eventos cíclicos de distinta naturaleza, las tensiones alternantes se calculan en base a un procedimiento de *cruce de transitorios*, que determina el rango de tensiones de acuerdo a la resta entre la máxima diferencia de tensiones y la mínima diferencia de tensiones, en todos los transitorios. Es decir, dicho rango se determina a partir de los siguientes diferencias extremas:

$$S_{12R} = S_{12max} - S_{12min}$$

$$S_{23R} = S_{23max} - S_{23min}$$

$$S_{31R} = S_{31max} - S_{31min}$$

El enfoque por *cruce de transitorios* presenta dificultades en la determinación de S_a, especialmente cuando se usa el procedimiento que considera direcciones principales variables (asociado a cargas no proporcionales). Cuando existen múltiples transitorios (i.e. eventos) es necesario definir las diferencias de tensión (máxima y mínima) en cada uno de ellos. Esta tarea resulta sencilla cuando se aplica el procedimiento de direcciones principales constantes puesto que la determinación del rango de fluctuación de las diferencias de tensión constituye el último paso (esto es, las diferencias de tensión máxima y mínima se determinan previo al cálculo del rango). Sin embargo, cuando se usa el procedimiento asociado a cargas no proporcionales, las diferencias de tensión máxima

y mínima asociadas a cada evento son desconocidas. Por ello, cuando se consideran direcciones principales variables es necesario un procedimiento general para definir las diferencias de tensión máxima y mínima de cada transitorio y su signo (positivo o negativo).

Una vez determinado el máximo rango de diferencias de tensión basado en todos los transitorios, el número de ciclos asociado con dicho rango debe determinarse de acuerdo a los criterios estipulados en la determinación del CUF.

Asumiendo que las diferencias de tensión máxima y mínima pertenecen a eventos distintos (cada uno con diferente número de ciclos), el mínimo de ambos transitorios determina el número de ciclos apropiados para el rango extremo. Por ejemplo: asumiendo que *la diferencia de tensión que contribuye al mínimo* presenta menos ciclos que *la diferencia de tensión que contribuye al máximo*, el número de ciclos asociado al rango extremo definido por el *máximo menos el mínimo* es el correspondiente a *la diferencia de tensión que contribuye al mínimo*. El daño a la fatiga debido a la contribución del mínimo queda entonces completo, de modo que dicha diferencia de tensión no es considerada en evaluaciones adicionales de S_a. Para *la diferencia de tensión que contribuye al máximo*, el número inicial de ciclos se reduce por aquellos aplicados y los ciclos restantes pueden usarse en evaluaciones adicionales.

Conforme los valores de S_a son desarrollados y los ciclos correspondientes son definidos, los números de ciclos admisibles asociados a los valores de S_a pueden obtenerse a partir de las curvas de fatiga apropiadas (curvas de diseño) y un factor de uso parcial puede calcularse para cada valor de S_a. El proceso de generación de factores de uso parciales debe continuarse hasta que todos los ciclos de todos los transitorios sean incluidos en la evaluación de fatiga. El último paso es efectuar la suma de los factores de uso parciales (regla de Palmgren-Miner) con el objeto de obtener el CUF para comparación con el límite de 1,0.

El método descripto anteriormente es adecuado para casos que involucran histogramas de tensión donde solo dos ciclos de tensión deben combinarse. El procedimiento se dificulta bastante cuando tienen lugar histogramas de tensión generales construidos a partir de múltiples transitorios conformados a su vez por múltiples ciclos. Por esto, resulta necesario implementar un método adicional apropiado que permita determinar los rangos de tensión y los ciclos de aplicación asociados (dicho método adicional constituye un *método de conteo de ciclos*).

Es importante destacar que el método de conteo de ciclos tiene una profunda influencia en el factor de uso final (CUF) y que en la actualidad, si bien el código ASME III (B&PV) brinda la metodología general para el análisis extendido de fatiga, debe aún implementar un método de conteo actualizado aplicable a los resultados 3D obtenidos mediante análisis por elementos finitos [2] [10] [21].

5.2. Métodos de conteo de ciclos

El propósito de todos los métodos de conteo de ciclos es considerar el efecto que historias de carga de amplitud variable tienen sobre los datos de fatiga y curvas obtenidas mediante ciclados de amplitud constante. Es decir, permiten *reducir* un espectro de tensiones variables en un set de reversiones simples de tensión, y a partir de ellos, evaluar los rangos de tensión o deformación y sus repeticiones.

La aplicación de la regla de daño lineal de Palmgren-Miner, usada para calcular el CUF, requiere el conocimiento de las condiciones (valor medio y amplitud de la deformación o tensión) con las cuales debe compararse el evento perjudicial, y en general la elección del método de conteo impacta significativamente sobre las predicciones resultantes del análisis de fatiga.

Todo buen método de conteo de ciclos debe considerar en su análisis al rango extremo definido a partir de los valores límites y considerar otros ciclos (menos relevantes que el extremo) de modo que sus rangos se vean maximizados. Esta regla puede justificarse asumiendo que el daño a la fatiga es una función de la magnitud del ciclo de histéresis o bien considerando que en fatiga (como en muchos otros campos) las fluctuaciones intermedias son menos importantes que las diferencias entre los valores extremos. Adicionalmente, todo buen método de conteo debe considerar cada parte del historial una sola vez, y también contar todos los rangos pequeños por encima de un valor umbral predeterminado [22].

Existen muchos métodos de conteo de ciclos, bien documentados en la literatura, que satisfacen las condiciones anteriores. Los más ampliamente utilizados son:

- Método del flujo de lluvia o de Rainflow (*Rainflow Counting Method* o RFCM).
- Método de conteo por picos (*Peak Counting Method* o PCM).
- Método de conteo por cruce de nivel (*Level-Crossing Counting Method* o LCCM).

5.2.1. Método de Rainflow (RFCM)

El método de Rainflow, propuesto originalmente por *Matsuisi* y *Endo* en 1968, es un método de conteo que intenta identificar ciclos cerrados de histéresis en la respuesta esfuerzo-deformación de un material sujeto a cargas cíclicas de amplitud variable.

A partir de la historia Carga-tiempo, Tensión-tiempo o Deformación-tiempo, representada de modo que el eje temporal sea vertical y creciente hacia abajo, el método establece una analogía entre las líneas horizontales que van entre un punto de reversión y el rango subsiguiente con un flujo de lluvia que desciende por una serie de techos estilo *pagoda* definido por la representación en picos y valles de la historia considerada [22].

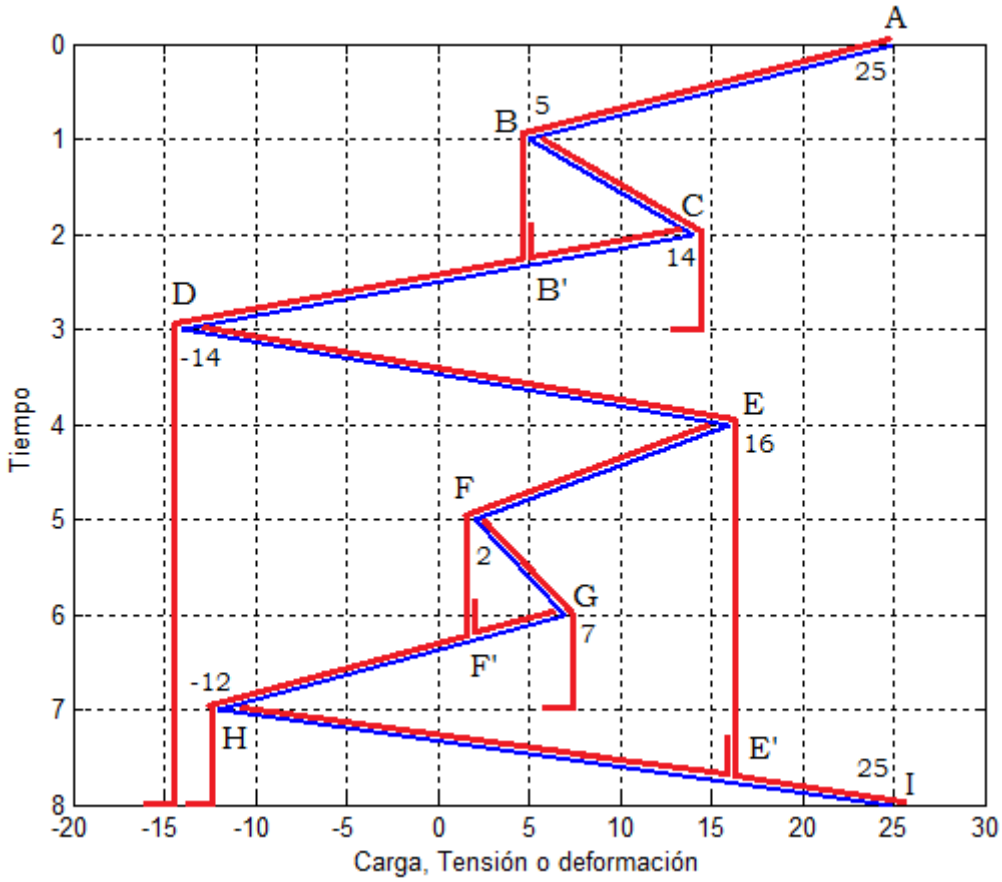


Figura 5.1: Ejemplo de aplicación del método de Rainflow.

El procedimiento de conteo se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reglas:

- Reducir la historia temporal a una secuencia de picos y valles.
- Representar la historia reducida con el eje de tiempo dispuesto en forma vertical (creciente hacia abajo). Imaginar dicha representación como una serie de techos estilo *pagoda*.
- Imaginar cada punto de reversión (pico o valle) como *fuente* de un flujo de agua que *cae* por los techos.
- Contar el número de medios ciclos considerando lo siguiente:

  1) Un flujo naciente en un pico se interrumpe cuando se alcanza un pico de magnitud mayor o igual al pico *fuente* o cuando se encuentra con un flujo previo.

  2) Un flujo naciente en un valle se interrumpe cuando se alcanza un valle de magnitud mayor o igual al valle *fuente* (i.e. un valle más profundo) o cuando se encuentra con un flujo previo.

  3) Cualquier flujo se interrumpe al final de la historia.

- Asignar una magnitud a cada medio ciclo igual a la longitud de la distancia horizontal recorrida por el flujo entre su comienzo y su final.

- Agrupar los medios ciclos de igual magnitud (pero sentido opuesto) para contar el número de ciclos completos. Típicamente, quedan algunos medios ciclos residuales.

La Figura (5.1) muestra la aplicación del método de conteo de ciclos por Rainflow a una historia reducida definida por picos y valles. La Tabla (5.1) muestra los rangos resultantes del método y el número de ciclos correspondiente.

Tabla 5.1: Ejemplo de aplicación: tabla final del método de Rainflow

Ciclo	Máximo	Mínimo	Rango	N. de ciclos
A-D-I	25	-14	39	1
B-C-B'	14	5	9	1
E-H-E'	16	-12	28	1
F-G-F'	7	2	5	1

5.2.2. Método de conteo por picos (PCM)

El método de conteo por picos identifica la ocurrencia de valores de carga, tensión o deformación máximos y mínimos relativos (i.e. picos y valles), pero solo considera en su análisis a los picos por encima de cierto nivel de referencia y a los valles por debajo del mismo nivel [23].

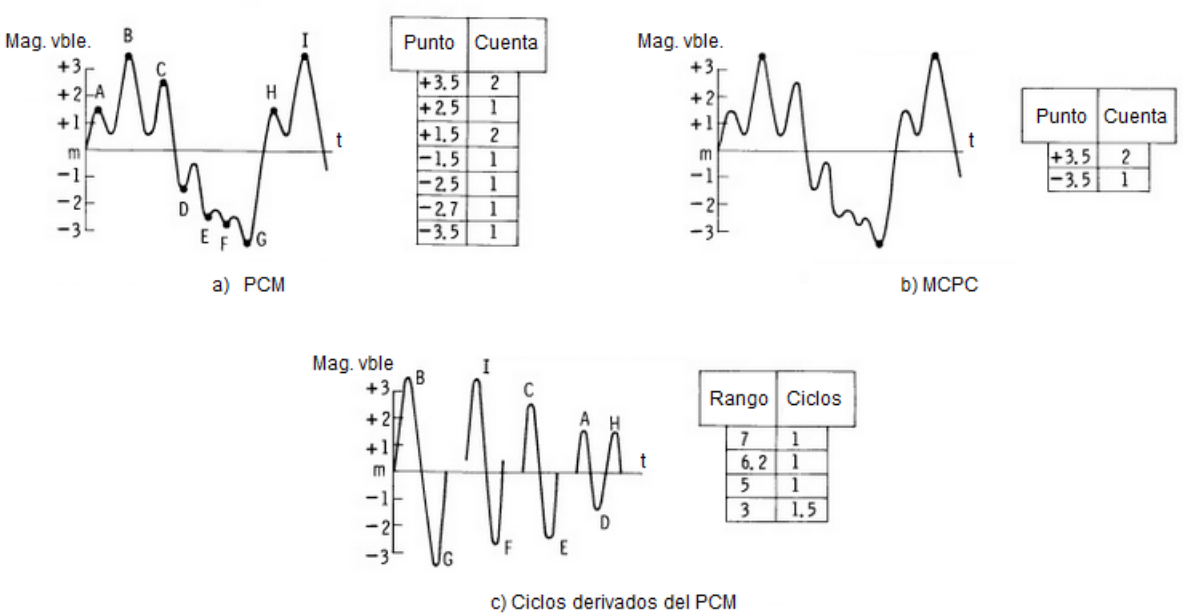


Figura 5.2: Ejemplo de aplicación del método de conteo por picos. ASTM E 1049-85

Este método construye rangos considerando el pico más alto y el valle más bajo, seguido del segundo rango más grande, etc., hasta que todos las cuentas son consideradas. Una simplificación usada a menudo para ignorar fluctuaciones de pequeña amplitud es efectuar un conteo de picos y valles basado en el cruce por el valor medio (*Mean-crossing peak counting* o MCPC), donde en vez de contar todos los picos y valles, solo se considera el mayor pico o valle entre dos cruces sucesivos por el nivel medio.

Métodos alternativos para derivar las cuentas de ciclos (consistentes, por ejemplo, en seleccionar pares aleatorios de picos y valles o considerar *todos* los picos y valles ignorando el nivel de referencia) son, a menudo, utilizados.

La Figura (5.2) muestra un ejemplo de aplicación del método de conteo por picos. En la misma puede observarse el criterio de identificación de picos y valles utilizado (tanto en el PCM como en el MCPC), y los ciclos derivados del PCM.

5.2.3. Método por cruce de nivel (LCCM)

El método de conteo por cruce de nivel determina ciclos simples de reversión en base a la definición de ciertos *niveles* arbitrarios. Una cuenta se almacena cada vez que una porción con pendiente positiva excede un nivel preseteado por encima del nivel de referencia, y cada vez que una porción con pendiente negativa cruza un valor preseteado por debajo del nivel de referencia. Los cruces por dicho nivel se cuentan, por convención, en las porciones con pendiente positiva del historial de cargas [23].

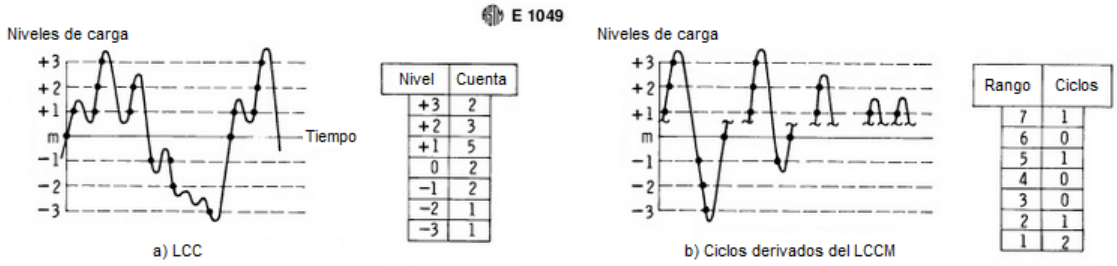


Figura 5.3: Ejemplo de aplicación del método de conteo por cruce de nivel.

En la práctica, se especifican restricciones sobre las cuentas por cruce de nivel con el objeto de ignorar variaciones de pequeña amplitud. Esto puede lograrse filtrando dichas variaciones antes del conteo o bien no efectuando cuentas en los cruces por la referencia, y especificando que se efectúe solo una cuenta entre dos cruces sucesivos por un nivel secundario menor asociado con cada nivel por encima de la referencia, o por un nivel secundario mayor asociado con cada nivel por debajo del nivel de referencia. La elección de los niveles es, en general, arbitrario y el método no exige que los mismos se dispongan equiespaciados.

El caso más perjudicial para el análisis de fatiga se deriva de las cuentas por cruce de nivel construyendo primero el ciclo más grande posible, seguido del segundo más grande, etc., hasta que todos los cruces de nivel son utilizados. Por convención los puntos de reversión de los ciclos ficticios se consideran ubicados sobre la línea media de dos niveles consecutivos.

La Figura (5.3) muestra un ejemplo de aplicación del LCCM. En la misma puede observarse el criterio de identificación de las cuentas y los ciclos derivados a partir de la implementación del LCCM.

5.3. Procedimiento general para la determinación del CUF

El análisis de fatiga en componentes nucleares sometidos a cargas fluctuantes es un *análisis puntual* basado en el estado tensional del componente y en la naturaleza de las diferencias de tensión.

Si el estado tensional de un punto genérico k del componente se encuentra caracterizado por $\sigma_{ij}^k(t)$ entonces, de acuerdo al tipo de carga aplicado (*proporcional* o *no proporcional*), pueden definirse las diferencias de tensión $S_{ij}^k(t)$ conforme a lo estipulado en el código ASME III (*procedimiento de cálculo de las diferencias de tensiones*).

Adicionalmente, si para cada tiempo se ordenan los autovalores del tensor de tensiones de modo que: $\sigma_1^k > \sigma_2^k > \sigma_3^k$, entonces puede caracterizarse a la historia temporal de la diferencia de tensión extrema S_{31}^k como aquella que determina la condición más conservativa de análisis (puesto que, por definición, abarca a los otros dos). Este criterio de selección de la diferencia de tensión se corresponde exactamente con aquellos definidos en el código ASME para cargas proporcionales y no proporcionales, puesto que el máximo valor de $S_{31}^k(t)$ coincide con el máximo maximorum de los $S_{ij}^k(t)$.

De acuerdo a la naturaleza de $S_{31}^k(t)$, el método de cálculo del CUF es diferente. Si dicha historia puede caracterizarse por ciclos, con histogramas de tensión que incluyen solo dos ciclos de tensión, la obtención de las intensidades de tensión alternantes S_a y de los correspondientes números de ciclos se efectúan conforme a lo establecido en el código ASME, respetando el procedimiento de cruce de transitorios. Sin embargo, si dicha historia solo puede caracterizarse por puntos de reversión o si es cíclica pero su histograma de tensiones es general y está compuesto por múltiples ciclos, la determinación de las intensidades de tensión alternante y sus ciclos asociados debe efectuarse según un *método de conteo* apropiado.

Finalmente, con el auxilio de la curva de fatiga correspondiente, cada valor de S_a puede asociarse con su respectivo número de ciclos admisibles, y los factores de uso parciales pueden determinarse en consecuencia (como los cocientes entre los números

de aplicaciones y los números de ciclos admisibles).

El último paso es aplicar la regla de combinación apropiada para calcular el factor final. De todas las posibles formas de combinación, la regla de daño lineal de Palmgren-Miner es la más usada.

La Figura (5.4) muestra una representación esquemática de la metodología de análisis, y su rol en el diseño de un componente nuclear solicitado por cargas fluctuantes.

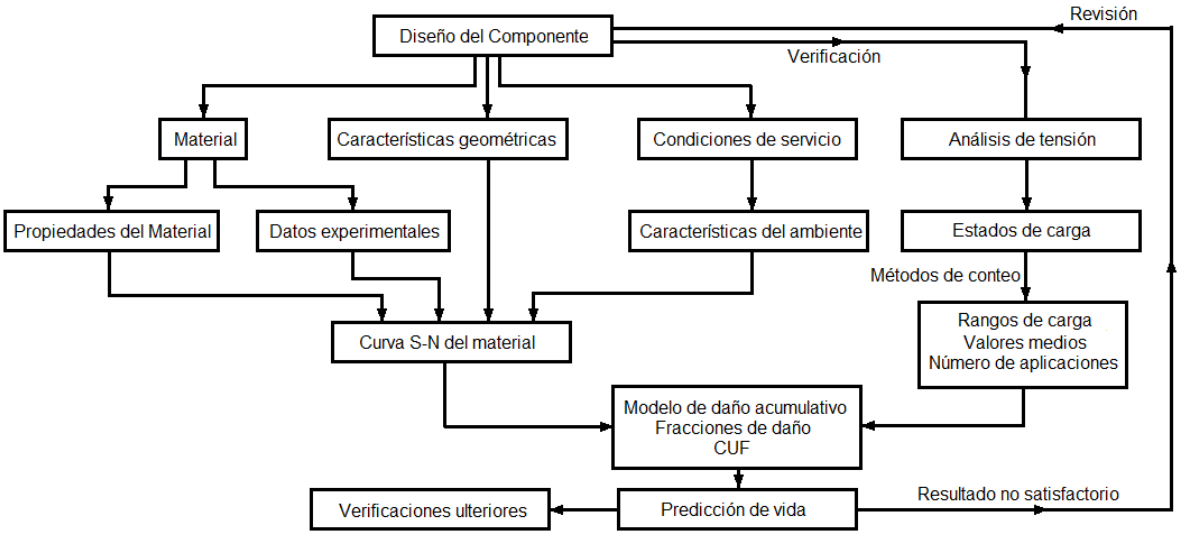


Figura 5.4: Metodología general de análisis.

5.4. Análisis de fatiga en el RPR

5.4.1. Criterios adoptados

En el presente trabajo, el cálculo del CUF en cada punto del RPR se efectúa considerando el caso más general de cargas: las no proporcionales, donde es factible el cambio permanente en la orientación de los ejes principales asociados a cada punto.

El procedimiento de cálculo de las diferencias de tensión se encuentra bien documentado en la norma para eventos caracterizados por ciclos, sin embargo, en casos más generales, la aplicación de dicho procedimiento requiere la adopción de ciertos criterios que adapten la metodología a casos complejos.

Los criterios adoptados en el presente análisis son:

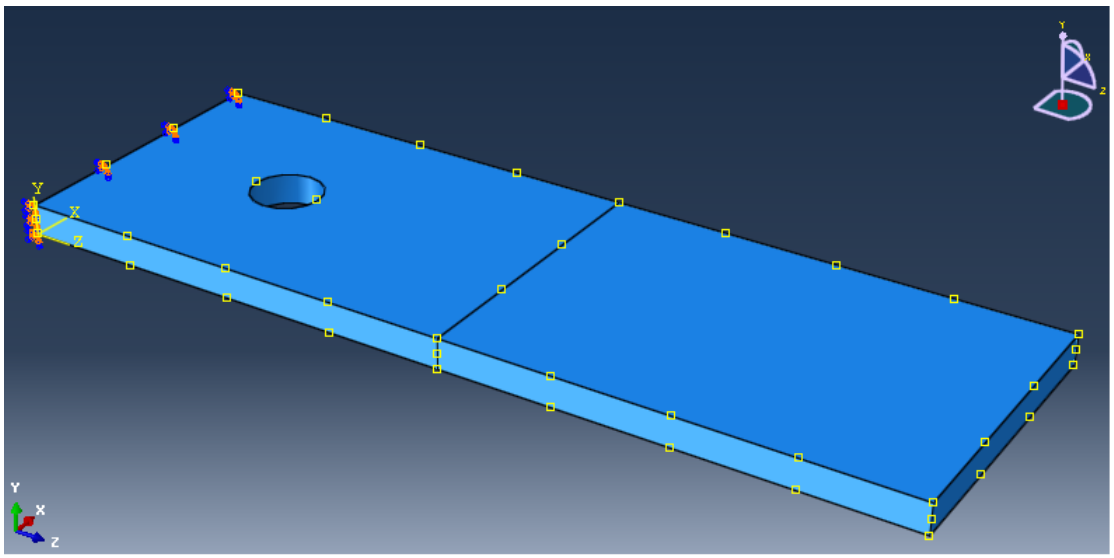
- Caracterizar las condiciones de la historia tensional total del punto considerado mediante la *tensión equivalente de Tresca*, de modo que el tiempo asociado a las *condiciones extremas* se corresponda con aquel en el cual la tensión equivalente de Tresca alcanza su máximo histórico.

- Adoptar como método de conteo de ciclos al procedimiento modificado de conteo por picos (PCM), donde se consideran *todos* los picos y valles ignorando el nivel de referencia, y donde la cuenta se efectua mientras puedan construirse rangos determinados por picos mayores a los valles.

5.4.2. Aplicación de la metodología a un ejemplo sencillo

En esta sección se presenta un sencillo ejemplo de aplicación del algoritmo de cálculo del CUF, de acuerdo a los lineamientos del código ASME III y a los criterios de análisis antes presentados.

La situación analizada consiste en una placa empotrada de acero, sometida a un esfuerzo de flexión provocado por una carga vertical variable en su extremo libre. La placa presenta además un agujero pasante que opera como concentrador de tensiones. La Figura (5.5) muestra la placa perforada, sus dimensiones geométricas y las características del material involucrado.



Características Geométricas		Características del Material	
Longitud (mm):	300	Material:	Acero SA 508 gr. 3 Cl 1
Ancho (mm):	100	Densidad (Tn/mm³):	7.75E-09
Espesor (mm):	10	Tensión UTS (MPa):	552
Diámetro del orificio (mm):	24	Módulo de Young (MPa):	181000 (@ 300 °C)
Distancia centro-orificio a empotramiento (mm):	60	Módulo de Poisson:	0.3

Figura 5.5: Ejemplo de aplicación del algoritmo de cálculo del CUF.

La Figura (5.7) muestra el resultado de la aplicación del método, asumiendo que el sistema se encuentra solicitado por dos eventos E_1 y E_2 que tienen lugar $N_1 = 300$ y $N_2 = 200$ veces, respectivamente.

El Evento 1 (E_1) corresponde a un esfuerzo constante de $1000N$ aplicado durante 5 s en forma ascendente en el extremo libre, y el Evento 2 (E_2) corresponde a un esfuerzo constante de $500N$ aplicado en forma descendente también durante 5 s. Se

simularon los eventos, asumiendo una duración de 200 s en cada uno de ellos, con la carga constante aplicada durante el intervalo $[95 - 100]$ s en ambos casos, y con una variación lineal en los demás tramos. La Figura (5.6) muestra las variaciones de carga supuestas.

Figura 5.6: Variación temporal de la carga en el extremo libre.

La Figura (5.8) muestra una ampliación de la zona más crítica, donde puede notarse la diferencia entre un análisis *grueso* por elementos (donde los cálculos se llevan a cabo en su centroide) y un análisis *fino* por nodos (donde los cálculos se llevan a cabo en los nodos de cada elemento). Se utilizó en el ejemplo un elemento C3D20R, conformado por 20 nodos y 8 puntos de integración.

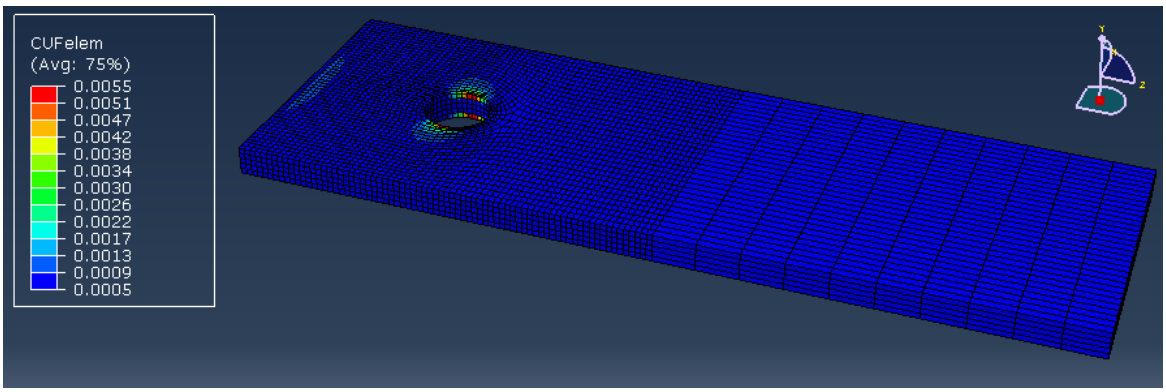


Figura 5.7: Resultado de la simulación (por elementos) en un ejemplo simple.

Nótese que los resultados obtenidos se corresponden exactamente con los esperados, puesto que a partir de la teoría de flexión, se sabe que las fibras más solicitadas son las fibras externas (que en un evento se encuentran en máxima compresión y en el otro en máxima tracción). Además, se satisface que en las inmediaciones del agujero circular,

por operar el mismo como un concentrador de tensiones, los puntos más exigidos son aquellos ubicados sobre la línea central perpendicular al esfuerzo remoto (variable) aplicado.

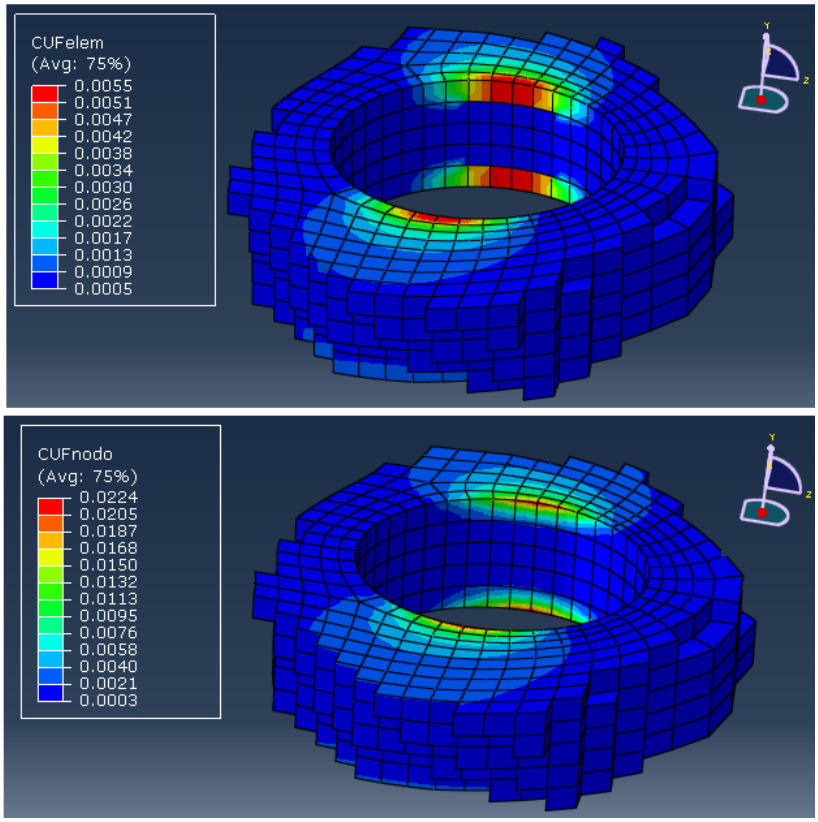


Figura 5.8: Ejemplo de aplicación del algoritmo: comparación entre un análisis llevado a cabo con los valores de tensión tomados en el baricentro de cada elemento y en los nodos de cada elemento.

La Figura (5.10) muestra, para el elemento indicado en la Figura (5.9), la variación temporal de las componentes del tensor de tensiones y de la tensión equivalente de Tresca.

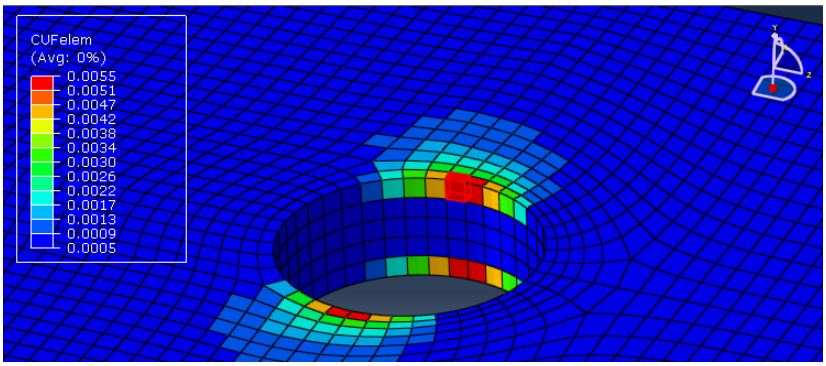


Figura 5.9: Análisis en un elemento particular.

El procedimiento de análisis expuesto en el algoritmo es simple: fijado el tiempo de ocurrencia de la máxima tensión de Tresca histórica, los valores de las componentes en

ese tiempo determinan un tensor de referencia que debe restarse al tensor de tensiones en cada tiempo.

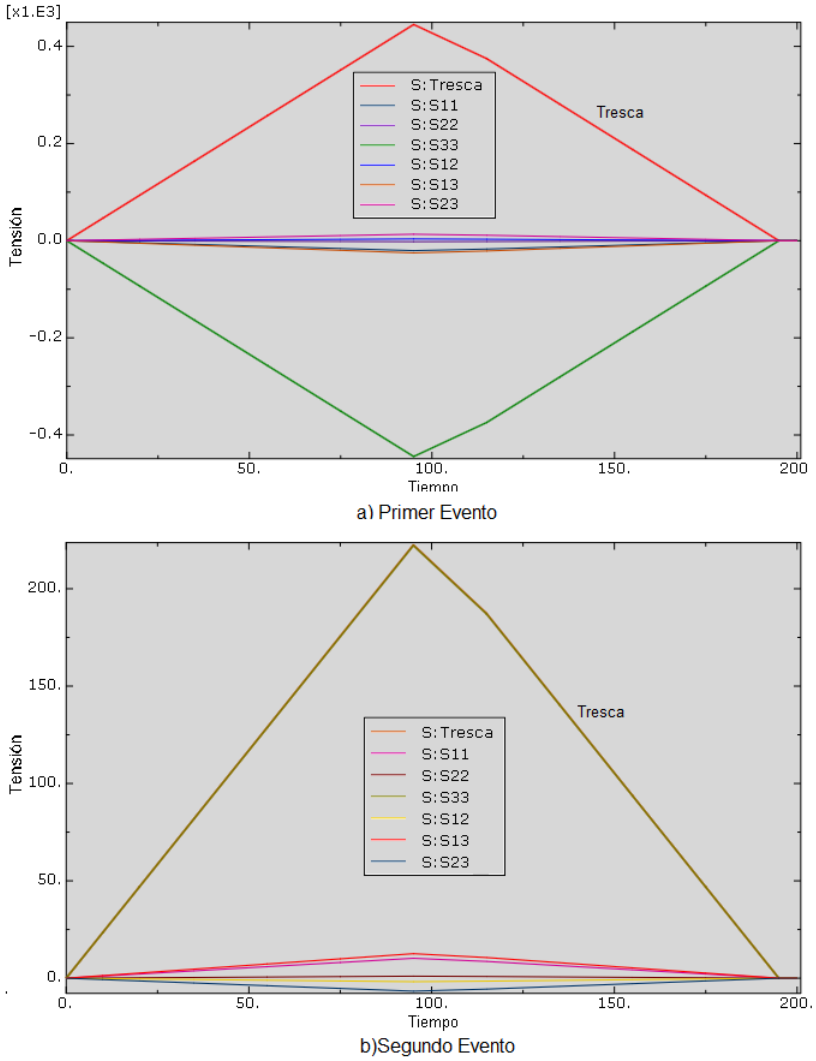


Figura 5.10: Variación temporal de las componentes del tensor de tensiones y de la tensión de Tresca, para el elemento bajo análisis, en cada evento.

El resultado de dicha diferencia es, en cada instante, un tensor simétrico a partir del cual pueden extraerse (en forma ordenada) los autovalores, y calcular con ellos el valor instantáneo de la máxima diferencia de tensión S_{31}.

La Figura (5.11) muestra la variación de la diferencia de tensión extrema (correspondiente al elemento indicado en la Figura (5.9)) en cada evento. Nótese que esta representación condensada solo tiene valor a modo de comparación, pero no representa el verdadero estado simulado (consistente en 300 repeticiones del Evento 1 y 200 repeticiones del evento 2).

De acuerdo a la variación temporal de la diferencia de tensión extrema $S_{31}(t)$, la aplicación de algún método de conteo permite determinar los rangos de tensión cíclicos y sus repeticiones.

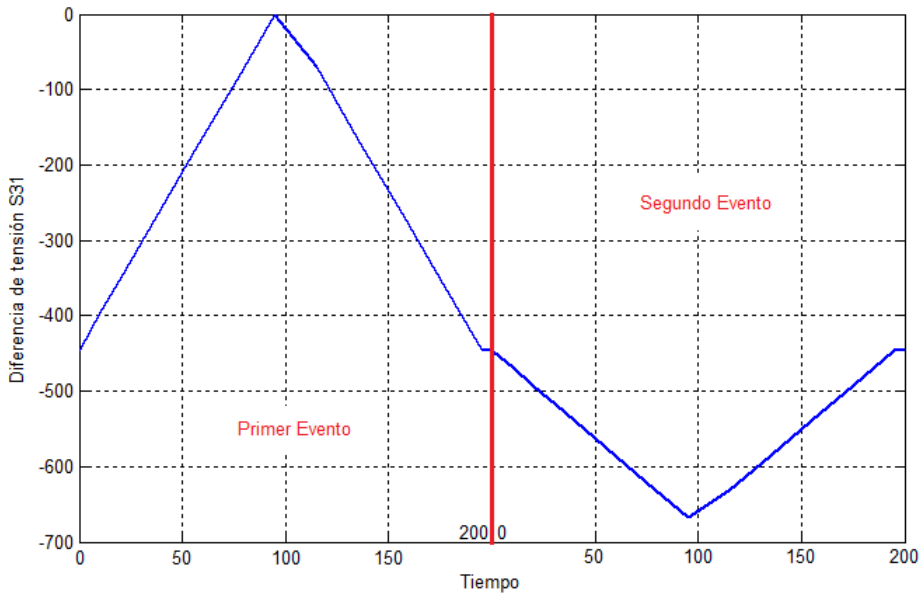


Figura 5.11: Variación temporal de la diferencia de tensiones extrema, para el elemento bajo análisis, en ambos eventos.

El algoritmo de cálculo considera el método de conteo de ciclos por picos modificado, que luego de reducir la historia real a una sucesión de picos y valles, construye rangos de acuerdo al máximo pico y al mínimo valle disponibles, efectuando esta construcción hasta agotar todos los posibles pares de puntos de reversión en los que el pico sea mayor al valle.

La determinación del conteo de rangos se efectúa simultáneamente con el cálculo de los factores de uso parciales, a partir de las tensiones alternantes fijadas como la mitad de los rangos y la curva de fatiga correspondiente al elemento analizado. Cabe mencionar, que en ciertas ocasiones donde existen grandes variaciones de temperatura, puede ser necesario corregir los valores de las intensidades de tensión alternantes antes de utilizar la curva de fatiga. Dicha corrección consiste en multiplicar el valor de cada intensidad de tensiones por la relación entre el módulo de Young asociado a la curva utilizada, y el módulo de Young a la temperatura de operación. La razón de dicha corrección se basa en el hecho que las curvas de fatiga se desarrollan a partir de datos de deformación que se transforman en tensión por la aplicación de la ley de Hooke.

Finalmente, la obtención del factor final asociado al elemento, se lleva a cabo sumando los factores de uso parciales.

La Tabla (5.2) muestra la identificación de picos y valles (con sus respectivos números de repeticiones), y la Tabla (5.3) muestra la aplicación directa del método de conteo en el cálculo del CUF, considerando la curva de fatiga de la Figura (3.5).

A partir del análisis anterior (detallado para uno de los elementos más críticos del componente) puede inferirse que, bajo las condiciones de carga consideradas, no se producirá falla por fatiga en el componente (pues en todos los puntos, el coeficiente de

Tabla 5.2: Identificación de picos y valles

Valor de picos (MPa):	-445.085	0
Número de repeticiones de picos:	400	300
Valor de valles (MPa):	-667.627	-445.085
Número de repeticiones de valles:	200	600

Tabla 5.3: Cálculo del CUF aplicando el método de conteo por picos modificado.

Pico	Valle	nPico	nValle	n	Rango	Salt	N	UF
0	-667.627	300	200	200	667.627	333.814	38500	0.0052
0	-445.085	100	600	100	445.085	222.543	390000	0.0003
-445.085	-445.085	400	500	400	0	0	Infinito	0
CUF (a partir de la regla de daño lineal) :								0.0055

daño acumulado es inferior a la unidad).

5.4.3. Simulaciones en el RPR

El modelo de elementos finitos empleado en las simulaciones de múltiples estados de carga es igual al empleado en la simulación de un solo estado de carga (Capítulo 4), es decir, se trata aquí también con un modelo sólido tridimensional conformado por una porción del recipiente de presión delimitada por dos planos meridionales con una apertura de 15° entre sí.

En primer lugar, se llevó a cabo el análisis de fatiga en un set de elementos del RPR, asociado al material SA-182 FXM-19 (conocido como *Nitronic*), suponiendo la ocurrencia de dos estados de carga distintos: Un ciclado de presión a plena potencia, con una presión media de 12,25 MPa y una amplitud de 0,75 MPa, de ocurrencia diaria (Evento NA-03 de la especificación técnica sobre estados de carga); y un estado de carga equivalente conformado por eventos iniciantes postulados por el departamento de seguridad nuclear, que incluyen: inserción espuria de reactividad y anomalías en la distribución de potencia, aumento o disminución de la remoción de calor por parte del sistema secundario, rotura de un tubo de G.V, etc., con una ocurrencia estimada de 145 veces en los 40 años de vida útil del reactor CAREM (Evento NB-06 de la especificación técnica sobre estados de carga).

La Figura (5.12) muestra la ubicación global de la zona analizada y los resultados obtenidos, asumiendo un período anual de análisis [es decir 365 aplicaciones del primer evento, y 50 aplicaciones del segundo (suposición conservativa)]. A partir de los resultados obtenidos puede inferirse que, bajo las condiciones de carga supuestas, no ocurrirá falla por fatiga en el set de elementos analizado.

En segundo lugar, se llevó a cabo el análisis en un set de elementos del RPR (también asociado al material comercial *Nitronic*), pero asumiendo la ocurrencia de

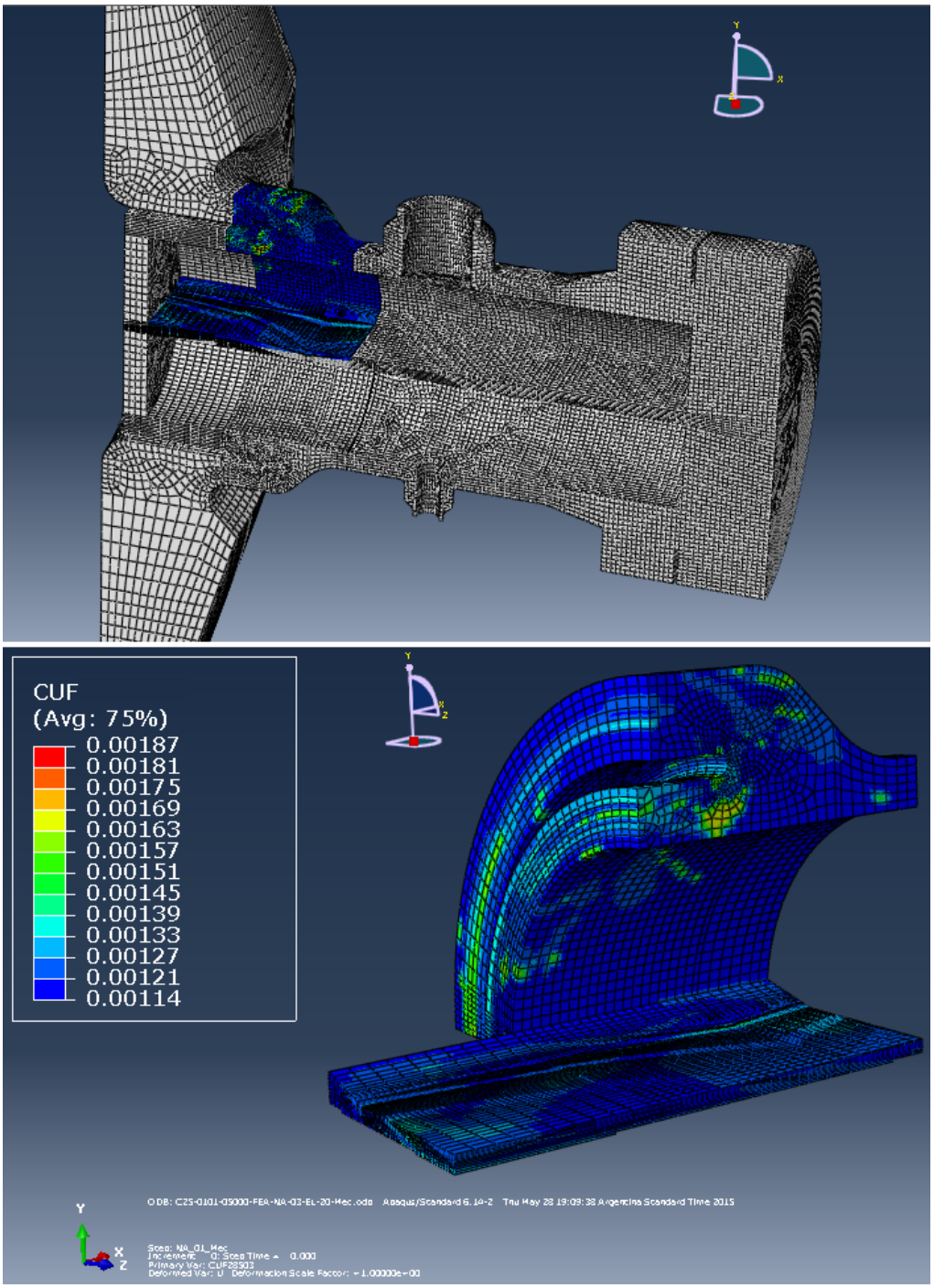


Figura 5.12: Análisis de fatiga en un set de elementos del RPR, asumiendo un par de estados de carga.

3 (tres) eventos de operación anormal: Calentamiento desde un estado de parada fría con recipiente de presión abierto hasta un estado de operación a potencia normal, con una ocurrencia de 240 veces durante la vida útil del reactor (Evento NA-02a de la especificación técnica sobre estados de carga); Falla en la regulación del caudal de alimentación a los G.V. (evento vinculado al accionamiento del sistema de extinción rápida del reactor), con una ocurrencia de 0,1 veces por año (Evento NB-04 de la especificación técnica); y Falla en la regulación de la temperatura de alimentación a los G.V., con consecuencias estructurales directas sobre los plena y las uniones entre el RPR y los plena, con una ocurrencia de 0,1 veces por año (Evento NB-05 de la especificación técnica).

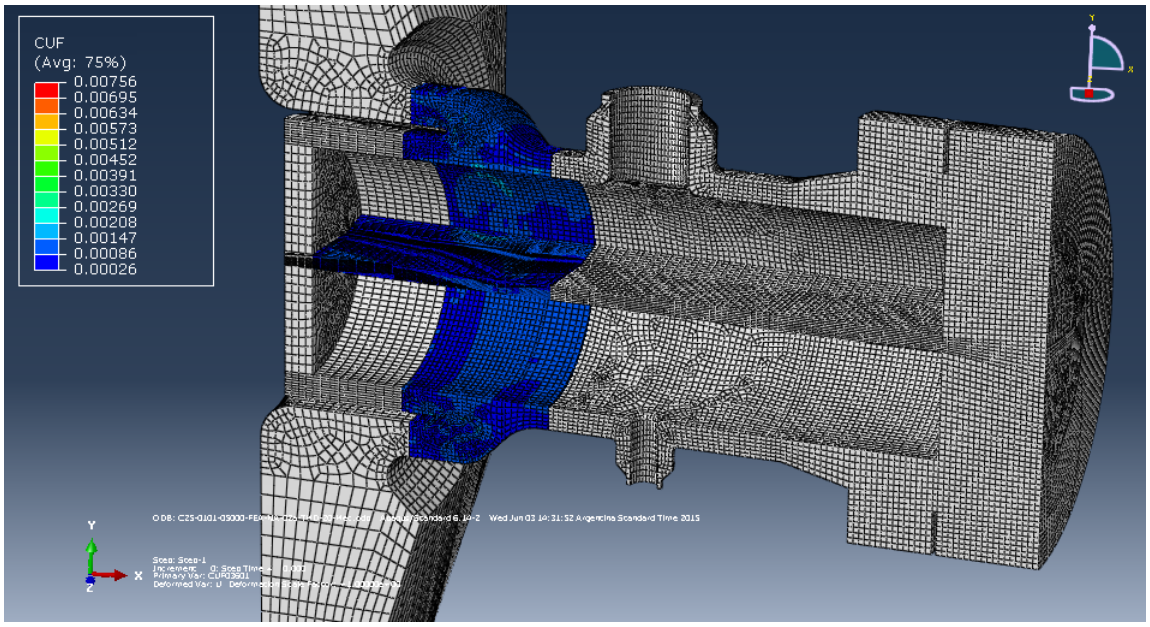


Figura 5.13: Análisis de fatiga en un set de elementos del RPR, asumiendo tres estados de carga.

La Figura (5.13) muestra la ubicación global del set de elementos analizados, mientras que la Figura (5.14) muestra los resultados obtenidos considerando un período de análisis igual a la vida útil del reactor. A partir de los mismos, puede inferirse que, bajo las suposiciones de carga consideradas, la región del RPR analizada no fallará por fatiga (puesto que el coeficiente de daño acumulado es inferior a la unidad en todos los puntos).

Para tener noción del tipo de variación tensional ocasionado por los estados de carga del segundo análisis , resulta útil seguir la historia termomecánica de algún elemento arbitrario. A tal fin, considérese el elemento indicado en la Figura (5.14), correspondiente a la zona con mayor CUF del set estudiado.

La Figura (5.15) muestra la variación de las componentes del tensor de tensiones de Cauchy y de la tensión equivalente de Tresca del elemento considerado, para cada uno de los eventos. Nótese que ninguna de las tensiones varía de forma cíclica, lo cual

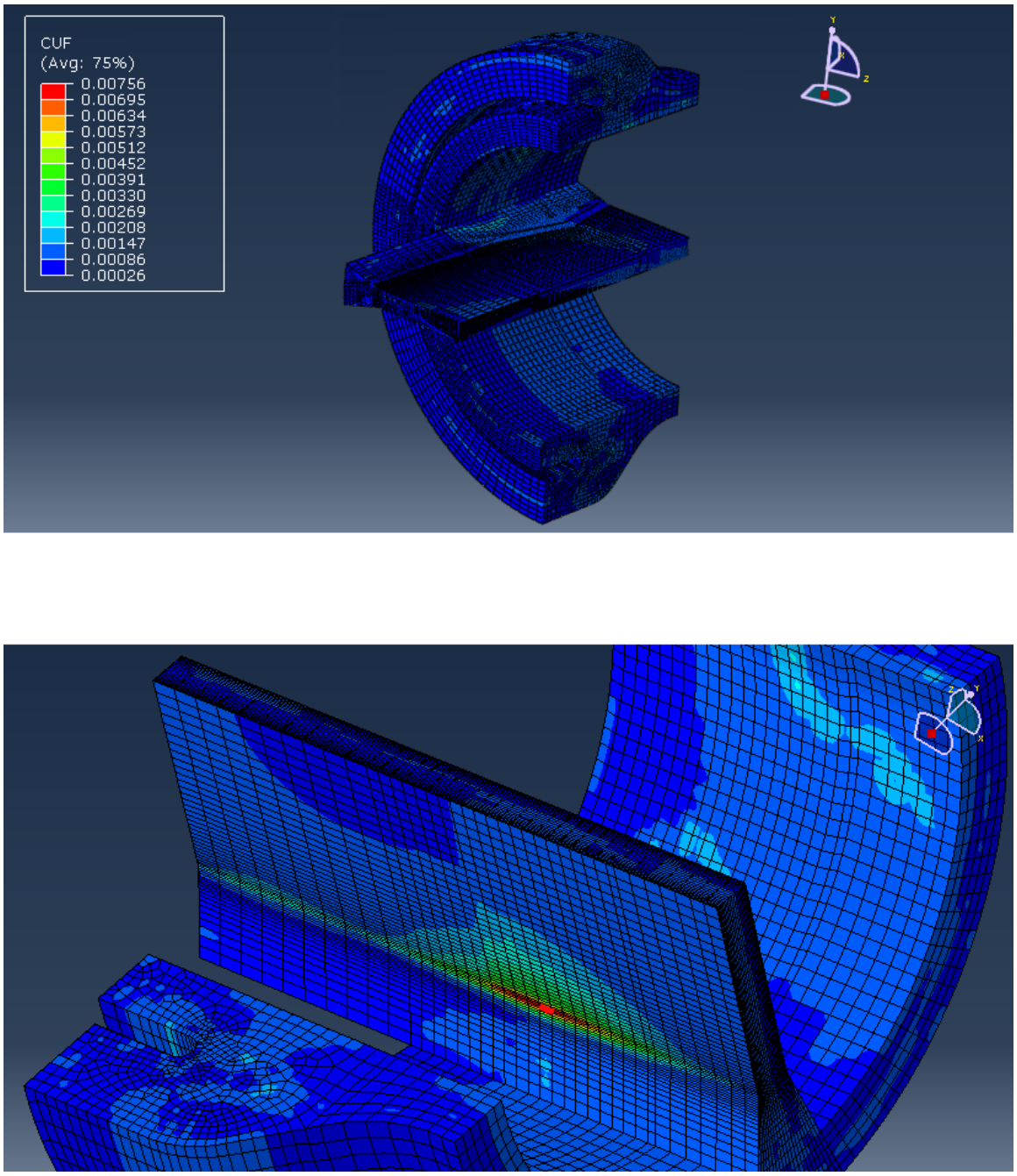


Figura 5.14: Resultados en un set de elementos del RPR, asumiendo tres estados de carga catastróficos.

explica la necesidad de aplicar un *método de conteo* apropiado en el análisis de fatiga, para transformar variaciones temporales caracterizadas por puntos de reversión en un conjunto de ciclos simples de tensión.

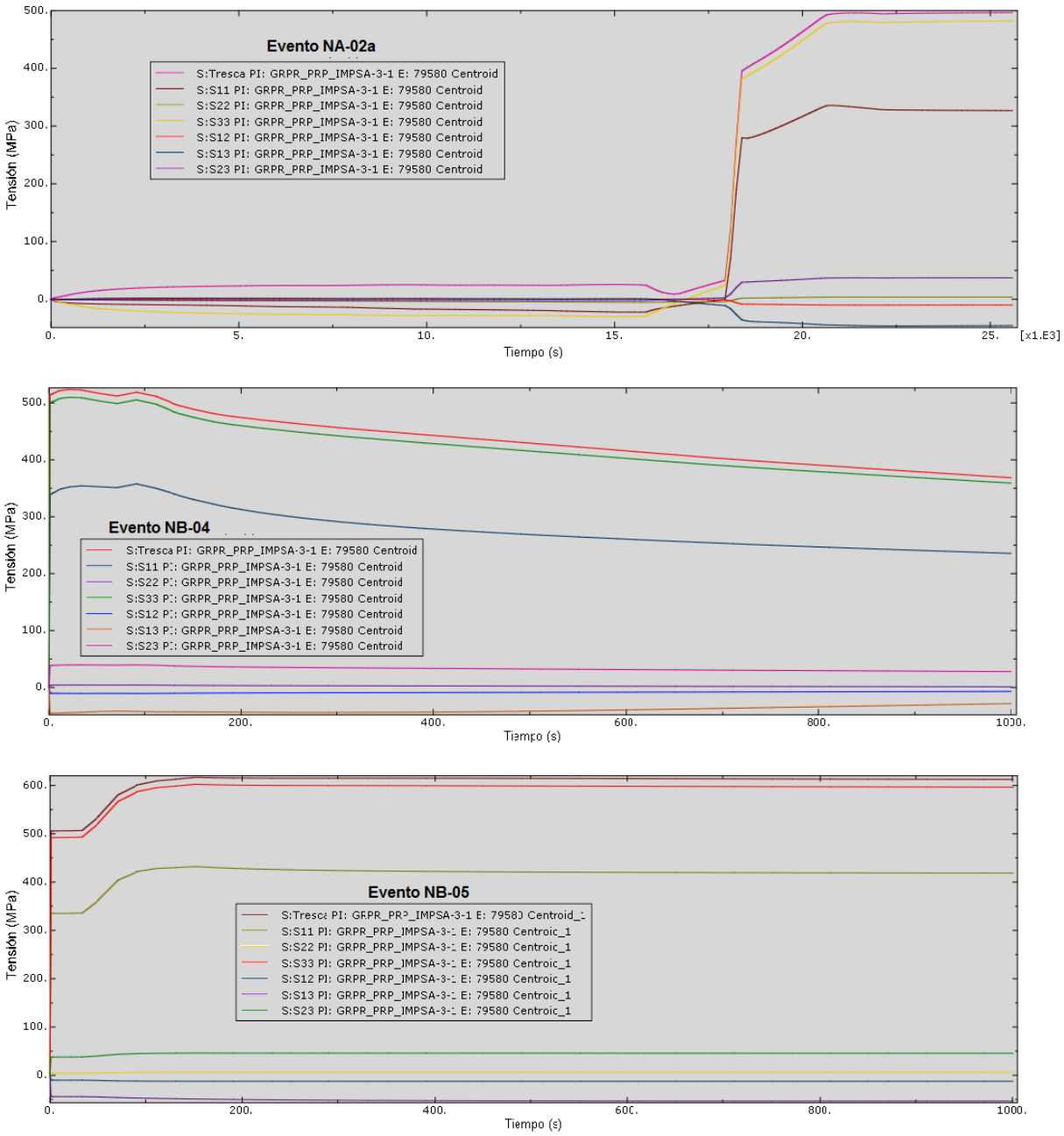


Figura 5.15: Variación temporal de las componentes del tensor de tensiones y de la tensión equivalente de Tresca del elemento considerado, en cada evento.

5.4.4. Sobre la aplicabilidad del modelo elástico lineal

La metodología general de análisis de fatiga implementada en el presente trabajo considera materiales que presentan un comportamiento elástico lineal. Dicha suposición

requiere, sin embargo, de una verificación de aplicabilidad por comparación de algún parámetro adecuado con cierto límite definido conservativamente.

El código ASME propone, a tal fin, que a partir del sistema de categorización de tensiones y de la naturaleza de las mismas, se defina una intensidad de tensiones representativa del estado tensional y mediante la definición de un límite apropiado, se recurra, eventualmente, a la aplicación de un factor de corrección sobre las intensidades de tensión alternantes empleadas en el análisis de fatiga, en caso de superarse dicho límite.

La intensidad de tensiones mencionada se deriva a partir del valor más alto (en cualquier punto a través del espesor de una sección) de las tensiones de membrana (local o general), más las tensiones primarias de flexión, y más las tensiones secundarias, debidas todas a la presión de servicio especificada y a los efectos térmicos asociados a las condiciones de operación.

El código ASME III (B&PVC) establece que el valor admisible del máximo rango de dicha intensidad de tensiones es $3.S_m$, siendo S_m el valor de la tensión admisible del material considerado (documentada en la sección II del código ASME).

La verificación de aplicabilidad del análisis elástico en estados tensionales que superan (al menos localmente) la tensión de fluencia del material, resulta esencial para garantizar que los valores asignados a las intensidades de tensión alternantes se encuentran del lado conservativo de diseño. Si localmente se supera la tensión de fluencia del material, el análisis de tensiones térmicas debe valerse de las ecuaciones de elasticidad, pero con una relación modificada de Poisson ν_p definida como:

$$\nu_p = \max\ (0{,}5 - 0{,}2(\frac{S_y}{S_a}), \nu) \tag{5.1}$$

donde ν es el módulo de Poisson del material considerado en el análisis elástico, S_y es la tensión de fluencia del material (evaluada a la temperatura media en el ciclo) y S_a es el valor de la intensidad de tensiones alternante, obtenido a partir de la curva de fatiga, para el número de ciclos especificado.

Por otro lado, si la intensidad de tensiones supera el valor admisible establecido por el código, las tensiones alternantes deben penalizarse con un factor de corrección K_e, que provoca un *incremento* en las mismas. Dicho factor depende del tipo de material y se encuentra tabulado en el código [24].

La determinación de la intensidad de tensiones se lleva a cabo de acuerdo a la metodología DBA de *linealización de tensiones*, la cual permite *descomponer* a cada una de las componentes del tensor de Cauchy en una tensión de membrana, una tensión de flexión y una tensión de pico, a lo largo de una línea de análisis bien definida, denominada *línea de clasificación de tensiones* (LCT). Dicha descomposición permite calcular tensiones equivalentes a partir de sendos tensores y efectuar las comparaciones

pertinentes con el límite impuesto en el código.

Procedimiento de linealización de tensiones

El procedimiento de linealización de tensiones tiene por objeto determinar, en cierto instante, los parámetros a y b de modo que una componente genérica del tensor de tensiones definida de acuerdo a la función $\sigma = \sigma(x)$ (donde x es la coordenada de posición sobre la LCT, que puede tomar valores entre 0 y el espesor de la zona considerada t) pueda expresarse como $\sigma(x) = a.x + b$, conservando el área bajo la curva tensión-distancia y el momento de primer orden de dicha área respecto del origen del sistema coordenado (ubicado en el primer punto de la LCT, donde $x = 0$).

Aproximando la curva tensión-distancia ($\sigma = \sigma(x)$) con la poligonal definida por los puntos obtenidos en la línea de clasificación correspondiente ($fit(x)$), pueden definirse las integrales: $I_1 = \int_0^t fit(x)\,dx$ e $I_2 = \int_0^t x.fit(x)\,dx$, que representan área y momento de primer orden de la poligonal ajustada, respectivamente. Las integrales I_1 e I_2 pueden calcularse numéricamente implementando el método de los trapecios (debido al caracter poligonal del ajuste).
Conocidos los valores de I_1 e I_2, los parámetros de la linealización se obtienen de la igualdad de áreas:

$$I_1 = \int_0^t (a.x + b)\ dx = \frac{a.t^2}{2} + b.t \tag{5.2}$$

y de la igualdad de momentos:

$$I_2 = \int_0^t x.\,(a.x + b)\ dx = a.\frac{t^3}{3} + b.\frac{t^2}{2} \tag{5.3}$$

Dichas igualdades pueden expresarse de forma matricial: $I = T.A$, donde:

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$T = \begin{pmatrix} \frac{t^2}{2} & t \\ \\ \frac{t^3}{3} & \frac{t^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

Resolviendo el sistema matricial para la incógnita A, se obtienen las relaciones (5.4) y (5.5).

$$a = \frac{-6}{t^2}.I_1 + \frac{12}{t^3}.I_2 \tag{5.4}$$

$$b = \frac{4}{t}.I_1 - \frac{6}{t^2}.I_2 \tag{5.5}$$

Los parámetros a y b se determinan para cada una de las componentes del modelo tridimensional. Para una componente genérica, a partir de la expresión: $\sigma(x) = a.x + b$ pueden determinarse los parámetros: $S_L = \sigma\left(\frac{t}{2}\right)$, $S_{(L+b)0} = \sigma(0)$ y $S_{(L+b)t} = \sigma(t)$. Es a partir del conocimiento de éstos parámetros que puede armarse el tensor de membrana local, definido de acuerdo a:

$$S_L = \begin{pmatrix} S_L^{11} & S_L^{12} & S_L^{13} \\ S_L^{21} & S_L^{22} & S_L^{23} \\ S_L^{31} & S_L^{32} & S_L^{33} \end{pmatrix}$$

(cuyos autovalores constituyen las tensiones principales de membrana local), el tensor de membrana local más flexión en la cara interna:

$$S_{(L+b)0} = \begin{pmatrix} S_{(L+b)0}^{11} & S_{(L+b)0}^{12} & S_{(L+b)0}^{13} \\ S_{(L+b)0}^{21} & S_{(L+b)0}^{22} & S_{(L+b)0}^{23} \\ S_{(L+b)0}^{31} & S_{(L+b)0}^{32} & S_{(L+b)0}^{33} \end{pmatrix}$$

(cuyos autovalores constituyen las tensiones principales de membrana local más flexión en la cara asociada a la posición $x = 0$), y el tensor de membrana local más flexión en la cara opuesta:

$$S_{(L+b)t} = \begin{pmatrix} S_{(L+b)t}^{11} & S_{(L+b)t}^{12} & S_{(L+b)t}^{13} \\ S_{(L+b)t}^{21} & S_{(L+b)t}^{22} & S_{(L+b)t}^{23} \\ S_{(L+b)t}^{31} & S_{(L+b)t}^{32} & S_{(L+b)t}^{33} \end{pmatrix}$$

(cuyos autovalores constituyen las tensiones principales de membrana local más flexión en la cara asociada a la posición $x = t$).

A partir de las ternas de autovalores obtenidas, la aplicación de los criterios de falla permite definir una tensión equivalente (Tresca, Von Mises, etc) asociada a las tensiones de membrana, otra asociada a las tensiones de membrana más flexión en el punto inicial y otra a las tensiones de membrana más flexión en el punto final. Estas últimas son las que deben ser consideradas en la verificación del modelo elástico lineal para comparación con el límite $3.S_m$.

La metodología hasta ahora expuesta considera solo el análisis en una linea de

clasificación y en un instante de tiempo. Sin embargo, el criterio de verificación en el RPR debe generalizarse exigiendo que el máximo maximorum de las intensidades de tensión en todos los tiempos de una misma LCT sea menor al valor admisible de $3S_m$, y más aún, dicha condición debe alcanzarse *para toda línea de clasificación válida* de acuerdo a las especificaciones del código.

Debe tenerse presente que, en caso de no cumplir el criterio, es posible considerar el método elastoplástico simplificado, en el cual se calcula un factor K_e que penaliza las tensiones alternantes y permite la inclusión de zonas donde el material se encuentra en el rango plástico. Dichos cálculos también se llevan a cabo a partir de los resultados del modelo elástico, por lo que es una extensión del mismo. Esta aclaración es importante, puesto que debe entenderse que toda la metodología expuesta anteriormente aplica también al caso en que no se satisfaga el criterio $3Sm$, y que la única diferencia es la inclusión de un factor de corrección penalizante.

Si bien la verificación de aplicabilidad del modelo elástico lineal mediante la metodología DBA no se incluye en el presente trabajo, cabe mencionar su importancia como análisis ulterior al de *fatiga*, para garantizar que las predicciones obtenidas a partir de consideraciones elásticas valen aún cuando los mecanismos de daño local se corresponden con fenómenos elastoplásticos.

Capítulo 6

Conclusiones

Se llevó a cabo una revisión y aplicación de la metodología de análisis de fatiga (de acuerdo a ASME III) en el recipiente de presión del reactor nuclear CAREM 25. Para ello, se empleó un modelo tridimensional de elementos finitos conformado por una porción del RPR delimitida por dos planos meridionales con apertura de 15°, implementado en el programa comercial *Abaqus*.

Los criterios expuestos y utilizados en el presente trabajo constituyen una *generalización* de aquellos (establecidos en el código) aplicables a cargas cíclicas con histogramas simples de tensión o a estados de carga individuales que admiten caracterizarse solo por su máximo rango. En todo el análisis, se consideró el caso más general de cargas (las no proporcionales) y se fijó a la tensión equivalente de Tresca como el indicador más conveniente de las condiciones extremas en estados de carga complejos.

Además, para el caso de cargas variables caracterizadas no por ciclos sino por puntos de reversión, se empleó en el análisis el *método de conteo por picos modificado*, que pretende formar rangos de tensión a partir del pico disponible más alto y el valle disponible más bajo, de modo que la obtención de rangos se corresponda con la formación de una sucesión decreciente (en tamaño) de ciclos de histéresis en la gráfica tensión-deformación cíclica.

La implementación computacional del análisis de fatiga en el RPR se efectuó mediante *scripts* en el lenguaje de programación orientado a objetos *Python*, usando la interfaz de *scripting* de *Abaqus* en la extracción, postproceso y escritura de datos de los archivos .odb.

La herramienta computacional de análisis de fatiga desarrollada en el trabajo presenta enormes ventajas respecto al análisis manual tradicional, ya que resulta *extremadamente versátil* y *ajustable a distintas condiciones de análisis*. La misma contempla: combinación de múltiples estados de carga termomecánicos; eventual inclusión de factores de corrección por temperatura, condiciones ambientales o incumplimiento de las condiciones elástico-lineales; presencia de múltiples materiales en la región de análisis;

existencia de múltiples *steps* conformados a su vez por múltiples *frames*; cambios en el número de aplicaciones de carga, etc.

A partir de la implementación del código a *múltiples estados de carga* en una región acotada del RPR, pudo inferirse que, bajo las condiciones supuestas, el mismo no fallaría por fatiga puesto que el campo escalar resultante de daño acumulado (CUF) es, en todos los puntos analizados, inferior a la unidad. Sin embargo, para garantizar la *integridad estructural* del componente, debe llevarse a cabo el análisis para *todos* los estados de carga estipulados en las especificaciones de diseño (combinados de la manera más perjudicial) en *todo* el RPR, junto con sus correspondientes verificaciones, aún cuando se cumplan las condiciones que eximen al diseñador de llevar a cabo dicho análisis.

Apéndice A

Scripts de Python

A.1. Análisis de fatiga para un estado de carga

El presente *script* permite efectuar el análisis de fatiga de un componente nuclear sometido a un único estado de carga (i.e. un .odb), tomando como datos de entrada: El archivo .odb, los nombres de las instances involucradas, el nombre del step (por simplicidad se supone que existe solamente uno), las curvas de fatiga pertinentes y el número de aplicaciones del evento. El programa devuelve una visualización del *campo escalar de daño acumulado* en todo el componente (debe indicarse el nombre y una breve descripción de la salida).

```
# -*- encoding: utf-8 -*-

from odbAccess import *
from abaqusConstants import *
from abaqus import *
from odbMaterial import*
from odbSection import*
from visualization import*
import numpy as np
import time
import os

#Inicio de la cuenta de tiempo
t0=time.clock();
# Ingreso del nombre del archivo de base de datos (.odb)
Odbs=['E9312_B_mec_SP.odb',]
# Apertura del .odb
myOdb= openOdb(path= Odbs[0])
# INFORMACION UTIL del .odb
# Instances:
print 'INFORMACION␣ASOCIADA␣AL␣.odb\n'
instances = myOdb.rootAssembly.instances
```

```
NumInst=len(instances.values())
print 'Se␣detectaron␣',NumInst,'␣Instances.\n'
for instanceName in myOdb.rootAssembly.instances.keys():
        print 'Nombre:␣',instanceName,'\n'
# Sections y materiales. Relacion con las instances:
allSections = myOdb.sections
NumSect= len(allSections.values())
print 'Se␣detectaron␣',NumSect,'␣Sections␣en␣total.\n'
print 'Correspondencia␣entre␣sections␣e␣instances:'
for instance in instances.values():
        assignments = instance.sectionAssignments
        print 'Instance␣:␣',instance.name
        for sa in assignments:
                print '␣Section␣:␣',sa.sectionName
print '\nCorrespondencia␣entre␣materiales␣y␣sections:\n'
for contador in range(NumSect):
        print 'Section␣name:', allSections.keys()[contador]
        print 'Material␣name:', allSections.values()[contador].
           material
        print '\n'
# Steps:
print 'Steps:\n'
for stepn in myOdb.steps.keys():
        print stepn

# Extraccion de los datos
print 'COMIENZO␣DEL␣ANALISIS.\n'
Instancess=['GRPR_PRP_IMPSA-3-1','PART-1-1',]
Stepss=['Step-1',]
lastStep= myOdb.steps[Stepss[0]]
b=1   # Inicializacion el identificador de material en 1
flag=0

# Barrido por las instances
for j1 in range(len(Instancess)):
        Set=myOdb.rootAssembly.instances[Instancess[j1]]
        FRAMES= len(lastStep.frames)    # Numero de frames de la
           instance
        ELEMENTS= len(Set.elements)     # Numero de elementos de la
           instance
        COMPONENTS= 6      # Porque se trata de un modelo
           tridimensional.

        # Inicializacion de los arreglos
        T=np.zeros([ELEMENTS,FRAMES,COMPONENTS])
        T_tr=np.zeros([ELEMENTS,FRAMES])
        Elements=np.zeros(ELEMENTS,dtype=np.int)
```

```
Stress='S'
frame=lastStep.frames

#Carga del campo de tensiones

for framevar in range(FRAMES): # BARRIDO POR LOS FRAMES
        allFields = frame[framevar].fieldOutputs
        if (allFields.has_key(Stress)):
                isStressPresent = 1
                stressSet = allFields[Stress]
                if Set:
                        stressSet = stressSet.getSubset(region
                           =Set,position=CENTROID)
                StressValues=stressSet.values
        for ELEMENTO in range(ELEMENTS):
                # Obtencion de las componentes del tensor en
                   cada elemento y en cada frame
                T[ELEMENTO][framevar][:]=StressValues[ELEMENTO
                   ].data
                # Obtencion de la tension de Tresca en cada
                   elemento y en cada frame
                T_tr[ELEMENTO][framevar]=StressValues[ELEMENTO
                   ].tresca
                # Labels de los elementos y correlacion con
                   ELEMENTO
                Elements[ELEMENTO]=StressValues[ELEMENTO].
                   elementLabel
        print 'Frame analizado: ', framevar+1, 'de ', FRAMES
np.save('T',T)
np.save('T_tr',T_tr)
np.save('Elements',Elements)
print 'Final de la adquisicion.\n'

# creacion del vector de identificadores de material
print 'Generando el vector de identificadores.\n'
assignments=Set.sectionAssignments
# vector de identificadores de material en la instance
identif=np.zeros([ELEMENTS,2])
idx=0
for sa in assignments:
        region=sa.region
        elements=region.elements
        print 'La section : ',sa.sectionName, 'se identifica
           con el id= ',b
        for e in elements:
                identif[idx][0]=e.label
                identif[idx][1]=b
```

```
                idx=idx+1
        b=b+1
np.save('identif',identif)

# Analisis de acuerdo a ASME III
print 'Inicio del analisis de acuerdo a los lineamientos del
   codigo ASME.\n'
# Vector de tensiones alternantes en cada elemento:
Salt01= np.zeros([ELEMENTS])
for ELEMENTO in range(ELEMENTS):
        S12=np.zeros([FRAMES]) #inicializacion de los vectores
             de diferencias de tensin
        S23=np.zeros([FRAMES])
        S31=np.zeros([FRAMES])
        autov=np.zeros([FRAMES,3])   # Matriz de autovalores
        TIMEPR = T_tr[ELEMENTO][:].argmax()     # frame en que
             se alcanza el maximo Tresca(criterio)
        Ti= np.array([T[ELEMENTO][TIMEPR][[0,3,4]],T[ELEMENTO
           ][TIMEPR][[3,1,5]],T[ELEMENTO][TIMEPR][[4,5,2]]])
           # tensor de ref
        for framevari in range(FRAMES):
                autov[framevari][:]= np.linalg.eig( np.array([
                     T[ELEMENTO][framevari][[0,3,4]],T[
                    ELEMENTO][framevari][[3,1,5]],T[ELEMENTO][
                    framevari][[4,5,2]]]-Ti))[0]
                idx= autov[framevari][:].argsort()
                autov[framevari][:]=autov[framevari][idx]   #
                    ordeno autovalores

        S12=abs(autov[:,2]-autov[:,1]) # calculo las
           diferencias de tensiones principales
        S23=abs(autov[:,1]-autov[:,0])
        S31=abs(autov[:,0]-autov[:,2])
        Salt01[ELEMENTO]=max ([max(S12), max(S23),max(S31)])
           *0.5
np.save('Salt01',Salt01)
print 'El vector de tensiones alternantes ha sido generado.\n'

# Las etiquetas de los elementos varian segun la forma de
   recorrido (sea por sections o por fieldOutputs)
# Para uniformizar: ordeno los datos (componentes, tresca,
   Salt e ident.material) de acuerdo a los labels (de menor a
    mayor)
# Ordeno el vector de elementos, el arreglo T y T_tr (mtodo
   quicksort de menor a mayor)
idxx=Elements.argsort()
Elements[:]=Elements[idxx]
```

```
Salt01[:]=Salt01[idxx]
for framevar in range(FRAMES):
        for comp in range(COMPONENTS):
                T[::1,framevar,comp]=T[idxx,framevar,comp]
        T_tr[::1,framevar]=T_tr[idxx,framevar]

#ordeno el arreglo de identificadores identif:
iddx=identif[::1,0].argsort()
identif[::1,0]=identif[iddx,0]
identif[::1,1]=identif[iddx,1]

print 'Proceso finalizado con exito.\n'
print 'FIN.\n'
print 'Transcurrieron', time.clock()-t0,' segundos.\n'
# Guardo y cierro el .odb
myOdb.save()
myOdb.close()

# Numero de ciclos aplicados:
N=900
# Carga de la curva S-N del material y conversion de Salt a N:
Damage=np.zeros([ELEMENTS,1])  # Inicializacion del vector de
    danio acumulado
# Defino una curva asociada al material SA 508 grd3 cl1 con
    UTS= 552 MPa:
Curva1=np.array([[10,4881],
                 [20,3530],
                 [50,2379],
                 [100,1800],
                 [200,1386],
                 [500,1020],
                 [1000,820],
                 [2000,669],
                 [5000,524],
                 [10000,441],
                 [20000,383],
                 [50000,319],
                 [100000,281],
                 [200000,248],
                 [500000,214],
                 [1000000,194]])
#Defino una curva asociada al material SA 182 FMX 19 NITRONIC
    with maximum mean stress
Curva2=np.array([[10,4881],
                 [20,3530],
                 [50,2379],
                 [100,1800],
```

```
                        [200,1386],
                        [500,1020],
                        [1000,820],
                        [2000,669],
                        [5000,524],
                        [10000,441],
                        [20000,386],
                        [50000,319],
                        [100000,281],
                        [200000,248],
                        [500000,179],
                        [1000000,143],
                        [2000000,129],
                        [5000000,117],
                        [10000000,112],
                        [20000000,108]])

        for ELEMENTO in range(ELEMENTS):
                idmaterial= identif[ELEMENTO][1]    # Identificador de
                    material
                if idmaterial==1 or idmaterial==3:
                        Damage[ELEMENTO][0]=(N/(10**np.interp(np.log10
                            (Salt01[ELEMENTO]),np.log10(Curva1
                            [::-1,1]),np.log10(Curva1[::-1,0]))))
                else:
                        Damage[ELEMENTO][0]=(N/(10**np.interp(np.log10
                            (Salt01[ELEMENTO]),np.log10(Curva2
                            [::-1,1]),np.log10(Curva2[::-1,0]))))

        print'Calculo del da o acumulado: terminado.\n'
        np.save('Damage',Damage)
        # Generacion de la VISUALIZACION
        myOdb=  openOdb(path= Odbs[0])
        Frame=0 # Elijo visualizar en el primer frame
        grout_instance = myOdb.rootAssembly.instances[Instancess[j1]]
        keys = myOdb.steps.keys() # nombres de los steps
        step = myOdb.steps[keys[0]] # step
        frameRepository = step.frames # frames
        if flag==0:
                DamageField = frameRepository[Frame].FieldOutput(name=
                    'D4mars02',description='Danio acumulado prueba',
                    type=SCALAR)
        DamageField.addData(position=CENTROID, instance=grout_instance
            ,labels=Elements,data=Damage)
        print 'FINALIZADO EL ANALISIS EN INSTANCE: ',j1
        flag=1
myOdb.save()
```

```
myOdb.close()
print 'PROCESO␣COMPLETADO␣EXITOSAMENTE.\n'
print 'Tiempo␣transcurrido:␣', time.clock()-t0,'segundos.'
```

A.2. Análisis de fatiga para múltiples estados de carga

El presente *script* permite efectuar el análisis de fatiga de un componente nuclear sometido a múltiples estados de carga, efectuando la determinación de rangos y aplicaciones de acuerdo al método de conteo por picos modificado, y suponiendo cargas no proporcionales. Los datos de entrada son: Los nombres de los .odb, los nombres de las instances y los nombres de los steps (caso general), las etiquetas (*labels*) de los elementos que se quieren analizar (los cuales deben ser del mismo material), la curva de fatiga pertinente (se supone un set asociado a un único material) y los números de aplicaciones de cada evento. El programa devuelve una visualización 3D del *campo escalar de daño acumulado* o CUF, en la región bajo estudio.

```
# -*- encoding: utf-8 -*-
# PROGRAMA DE COMBINACION DE LOS ESTADOS DE CARGA EN UN SET DE
    ELEMENTOS

# El criterio utilizado fue fijar el tiempo primado en el instante de
    ocurrencia del maximo Tresca HISTORICO
# y para la combinacion de los estados de carga se uso el metodo de
    conteo de ciclos: 'peak-counting' modificado.

from odbAccess import *
from abaqusConstants import *
from abaqus import *
from odbMaterial import*
from odbSection import*
from visualization import*
import numpy as np
import time
import os

t0=time.clock();
# Inputs: Array de strings con los nombres de los archivos .odb, Array
     con los nombres de las instances y Array con los nombres
# de los steps:

Odbs=['C25-0101-05000-FEA-NA-02a-TMD-20-Mec.odb','C25-0101-05000-FEA-
    NB-04-TMD-20-Mec.odb','C25-0101-05000-FEA-NB-05-TMD-20-Mec.odb']
NODB=len(Odbs)    # Numero de archivos cargados
```

```
Instances=['GRPR_PRP_IMPSA-3-1','GRPR_PRP_IMPSA-3-1','GRPR_PRP_IMPSA
    -3-1']
nameOfSteps=[['Step-1','NA-02a'],['Inicial','Step-1'],['NB_05_edo_0','
    Step-1']]
# Por ejemplo: nameOfSteps[0][1]= 'NA_03_Up', corresponde al segundo (
    index=1) step del primer (index 0) odb.
# Ademas: len(nameOfSteps[0])=4, el numero de steps del primer odb (es
     decir del Odbs[0])
STEPS1=0    #Inicializo valor mximo de steps de cada odb
for h in range(NODB):
        if len(nameOfSteps[h])>=STEPS1:
                STEPS1=len(nameOfSteps[h])

# Cada .odb representa un estado de cargas distinto (evento) y cada
    evento tiene asignado un numero de ciclos de aplicacion
# de acuerdo a las condiciones de diseo.
n=[240,4,4]    # Numero de aplicaciones de los .odb
Sumn=0    # Suma total de los ciclos de aplicacion
for i in range(NODB):
        Sumn=Sumn+n[i]

# Defino un vector con las etiquetas de los elementos que conforman al
     set de elementos bajo analisis.
# En este analisis, los elementos seleccionados deben ser del mismo
    material (pertenecer a la misma section)

ElementLabelss=( 14374, 14375, 14376, 14377, 14378, 14379, 14380,
    14381, 14382, 14383, 14384, 14385, 14386, 14387, 14388,
       14389, 14390, 14391, 14392, 14393, 14394, 14395, 14396, 14397,
          14398, 14399)
ELEMENTOS=len(ElementLabelss)    # Nmero de elementos del set
# Inicializacion y llenado de un vector con los nmeros de frames de
    cada .odb y de cada step:

NFrames=np.zeros([NODB,STEPS1],dtype=int)    # Inicializacion del
    vector
Framestotal=0    # Inicializo una cuenta de los frames totales
framemax=0  # Inicializo el maximo numero de frames de todos los steps
for nODB in range(NODB):
        myOdb= openOdb(path= Odbs[nODB])
        for j in range(len(nameOfSteps[nODB])):
                lastStep= myOdb.steps[nameOfSteps[nODB][j]]
                Nofframe= len(lastStep.frames)     # Numero de frames
                    asociado al .odb nODB y al step j
                if Nofframe>=framemax:
                        framemax=Nofframe
                NFrames[nODB][j]=Nofframe
```

```
                Framestotal= Framestotal + Nofframe    # Suma de los
                    frames de todos los .odb en todos los steps
        myOdb.close()

# Inicializo los arreglos multidimensionales que contienen los
    tensores de Cauchy y las tensiones equivalentes de Tresca.
# El analisis efectuado es por elementos, aunque puede extenderse sin
    dificultad a nodos. (Simplificacion)
# Inicializo tambien un arreglo que llevara los labels de los
    elementos (garantiza correspondencia entre indices y datos)

COMPONENTS= 6     # Porque se trata de un modelo tridimensional.
T=np.zeros([ELEMENTOS,Framestotal,COMPONENTS])   #Arreglo de T
    historico
T_tr=np.zeros([ELEMENTOS,Framestotal])           #Arreglo de T_tr
    historico
T1=np.zeros([NODB,ELEMENTOS,STEPS1,framemax,COMPONENTS])   # Otra
    forma de almacenar los datos, ordenados por .odb y por steps
T_tr1=np.zeros([NODB,ELEMENTOS,STEPS1,framemax])    # Arreglo con los
    vectores de Tresca ordenados por .odb y por steps
Elements=np.zeros(ELEMENTOS,dtype=np.int)
Stress='S'
Sumador=0   # Inicio un sumador de frames
flag=0  # Inicio bandera de llenado del vector Elements
#Evento=np.zeros(Framestotal,dtype=np.int)   # Vector con
    identificadores de eventos

# Obtencion de datos (llenado de los arreglos T,T1,T_tr y T_tr1)
print 'Comenzando proceso de obtencion de datos.\n'
for nODB in range(NODB):  # Barrido por los .odb
        print 'ODB analizado: ',nODB+1, 'de ',NODB
        myOdb= openOdb(path= Odbs[nODB])
        #para crear un set de elementos:
        Set=myOdb.rootAssembly.instances[Instances[nODB]].
            ElementSetFromElementLabels(name='Fa03june01',
            elementLabels=ElementLabelss)
        #Cuando el set de elementos ya est creado:
        #Set=myOdb.rootAssembly.instances[Instances[nODB]].elementSets
            ['Fatigue24Mai01s']
        for stp in range(len(nameOfSteps[nODB])):   # recorro los
            steps del .odb
                print 'Step analizado:', stp+1, 'de ', len(nameOfSteps
                    [nODB])
                lastStep= myOdb.steps[nameOfSteps[nODB][stp]]
                frame=lastStep.frames  #    frames del .odb
                for framevar in range(NFrames[nODB][stp]):  # Barrido
                    por los frames del .odb nODB y el step stp
```

```
                        allFields = frame[framevar].fieldOutputs
                        if (allFields.has_key(Stress)):
                                isStressPresent = 1
                                stressSet = allFields[Stress]
                                if Set:
                                        stressSet = stressSet.
                                           getSubset(region=Set,
                                           position=CENTROID)
                                StressValues=stressSet.values
                        for ELEMENTO in range(ELEMENTOS):
                                T[ELEMENTO][framevar+Sumador][:]=
                                   StressValues[ELEMENTO].data     #
                                   Obtencion de las componentes del
                                   tensor en cada elemento
                                T1[nODB][ELEMENTO][stp][framevar][:]=
                                   StressValues[ELEMENTO].data      #
                                    Otra forma de almacenar los datos
                                T_tr[ELEMENTO][framevar+Sumador]=
                                   StressValues[ELEMENTO].tresca    #
                                    Obtencion de la tension de tresca
                                    en cada elemento en cada frame
                                T_tr1[nODB][ELEMENTO][stp][framevar]=
                                   StressValues[ELEMENTO].tresca
                                if flag==0:
                                        Elements[ELEMENTO]=
                                           StressValues[ELEMENTO].
                                           elementLabel    # Labels
                                           de los elementos y
                                           correlacion con ELEMENTO
                        print 'Frame analizado: ', framevar+1, 'de ',
                           NFrames[nODB][stp]
                        flag=1
                        #Evento[framevar+Sumador]= nODB
                Sumador=Sumador+NFrames[nODB][stp]
        myOdb.close()

np.save('T',T)
np.save('T_tr',T_tr)
np.save('T1',T1)
np.save('T_tr1',T_tr1)

print 'Proceso de obtencion de datos finalizado.\n'

print 'Comienzo del analisis de fatiga de acuerdo a ASME III.\n'
# Calculo de la diferencia de tensiones S31=S3-S1
print 'Calculo de la diferencia de tensiones S31 en cada elemento.\n'
DifS31=np.zeros([NODB,ELEMENTOS,STEPS1,framemax])
```

```
for ELEMENTO in range(ELEMENTOS):
        flag1=0
        for nODB in range(NODB):
                for stp in range(len(nameOfSteps[nODB])): # barro en
                    los steps del odb
                        autov=np.zeros([NFrames[nODB][stp],3])   #
                            Matriz de autovalores
                        if flag1==0:
                                TIMEPR = T_tr[ELEMENTO][:].argmax() #
                                    frame en que se alcanza el maximo
                                    Tresca historico del elemento
                                Ti= np.array([T[ELEMENTO][TIMEPR
                                    ][[0,3,4]],T[ELEMENTO][TIMEPR
                                    ][[3,1,5]],T[ELEMENTO][TIMEPR
                                    ][[4,5,2]]]) # tensor de ref. cte
                                    para el elemento
                        for framevari in range(NFrames[nODB][stp]):
                                autov[framevari][:]= np.linalg.eig( np
                                    .array([ T1[nODB][ELEMENTO][stp][
                                    framevari][[0,3,4]],T1[nODB][
                                    ELEMENTO][stp][framevari
                                    ][[3,1,5]],T1[nODB][ELEMENTO][stp
                                    ][framevari][[4,5,2]]]-Ti))[0]
                                idx= autov[framevari][:].argsort()
                                autov[framevari][:]=autov[framevari][
                                    idx]   #ordeno autovalores (de
                                    menor a mayor algebraicamente)
                        DifS31[nODB][ELEMENTO][stp][0:(NFrames[nODB][
                            stp])]= autov[:,0]-autov[:,2]   #
                            Diferencia de tensiones S31=S3-S1 en
                            funcion del tiempo
                        # S1> S2> S3
                        flag1=1

print 'Proceso␣de␣obtencion␣de␣la␣diferencia␣de␣tensiones␣S31␣
    completado.\n'

# Analisis del metodo de conteo y calculo del CUF.
#Inicializo un vector con los coeficientes de danio acumulado (CUF)
Damage=np.zeros([ELEMENTOS,1])
#Defino la curva S-N del material utilizado (tabla provista por ASME)
Curva=np.array([[10,4881],
                        [20,3530],
                        [50,2379],
                        [100,1800],
                        [200,1386],
```

```
                        [500,1020],
                        [1000,820],
                        [2000,669],
                        [5000,524],
                        [10000,441],
                        [20000,383],
                        [50000,319],
                        [100000,281],
                        [200000,248],
                        [500000,214],
                        [1000000,194]])

print 'Analisis de picos y valles, calculo del CUF de cada elemento
   por el metodo de conteo de picos modificado.\n'
for ELEMENT in range(ELEMENTOS):   #Barrido por elementos
        P1=np.array([]);
        nP1=np.array([]);
        V1=np.array([]);
        nV1=np.array([]);
        for nODB in range(NODB):     # Barrido por eventos (.odb's)
                for stp in range(len(nameOfSteps[nODB])):    # En cada
                    evento, barrido por los steps
                        A1=DifS31[nODB][ELEMENT][stp][:]   #
                            Diferencia S31 en funcion del tiempo, para
                             ese elemento en ese evento y en ese step
                        B1=np.diff(A1)   # vector de pendientes, si
                            hay Framestotal(F) componentes en S31,
                            este vector es de F-1
                        A1size=NFrames[nODB][stp]           # Numero
                            de componentes de A1
                        for j in range(A1size-2):       # Se mueve
                            solo por el interior del intervalo (no
                            considera los extremos)
                             if (np.sign(B1[j])) != (np.sign(B1[j
                                +1])):       # Busco picos y
                                valles angulosos. Recordar que el
                                sign puede valer 1,0 o -1.
                                  if (np.sign(B1[j+1]))==1  and
                                     np.sign(B1[j])!=0:
                                       V1=np.append(V1, A1[j
                                          +1])
                                       nV1=np.append(nV1,n[
                                          nODB])
                                  if (np.sign(B1[j+1]))==-1 and
                                     np.sign(B1[j])!=0:
                                       P1=np.append(P1, A1[j
                                          +1])
```

```
                                nP1=np.append(nP1,n[
                                    nODB])
# Analisis en los extremos del evento (cada .
    odb y cada step)
if np.sign(B1[0])==0:
                                            #Pico o valle
     extendido en el origen
        g=0
        while np.sign(B1[g])==0 and g<=A1size
            -2:
                g=g+1
        if np.sign(B1[g])==1:
                V1=np.append(V1,A1[0])
                nV1=np.append(nV1,n[nODB])
        else:
                P1=np.append(P1,A1[0])
                nP1=np.append(nP1,n[nODB])
else:

    #Valle anguloso en el origen
        if np.sign(B1[0])==1:
                V1=np.append(V1,A1[0])
                nV1=np.append(nV1,n[nODB])
        elif np.sign(B1[0])==-1:
                                            #Pico
            anguloso en el origen
                P1=np.append(P1,A1[0])
                nP1=np.append(nP1,n[nODB])
# Analizo ahora el final del evento:
if np.sign(B1[A1size-2])==0:
                                                  #
    Mesetas en el fin
        h=A1size-2
        while np.sign(B1[h])==0 and h>=0:
                h=h-1
        if np.sign(B1[h])==1:
                                                # Pico
             extendido al final
                P1=np.append(P1,A1[A1size-1])
                nP1=np.append(nP1,n[nODB])
        else:
                V1=np.append(V1,A1[A1size-1])
                                    # Valle
                   extendido al final
                nV1=np.append(nV1,n[nODB])
else:
```

```
                        if np.sign(B1[A1size-2])==1:
                                                #Pico
                            anguloso al final
                                P1=np.append(P1,A1[A1size-1])
                                nP1=np.append(nP1,n[nODB])
                        elif np.sign(B1[A1size-2])==-1:
                                                # Valle anguloso
                             al final
                                V1=np.append(V1,A1[A1size-1])
                                nV1=np.append(nV1,n[nODB])

                ######
                # Analisis de mesetas internas (i.e. busqueda
                    de picos y valles extendidos internos)
                j=1
                while j<(A1size-1):
                        if A1[j-1]>A1[j] and A1[j+1]==A1[j]:
                                while A1[j+1]== A1[j] and (j
                                    +1)<(A1size-1):
                                        j=j+1
                                if A1[j+1]>A1[j]:
                                        V1=np.append(V1,A1[j])
                                        nV1=np.append(nV1, n[
                                            nODB])
                        elif A1[j-1]<A1[j] and A1[j+1]==A1[j]:
                                while A1[j+1]==A1[j] and (j+1)
                                    <(A1size-1):
                                        j=j+1
                                if A1[j+1]<A1[j]:
                                        P1=np.append(P1,A1[j])
                                        nP1=np.append(nP1,n[
                                            nODB])
                        j=j+1

#Ordeno los vectores P1, nP1, V1, nV1
idxP=P1.argsort()   #ordeno de menor a mayor las componentes
    de P1
P1[:]=P1[idxP]
nP1[:]=nP1[idxP]
idxV=V1.argsort()   #ordeno de menor a mayor las componentes
    de V1
V1[:]=V1[idxV]
nV1[:]=nV1[idxV]

# 'Reagrupo' picos y valles de modo que se eviten repeticiones
p=len(P1)
v=len(V1)
```

```
# Elimino las repeticiones en el vector de Picos
m=1
while m<p:
        if P1[m-1]==P1[m]:
                P1=np.delete(P1,m-1)
                nP1[m]=nP1[m]+nP1[m-1]
                nP1=np.delete(nP1,m-1)
                p=p-1
        else:
                m=m+1

t=1
# Elimino las repeticiones en el vector de Valles
while t<v:
        if V1[t-1]==V1[t]:
                V1=np.delete(V1,t-1)
                nV1[t]=nV1[t]+nV1[t-1]
                nV1=np.delete(nV1,t-1)
                v=v-1
        else:
                t=t+1
# Combinacion de los estados de carga y calculo del CUF
CUF=0
                    # Recordar que V1 y P1 estan ordenados de
                       menor a mayor
indexP= len(P1)-1   # Me ubico al final de P1 (Maximo pico)
indexV= 0           # Me ubico al comienzo de V1 (minimo Valle
   )

banderaK=0
while indexP >=0 and indexV<len(V1):
        if (P1[indexP]>=V1[indexV]):
                Salt = abs(P1[indexP]-V1[indexV])*0.5*195/171
                nn = min(nP1[indexP],nV1[indexV])    # Elijo
                   el menor numero de aplicaciones
        else:
                Salt=0
                nn=0
                banderaK=1
                indexP=-1  #Si ya ocurrio que el nivel de
                   valle supera al nivel de pico, no seguir
                   iterando.
        if Salt != 0:
                NN = 10**np.interp(np.log10(Salt),np.log10(
                   Curva[::-1,1]),np.log10(Curva[::-1,0]))
                CUF=CUF+ nn/NN
        if banderaK==0:
```

```
                        if nP1[indexP] < nV1[indexV]:
                                nV1[indexV] = nV1[indexV]-nP1[indexP]
                                indexP = indexP-1
                        else:
                                if nP1[indexP] > nV1[indexV]:
                                        nP1[indexP] = nP1[indexP]-nV1[
                                            indexV]
                                        indexV = indexV+1
                                else: # nP1[indexP] == nV1[indexV]:
                                        indexP = indexP-1
                                        indexV = indexV+1

        #Guardo el CUF en el vector general
        Damage[ELEMENT][0]=CUF
np.save('Damage',Damage)
print 'Proceso finalizado.\n'
print 'Transcurrieron', time.clock()-t0,' segundos.\n'

print 'Visualizacion.\n'

myOdb= openOdb(path= Odbs[0])
Frame=0 # Elijo visualizar en el primer frame
grout_instance = myOdb.rootAssembly.instances[Instances[0]]
step = myOdb.steps[nameOfSteps[0][0]] # step
frameRepository = step.frames # frames
DamageField = frameRepository[Frame].FieldOutput(name='CUF03601',
    description='CUF',type=SCALAR)
DamageField.addData(position=CENTROID, instance=grout_instance,labels=
    Elements,data=Damage)
myOdb.save()
myOdb.close()
print 'PROCESO TERMINADO'
print 'Tiempo total',time.clock()-t0,' segundos.\n'
```

Bibliografía

[1] De Vedia, Luis A.- *Apuntes de fatiga- Mecánica II*, Instituto de tecnología prof. Jorge A. Sabato. Buenos Aires. 2002

[2] O'Donnell. W. J.- *Code design and evaluation for cyclic loading- Sections III and VIII.* Companion guide to the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE- Vol.2-Part 11: Special topics related to B&PV CODE- Chapter 39.

[3] Albornoz, Felipe.- *El proyecto de reactor nuclear CAREM.* Divulgación: Comisión Nacional de Energía atómica.

[4] Fernández, María Giselle.- *Desarrollo de un programa de vigilancia para el reactor nuclear CAREM 25.* - Capítulo 3: Reactor prototipo CAREM 25. Proyecto integrador de la carrera de ingeniería nuclear. Instituto Balseiro - Año 2014

[5] Ward, Alberto.- *Proyecto CAREM: Central ARgentina de Elementos Modulares.* Presentación a la secretaría de energía. Marzo de 2006.

[6] ASM international- Handbook Vol. 19.- *Fatigue and fracture*- 1996.

[7] Hertzberg, Richard W.- *Deformation and fracture mechanics of engineering materials.* Fourth edition. John Wiley and Sons Inc. Chapter 12: Cyclic stress and strain fatigue

[8] Yawny, Alejandro.- *Apuntes de cátedra: Materiales II*- Instituto Balseiro- Comisión Nacional de Energía Atómica- 2014

[9] Omesh Chopra and Gary L. Stevens .- *U.S.NRC: United States Nuclear Regulatory Commission.*- Effect of LWR Coolant environment on the fatigue life of reactor materials- Draft report for comment- NUREG/CR-6909, rev. 1, ANL-12/60, March 2014.

[10] Jones, David P. and Basavaraju, Chakrapani. *Subsection NB- Class 1 components.* Companion guide to the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE-Vol.1- Part 3: Rules for the construction of nuclear power plant components- Chapter 6 (Original by Hallinger and Jones).

[11] ASME Boiler and pressure vessel code. *Derivation of stress differences.* Section III- Division 1. (2010)- Subsection NB-3216

[12] ASME Boiler and pressure vessel code. *Mandatory appendix I- Design Fatigue curves Fig. I-9.1 and Table I-9.1.* Section III- Division 1. (2010)

[13] ASME Boiler and pressure vessel code. *NB-3222.4: Analysis for Cyclic Operation.* Section III- Division 1. (2010)

[14] Rodríguez, Facundo Luis. *Cálculo estructural en la zona de la acometida de los generadores de vapor del RPR CAREM 25.* Proyecto Integrador de la carrera de Ingeniería mecánica- Instituto Balseiro- Año 2010.

[15] Hermida, Federico. *Introducción al diseño por análisis.* Presentación de la asignatura *Diseño mecánico.* Instituto Balseiro. Año 2014

[16] ASME Boiler and pressure vessel code. *NB-3222.2: Primary Plus Secondary Stress Intensity.* Section III- Division 1. (2010)

[17] J. Alberty, C. Cartenser, S.A. Funken, R. Klose *Matlab implementation of the Finite Element Method in elasticity.*- December 5, 2002. Computing 69, 239-263.

[18] Gatica, Gabriel N., Márquez Antonio, Meddahi Salim. *An augmented mixed finite element method for 3D linear elasticity problems.*- Journal of Computacional and Applied Mathematics- Vol. 231, Issue 2, 15 September 2009- pages 526-540.

[19] Olivella X.O. , Agelet de Saracíbar Bosch C. *Mecánica de medios continuos para ingenieros.* Edición UPC- Año 2000

[20] Simulia- Abaqus 6.14 *Abaqus Scripting User's guide* and *Abaqus/CAE User's guide.*

[21] ASME Boiler and pressure vessel code. *ANNEX 5.B: Histogram development and cycle counting for fatigue analysis (Informative).* Section VIII- Division 2. (2010)

[22] Stephens,R., Fatemi A., Stephens R., Fuchs H. *Metal Fatigue in Engineering.* Second Edition. Jhon Wiley and Sons, INC.

[23] Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. ASTM Designation E 1049 - 85.- *American Society for Testing and Materials.* Procedures for Cycle Counting.- 1997

[24] ASME Boiler and pressure vessel code. *NB-3228.5: Simplified Elastic-Plastic Analysis.* Section III- Division 1. (2010)

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi director Carlos Ferrari por su seguimiento permanente, y a todo el departamento de modelística de la gerencia Mecánica del proyecto CAREM, especialmente a Mainqué Green y a Omar Verastegui.

En segundo lugar, quiero agradecer a todo el personal de *Instituto Balseiro*, tanto docente como no docente, por haberme ayudado a crecer en estos últimos años, tanto personal como profesionalmente. Extiendo este agradecimiento, por sus invaluables sugerencias y extensas charlas, a Alejandro Yawny y a Rodrigo Bonazzola.

En tercer lugar quiero agradecer al *Estado Argentino*, y por extensión a todos los centros en los que me formé (especialmente al Instituto Técnico de la Universidad Nacional de Tucumán y a la Comisión Nacional de Energía Atómica), por haberme brindado una educación pública gratuita y de calidad.

Por último, y no por eso menos importante, a mi familia (los que están y los que ya no) y amigos, siempre presentes, gracias por haberme acompañado en esta travesía que hoy culmina.