

## **PRIMER EJERCICIO .- GRUPO B.- TEMA 15**

**Estructuras de centrales nucleares de agua ligera. Diseño civil de edificios y estructuras. Control e inspección de obra civil. Estructuras de hormigón armado, pretensado y postensado, propiedades y cálculo.**

### **INDICE**

#### **1.- DESCRIPCIÓN DE EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS.-**

- 1.1.- Edificio del reactor**
- 1.2.- Otras Estructuras**

#### **2.- PROYECTO**

- 2.1.- Fases**
- 2.2.- Ingeniería Básica**

#### **3.- ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO, PRETENSADO Y POSTENSADO. PROPIEDADES Y CÁLCULO.-**

- 3.1.- Propiedades del hormigón.-**
- 3.2.- Cálculo.-**

#### **4.- CONTROL E INSPECCIÓN DE OBRA**

#### **5.- BIBLIOGRAFÍA**

#### **Resumen:**

*Se realiza una descripción estructural de los diferentes edificios, diferenciando los de la isla nuclear de los convencionales, y dentro del primer bloque, el edificio del reactor.*

*En relación con el proyecto se hace la distinción entre las estructuras relacionadas con la seguridad y las que no, definiendo las funciones de seguridad que condicionan los requisitos del proyecto. Se relacionan las fases y describen los diferentes aspectos de la ingeniería básica de proyecto.*

*Sobre las estructuras de hormigón se hace una breve diferenciación entre el comportamiento de los hormigones armados y pretensados y se relacionan las propiedades del hormigón que influyen en su comportamiento en los elementos constructivos.*

*En relación con el cálculo, se relacionan las fases del mismo para estructuras de hormigón, y se hace una breve diferenciación entre los métodos de cálculo deterministas y probabilistas, así como entre los métodos Clásicos y en Rotura, con especial mención al método de los Estados límites.*

*Por último, sobre el control, se relacionan las actividades asociadas al control de proyecto, el previo a la ejecución de la obra y durante la ejecución.*

## **TEMA 15**

### **1.- DESCRIPCIÓN DE EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS.-**

Desde el punto de vista de los requisitos que deben cumplir los diferentes edificios y estructuras es habitual distinguir entre el bloque o isla nuclear y el convencional.

El primero comprende los edificios del reactor, auxiliar, control, combustible y el de generadores diesel de emergencia. El sistema de refrigeración de emergencia, aunque conceptualmente pertenece al bloque nuclear, al tener normalmente partes distantes del conjunto de edificios, a veces no se incluye en él.

Estructuralmente los edificios de la isla nuclear suelen ser independientes, aunque, en casos de elevada sismicidad en el emplazamiento, puede ser aconsejable realizar conexiones estructurales de forma que la combinación de las estructuras reduzca las aceleraciones sísmicas sobre las mismas. Otro motivo para la conexión de las estructuras es la de obtener disposiciones simétricas globales a partir de edificios separadamente asimétricos, ya que esas asimetrías son estructuralmente indeseables para el comportamiento ante las cargas dinámicas ocasionadas por el sismo.

#### **1.1 Edificio del reactor**

Dentro del bloque nuclear, destaca, tanto por su funcionalidad como por su tipología constructiva, el edificio del reactor. Una característica en este edificio es la existencia de una estructura de contención cuya principal finalidad es evitar el escape al medio ambiente de los productos de fisión en caso de accidente en el circuito primario y la de servir como blindaje contra la radiación en condiciones normales de funcionamiento. Esto implica que debe estar diseñada para resistir las presiones y temperaturas de los accidentes bases de diseño. Además también se diseña para proteger contra las acciones externas severas, tales como sabotajes, tornados, impactos de proyectiles, impacto de aviones en algunos casos, etc. Las funciones de blindaje frente a las radiaciones pueden condicionar el espesor mínimo de los muros y cúpula.

Estructuralmente, se distingue entre la estructura externa o contención propiamente dicha y las estructuras internas.

##### **a) Estructuras externas**

Existen diferentes tipos de contención, y cada uno con múltiples variantes. Nos vamos a referir a los tipos más comunes utilizados en nuestro país:

- Contención simple, es una estructura de hormigón armado o pretensado, provista de un revestimiento metálico interior continuo y estanco ("liner"). Es

el tipo utilizado por las centrales con reactores de agua a presión PWR de tecnología americana.

- Contención doble, formada por dos recintos paralelos. El interior de chapa metálica, constituye la contención primaria y cumple la doble función de resistir la presión interna que se produciría en caso de accidente y proporcionar la estanqueidad para evitar la liberación de productos radioactivos, y la exterior, de hormigón, con misión de blindaje biológico y protección contra proyectiles externos. El recinto entre ambas, se mantiene por debajo de la presión atmosférica para evitar fugas al exterior de aire contaminado en el caso de pérdida de estanqueidad de la contención primaria.

Se utilizan diversas formas geométricas, la más común es un cilindro soportado por una losa y coronado por una cúpula toro-esférica o semiesférica. Esta forma es la utilizada por las centrales PWR de tecnología americana diseñadas con una contención simple y en la central con reactor de agua en ebullición BWR (Mark III) de Cofrentes, con contención doble.

La central de Trillo, de tecnología alemana, tiene una contención primaria formada por una estructura metálica esférica, y rodeada de un cilindro de hormigón con cúpula semiesférica, que constituye la contención secundaria. La central de Zorita, ya fuera de servicio, era un caso singular, la contención estaba constituida por un cilindro de hormigón con liner metálico y una cúpula semiesférica metálica sin blindaje de hormigón. Y en CN. Santa María de Garoña, con reactor BWR, la contención es del tipo Mark I, y está formada por el pozo seco, que es una estructura de acero en forma de bombilla y por la cámara de supresión, también metálica, de forma toroidal, ambas envueltas por la estructura de hormigón del edificio del reactor.

#### b) Estructuras internas

En las centrales PWR, cabe destacar: La cavidad del reactor y muros de blindaje del primario que rodean a la vasija. El blindaje secundario, rodea los lazos del primario, forma los compartimentos de los generadores de vapor y protege la contención de los impactos y otras cargas que se producirían como efectos de roturas de tuberías. Los muros de la piscina de recarga, la planta de operación y pisos intermedios y los elementos soporte de la grúa polar.

En las BWR, ya que la contención es del tipo de relajación de presión, tiene dos elementos característicos: el pozo seco, que contiene el reactor y una parte del sistema primario; y el pozo húmedo, que en los últimos proyectos (Mark III) envuelve al pozo seco, con el que está comunicado mediante unos conductos de venteo. Estos conductos tienen la descarga sumergida en el agua de la llamada piscina de relajación dentro del pozo húmedo. Otros elementos internos son: la piscina de recarga situada encima del pozo seco, la planta de operación, el pedestal del reactor, el muro de blindaje del reactor y los soportes de la grúa polar.

## 1.2.- Otras Estructuras

### a) De la isla nuclear:

- El Edificio Auxiliar: aloja normalmente a los sistemas relacionados con la seguridad del reactor o con la función de eliminación de calor residual tras un accidente. La disposición de la estructura y su tipología es muy variable en las diferentes centrales y suele disponerse junto la contención.
- El Edificio de Combustible, se destina a alojar el combustible nuevo y gastado, para ello el edificio dispone de las piscinas de combustible con gruesos muros. Suele estar contiguo al edificio de contención con el que se comunica mediante el tubo de transferencia de combustible. En algunas centrales, como las de Trillo o Sta. María de Garoña, no existe el edificio diferenciado como tal, realizándose las maniobras relacionadas con el manejo de combustible dentro del mismo edificio del reactor.
- El Edificio de Control, en el que se ubica la sala de control, sala de cables, ordenador central, y en general, equipo eléctrico. Suele tener una disposición sencilla con planta rectangular.
- El Edificio Diesel, aloja los generadores diesel de emergencia. Son estructuras sencillas de hormigón sin requisitos especiales, exceptuando los sísmicos.

Las estructuras de todos ellos son de hormigón armado constituidas por los siguientes elementos estructurales:

- Las cimentaciones, que suelen ser losas continuas de hormigón armado al objeto de proporcionar una superficie plana de cimentación a los muros y equipos. En algunas ocasiones, se disponen zapatas bajo los pilares o zapatas corridas bajo los muros de carga.
- Soportes, en general son muros de carga y pilares.
- Cubiertas, formadas por forjados o losas.
- Un elemento característico usado en la CCNN, son los muros de bloques de hormigón pesado desmontables. Su función no es resistente, sino de separación de zonas y blindaje biológico.

### b) De la zona convencional:

Estas estructuras son muy diversas y varían mucho de unas centrales a otras. En ellas se incluyen los edificios de turbinas, calentadores, caldera auxiliar, tratamiento de agua y servicios eléctricos. Sin carácter de edificios, sino como estructuras, hay que mencionar el sistema de refrigeración del condensador, incluyendo la casa de bombas y, si existen, las torres de refrigeración, la subestación eléctrica, zona de transformadores, túneles y galerías, las presas de los embalses para agua de refrigeración, los estanques de agua para servicios, canales de toma y descarga, oficinas, talleres, almacenes, etc.

La más significativa, por dimensiones y requisitos funcionales, es el edificio de turbinas. Es de planta rectangular y en su interior aloja, en el caso de centrales PWR, como estructura independiente, el pedestal del grupo turbogenerador. En el caso de centrales BWR, las necesidades de blindaje biológico exigen que el soporte de la turbina sea una estructura con abundancia de muros por lo que se integra en la misma estructura del edificio.

Por su singularidad estructural, cabe destacar también a las torres de refrigeración, incluidas frecuentemente en el sistema de refrigeración del condensador. Existen diversos tipos de torres. Se clasifican según las características de proyecto u operación. Pueden ser *húmedas* o *secas*, dependiendo de que el agua a refrigerar esté o no en contacto con el aire; y de *tiro mecánico* o *natural*, dependiendo que empleen o no ventiladores para producir el movimiento del aire.

Las torres de tiro natural son de gran tamaño, de más de cien metros de altura. Su estructura típica es la de un hiperboloide de revolución construido en láminas de hormigón, formando chimenea. Por su tamaño, y al no ser estructuras de categoría sísmica, se disponen alejadas de la isla nuclear de forma que en caso de rotura, su posible caída no afecte a los edificios de seguridad. Las torres de tiro mecánico suelen ser de poca altura y se disponen contiguas unas a otras formando celdas.

c) En un grupo intermedio, entre las estructuras pertenecientes al bloque nuclear y las del bloque convencional, se clasifican los edificios de tratamiento de residuos radiactivos y el almacén temporal de residuos sólidos radiactivos.

## 2.- PROYECTO

Desde el punto de vista de la obra civil, la principal singularidad de las estructuras de una CN en relación con la industria convencional son los requisitos ante las cargas sísmicas, más exigentes que los exigidos por la Norma sismorresistente española.

En el proyecto de estructuras, por los requisitos exigibles, se distinguen entre las relacionadas con la seguridad, que se definen como Categoría sísmica I, y las que no lo están, definidas como categoría sísmica II o no sísmicas. Las primeras han de proyectarse para acomodar las condiciones de proyecto específicas, resultantes de la combinación de fenómenos naturales (tales como inundación, viento, nieve, sismo, etc), con las condiciones de proceso de la central (normales, transitorios y accidentes), de forma que se asegure la realización de sus funciones de seguridad para garantizar:

- La integridad de la envolvente a presión del refrigerante del reactor.
- La capacidad de parar el reactor y mantenerlo en la condición de parada segura.
- Y la capacidad para evitar o mitigar las consecuencias de condiciones de accidente de proyecto que den lugar a dosis en el exterior superiores a las permitidas.

## 2.1.- Fases:

En la elaboración del proyecto podemos distinguir tres etapas sucesivas:

- Establecimiento de las normas y criterios de aplicación. Corresponde al arranque del proyecto y coincide con la Ingeniería Básica. La normativa aplicable es la establecida por las autoridades españolas en forma genérica, aunque como suele ser insuficiente para el diseño de centrales nucleares, es necesario completarla con la vigente en el país de origen del proyecto.
- Aplicación particularizada y justificación de desviaciones. Comprende el proyecto de detalle de cada estructura e incluye estudios como consecuencia de circunstancias o problemas no previstos inicialmente o de desviaciones detectadas durante la construcción.
- Control de cumplimiento de los criterios de proyecto y aprobación de desviaciones. Forma parte del proceso de Garantía de calidad.

## 2.2.- Ingeniería Básica

Comprende el conjunto de actividades destinadas a definir las grandes líneas del Proyecto civil. Se agrupan en los apartados:

- a) Implantación general: define la situación de los edificios, estructuras y sistemas de la central en relación con el emplazamiento, sus límites, accesos y condicionantes topográficos. (Por ejemplo: definición de niveles de explanación, disposición en planta de edificios, trazado de obras subterráneas, etc)
- b) Disposición general: Define la situación y dimensiones de los edificios y estructuras de la central. (Por ejemplo: Dimensiones generales de cada uno de ellos considerando los equipos y sistemas que deben alojar; morfología de las estructuras y sus cimentaciones; conexión o separación estructural entre edificios contiguos y fenómenos de interacción entre ellos; materiales, secciones y espesores aproximados de los elementos estructurales y de blindaje; el proceso constructivo, cuando sea crítico por su naturaleza; juntas y zonas de conexión de elementos, etc...)
- c) Estudios: son documentos monográficos sobre datos básicos de proyecto, soluciones particularizadas de procesos constructivos, análisis de sucesos o incidentes ocurridos, etc.
- d) Especificación de materiales y procesos.
- e) Criterios de proyecto: establecen los requisitos concretos que deben cumplir cada una de las estructuras. Su contenido está directamente relacionado con la morfología y función de la estructura a la que se aplican. Su principal objetivo es reunir en un documento único, o indicando sus referencias, todos los aspectos principales del desarrollo del proyecto de detalle.

Deben contemplar los siguientes aspectos: Descripción de la estructura y sus funciones, señalando la solución estructural adoptada, materiales utilizados con sus especificaciones; hipótesis de cálculo, indicando cargas y combinaciones de cargas; cálculo de esfuerzos y desplazamientos, incluyendo el tipo, los modelos de cálculo, y límites de aceptación; dimensionamiento de armaduras de elementos de hormigón y comprobación de elementos metálicos.

- f) Predimensionamiento de elementos estructurales.

### **3.- ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO, PRETENSADO Y POSTENSADO. PROPIEDADES Y CÁLCULO.-**

En las estructuras de los edificios de las CCNN, según las múltiples funciones que deben realizar (resistencia frente a cargas severas, blindaje contra radiaciones y estanqueidad), se emplean diferentes materiales. En las relacionadas con la seguridad, principalmente se emplea el hormigón armado, y, en algunos diseños de edificios de contención, el hormigón pretensado o el acero. En aquellos casos en los que hay que garantizar la estanqueidad, como contenciones o piscinas, el hormigón se recubre de un liner metálico.

El hormigón utilizado en las estructuras está constituido por cementos con moderado calor de hidratación, agua, áridos finos (arena), gravas normales o pesadas, y adiciones y aditivos químicos o minerales, que debidamente dosificados permiten obtener hormigones con las características de comportamiento requeridas, tales como resistencia, condiciones de puesta en obra y servicio, ductilidad y durabilidad, y en los casos necesarios, capacidad de blindaje.

Entre las características mecánicas del hormigón destaca su buen comportamiento a esfuerzos de compresión y su escasa resistencia a tracción o a esfuerzos cortantes. Por ello se utiliza el hormigón armado, en el que se dispone embebido un armado pasivo formado por barras de armadura corrugadas de acero al carbono. Éstas confieren al hormigón la resistencia a tracción o cortante requerida al trabajar conjuntamente el acero y el hormigón por adherencia.

La adherencia hormigón-acero es el fenómeno básico sobre el que descansa el funcionamiento del hormigón armado como material estructural. Cuando un elemento entra en carga, inicialmente las armaduras trabajan conjuntamente con el hormigón, y cuando éste se fisura, lo hace de forma regularmente distribuida a lo largo de la pieza, permitiendo la adherencia que el acero tome los esfuerzos de tracción. La adherencia se consigue por causas de naturaleza físico-química, que provocan la adhesión del acero con el hormigón y otras de naturaleza mecánica, más importantes, como el rozamiento y el efecto de acuñamiento del hormigón entre las corrugas del acero.

También pueden utilizarse estructuras de hormigón pretensado. En éstas, el hormigón se somete a una compresión antes de su puesta en servicio, en aquellas zonas donde las cargas de servicio o accidente van a inducir esfuerzos de tracción. De esta forma el efecto de estas cargas se traduce en un alivio de las compresiones producidas inicialmente por el pretensado.

El hormigón pretensado (HP), dependiendo del momento del tesado de las armaduras activas respecto del hormigonado, suele dividirse en HP con armaduras pretesas o HP con armaduras postesas. En el primer caso, el hormigonado se realiza sobre las armaduras ya tesadas y ancladas provisionalmente; una vez fraguado se liberan las armaduras transmitiendo al hormigón la fuerza de compresión equivalente al tesado previo. Este método suele utilizarse principalmente en elementos prefabricados. En el segundo caso, que es el empleado en los edificios de contención de hormigón pretensado, se realiza primero el hormigonado del elemento estructural (muros y cúpula de contención), disponiendo en ellos conductos o vainas para alojar las armaduras activas, que se tesan y anclan cuando el hormigón ya ha adquirido la resistencia necesaria para asumir los efectos del pretensado.

### **3.1.- Propiedades del hormigón.-**

#### **a) Propiedades del hormigón fresco.**

Se llama fresco al hormigón durante el tiempo transcurrido desde que se realiza la mezcla de sus componentes hasta que comienzan las reacciones de fraguado y su endurecimiento. El hormigón fresco es un material heterogéneo en el que coexisten tres fases: líquida (agua), gaseosa (aire ocluido) y sólida (cemento y áridos, arena y grava, de naturaleza y dimensiones variables, y aditivos). Sus propiedades dependen de varios factores relacionados con las proporciones de la mezcla, cantidad de agua de amasado, granulometría, forma de los áridos, de las condiciones de transporte y de los aditivos utilizados. Entre las propiedades controladas, podemos destacar:

- La consistencia: que nos indica la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse.
- La docilidad: nos indica la aptitud de un hormigón para su puesta en obra y compactación para eliminar el aire ocluido.
- Homogeneidad: es la cualidad por la que los diferentes componentes se encuentran regularmente distribuidos en toda la masa. Se consigue con un buen amasado y, para mantenerse, requiere un transporte y puesta en obra adecuados.

#### **b) Propiedades del hormigón endurecido.**

- **Peso específico.-** Depende de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación. En hormigones normales, se toma como valor de cálculo un valor de  $2,3 \text{ t/m}^3$  para hormigones en masa y



de  $2,5 \text{ t/m}^3$  para hormigones armados y pretensados. En el caso de hormigones para blindajes contra radiaciones se utilizan hormigones pesados, con densidades entre 3 y  $6 \text{ t/m}^3$ , dependiendo del tipo de árido utilizado en su fabricación.

- **Compacidad.-** Depende del método de compactación empleado. Cuanto mayor es, mejora la resistencia mecánica, al disminuir los volúmenes ocupados por el agua y el aire, y la resistencia física contra heladas y química frente a agentes agresivos.
- **Permeabilidad.-** El agua o el aire puede penetrar en el hormigón por presión o por capilaridad. Depende de la red capilar y por tanto de la compacidad. La permeabilidad al aire es una propiedad importante a considerar en los hormigones que se emplean como protección contra las radiaciones.

c) **Retracción.**

No es una propiedad propiamente dicha sino un fenómeno que se produce durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón. Consiste en la variación de volumen (contracción o acortamiento) producida por la pérdida paulatina de agua durante dicho proceso. Cuando estas disminuciones de volumen se encuentran coartadas se producen tracciones que dan lugar a la aparición de fisuras en el hormigón. Para evitar los efectos nocivos de la retracción existen métodos avalados por la práctica, entre los que destacan el evitar la aparición de altas temperaturas durante los primeros tiempos después del fraguado y lograr un curado adecuado, proceso que consiste en que el endurecimiento del hormigón durante los primeros días se realice en el ambiente más húmedo posible.

### **3.2.- Cálculo.-**

El cálculo de una estructura se compone normalmente de las siguientes fases:

- a) **Definición de un modelo estructural:** es una simplificación de la estructura real para poder aplicarle los métodos de cálculo. Depende del sistema estructural y métodos de cálculo empleados. En él se fija el esquema estructural, forma de trabajo de los diferentes elementos, dimensiones, condiciones de apoyo, etc.
- b) **Definición de las acciones:** se establecen las cargas que actuarán sobre las estructuras y sus combinaciones, es decir la actuación conjunta de las diversas cargas, para las que se diseñan las estructuras.

Las acciones se pueden dividir desde diferentes puntos de vista, por su naturaleza (directas o indirectas), por su variación en el tiempo (permanentes o variables), por su variación en el espacio (fijas o libres) y por su carácter estático o dinámico.

Las normas de los diferentes países establecen las distintas acciones y sus combinaciones que deben comprobarse en el cálculo. En el caso de estructuras convencionales se consideran:

- G: Cargas permanentes, de valor constante en el tiempo.
- Q: sobrecargas de uso y otras acciones variables.
- A: acciones asociadas a accidentes
- E y W: acciones sísmicas y debidas al viento.
- P: acción del pretensado

En el caso de CCNN, adicionalmente a la normativa española, hay que considerar hipótesis de cálculo con dos niveles de sismo (sismo de parada segura SSE y sismo base de operación OBE), cargas de accidente base de diseño, tales como las asociadas a la presión o temperatura de diseño, proyectiles, efecto chorro, etc.

- c) Características de los materiales. Hay que definir las resistencias de cálculo, los diagramas de tensión deformación y módulos de deformación longitudinal del hormigón y del acero para armaduras pasivas o activas. También los valores de relajación del acero en armaduras activas, las características de fatiga en armaduras activas y pasivas, los valores de retracción y fluencia del hormigón y los coeficientes de Poisson y de dilatación térmica. Dado que las estructuras de las CCNN deben diseñarse para resistir el sismo de parada segura (SSE), se deben utilizar armaduras de acero de alta ductilidad, tipo SD.
- d) Cálculo de esfuerzos: una vez definidas las hipótesis y combinaciones de carga, que deben cubrir las condiciones de construcción, operación, accidentales y ambientales extremas, se obtiene para cada una de ellas los esfuerzos que actúan en cada una de las secciones características de la estructura.
- e) Dimensionamiento de secciones: el cálculo puede ser de comprobación, cuando se comprueba que una sección previamente conocida es capaz de resistir las solicitaciones más desfavorables, o bien de dimensionamiento, cuando se define una sección para soportar dichas solicitaciones.
- f) Desarrollo de los detalles constructivos.

### **3.2.1.- Métodos de cálculo**

El concepto de seguridad requiere la comparación entre la solicitación máxima en una sección y la capacidad resistente que dicha sección puede desarrollar.

Para la determinación de ambas, intervienen diversas magnitudes que sirven de partida para el cálculo. Así, la capacidad resistente depende, entre otros valores, de las características de los materiales, las dimensiones de las secciones, la cantidad y posición de armaduras, etc; y en la solicitación actuante intervienen los pesos específicos de los materiales, los valores de cargas permanentes y variables, asientos, sismos, etc.

Estas magnitudes pueden ser tratadas como fijas o perfectamente conocidas en los métodos de cálculo *deterministas*, o bien ser tratadas como aleatorias, en los métodos *probabilistas*, admitiendo que los valores utilizados tienen una determinada probabilidad de ser o no alcanzados en la realidad, es decir utilizando valores estimados con cierto grado de fiabilidad.

Los métodos de cálculo de estructuras los podemos clasificar en dos grupos:

- a) Métodos Clásicos o elásticos, en los que se supone un comportamiento lineal del hormigón y el acero entre tensiones y deformaciones. Una vez calculadas las tensiones para las cargas máximas de servicio, se comparan con las tensiones admisibles, que son una fracción de la resistencia de los materiales.
- b) Métodos en Rotura, suponiendo un comportamiento plástico o elastoplástico del hormigón y elastoplástico del acero. Se determinan las sollicitaciones asociadas a las cargas mayoradas y se comparan con las que agotarían las piezas si los materiales tuviesen las resistencias minoradas en vez de las reales.

Actualmente las Normas de casi todos los países se basan en el cálculo en rotura, asociado o no a bases probabilistas. El método más utilizado para hormigones armados y pretensados es el de los *estados límites*, que es un método de rotura con bases probabilistas.

Se denominan *estados límites* a aquellas situaciones tales que cuando se alcanzan colocan a la estructura fuera de servicio. Pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- a) Estados *límites últimos*, son los asociados a la capacidad de la estructura para resistir las cargas previstas. Los más importantes son: pérdida de equilibrio estático (vuelco, deslizamiento, flotación), agotamiento o rotura de secciones críticas, pandeo y fatiga.
- b) Estados *límites de utilización*. Son los asociados con la utilización normal de la estructura, su estética y durabilidad. Los más importantes son: fisuración y deformaciones excesivas, y vibraciones indeseadas.

El método de los estados límites tiene como finalidad comprobar que las estructuras se comportan adecuadamente, con un grado de fiabilidad apropiada y predeterminada, soportando las acciones previstas durante la construcción y el plazo previsto para su vida útil, sin quedar fuera de servicio, es decir sin llegar a alcanzar un estado límite.

El método se ha desarrollado fundamentalmente en el seno del CEB (Comité Eurointernacional del Hormigón) y se ha planteado en tres niveles diferentes, según el grado de análisis probabilista aplicable.

En el nivel 1, que es el más elaborado y adoptado por las Normas de muchos países, entre la que está la EHE española (Instrucción de Hormigón

Estructural), los aspectos probabilistas del cálculo se tienen en cuenta a través de valores característicos de las acciones y resistencia de materiales. Asociando a estos valores coeficientes parciales de seguridad, basados, en lo posible, en la consideración de los aspectos probabilísticos y en la experiencia práctica. Es un método semiprobabilista.

En el nivel 2, se consideran las acciones y resistencias mediante funciones aleatorias de distribución asociado a un cierto nivel de fiabilidad. Es por tanto un método probabilista. Su aplicación, hoy día está limitada a ciertos casos especiales, a causa de falta de conocimiento de las funciones estadísticas de acciones y resistencias.

Por último, el nivel 3, se basa en un cálculo probabilista exacto de la estructura, mediante el conocimiento de las funciones de distribución correspondientes, estando definidos los niveles de seguridad en función de una probabilidad de ruina previamente fijada. Su estado de desarrollo es aún muy incipiente.

#### **4.- CONTROL E INSPECCIÓN DE OBRA**

El Control de Calidad, tanto del proyecto como del proceso constructivo, está incluido dentro del proceso de Garantía de Calidad aplicable en el proyecto general de una central nuclear, cuyos criterios básicos se recogen en el Apéndice B del 10 CFR 50 (Code of Federal Regulations de EEUU). Existe una normativa extensa y detallada aplicable para cada uno de los procesos.

El control de calidad de la construcción de los edificios de las CCNN se realiza mediante la aplicación de los programas de control de calidad del Titular, de los contratistas y de los suministradores y fabricantes de elementos destinados a la obra civil de las mismas. Asimismo, la Administración, a través del CSN realiza las auditorías e inspecciones necesarias durante la construcción de los edificios al objeto de garantizar el cumplimiento de la legislación vigente, según lo prescrito en la Ley de Creación del CSN y Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas.

El control de calidad de las estructuras de las CCNN comprende diversas fases y actividades:

- a) Control del proyecto: incluye la normativa aplicable, datos de partida de fuentes externas, métodos de cálculo y programas de ordenador, estudios, especificación de materiales, planos, etc.

Cabe destacar la importancia de establecer unos criterios claros en la normativa aplicable, ya que al tener que utilizar tanto la española como la del país de origen, su combinación suele ser fuente de conflictos, por lo que debe controlarse la correcta aplicación de las diferentes normativas en los casos de discordancia. Un ejemplo de estos, es la consideración de las cargas debidas al accidente con pérdida de refrigerante (LOCA) y a cargas debidas a condiciones ambientales extremas (sismo SSE, inundación) no consideradas en la normativa española, por lo que no están definidos los coeficientes de ponderación a utilizar. Otro ejemplo son las diferencias entre los materiales

normalizados en diversos países, con diferentes características químicas y elásticas o los métodos de ensayo e interpretación de resultados diferentes.

b) Control previo a la ejecución de obra.

Incluye la comprobación de los aspectos siguientes:

- Directorio de agentes involucrados.
- Existencia de Manuales de organización.
- Existencia de procedimientos técnicos homologados. (hormigonado, soldaduras, empalmes mecánicos de armaduras, actividades topográficas, etc.)
- Revisión de planos y documentos de ejecución.
- Existencia de archivo de certificados de materiales, hojas de suministro, resultados de control, documentos de ensayo y sistema de clasificación de cambios de proyecto.
- Existencia de control de calidad de materiales, mediante revisión de certificados de origen o realización y supervisión de contraensayos.
- Comprobación general de equipos: almacenamiento, recepción y certificados de calibración, en su caso.
- Cualificación de operarios: tanto de mano de obra directa, como de inspectores y supervisores

c) Control de ejecución: supone una vigilancia continua y registro de los procesos de ejecución mediante los correspondientes Programas de Puntos de Inspección (PPI). Como ejemplo detallamos algunos aspectos:

- Comprobaciones de replanteo y geométricas: aplicable a niveles, las armaduras, encofrados, elementos estructurales,..., comprobando el cumplimiento de tolerancias y posicionado definitivo.
- Cimbras y andamiajes: existencia de cálculo, en los casos necesarios; comprobación de planos, cotas y tolerancias.
- Armaduras: Tipo, diámetro y posición; corte y doblado; empalmes y anclajes; almacenamiento; tolerancias de colocación; recubrimientos y separación entre armaduras; estados de vainas.
- Encofrados: estanqueidad, rigidez y textura; tolerancias; geometrías y contraflechas.
- Transporte, vertido y compactación del hormigón: tiempos de transporte, condiciones de vertido; condiciones de tiempo frío, caluroso o lluvia; acabado de superficies.
- Juntas de trabajo, contracción o dilatación: disposición, limpieza de superficies de contacto, tiempos de espera, dimensiones y sellado.
- Curado: método aplicado, plazos de curado y protección de superficies.
- Desmoldeado y descimbrado: plazos y reparación de defectos.
- Tesado de armaduras activas en sistemas de pretensado: programa de tesado, comprobación de deslizamientos y anclajes; inyección en vainas.
- Control de soldaduras en caso de elementos metálicos.
- Control de operaciones: mediante inspecciones finales a la terminación de cada proceso, comprobando, mediante inspección visual o ensayos destructivos y no destructivos, la adecuación de lo realizado a lo especificado.

d) Documentación final de obra:

Los resultados de todas las inspecciones, así como las medidas correctoras adoptadas, se recogen en los correspondientes partes o informes, que quedan recogidos como Documentación Final de Obra.

Desde el punto de vista del control de la Administración mediante las inspecciones del CSN, éstas se planifican de acuerdo al estado de avance de las obras y deben estar orientadas a la comprobación de que el Titular realiza correctamente el Control de calidad exigible. Por ello debe auditarse el comportamiento de la organización de Garantía de Calidad del Titular en la ejecución de la obra, el funcionamiento de las organizaciones independientes de inspección y los registros de los Programas de Puntos de Inspección.

Además, durante el proceso de la construcción, se realizan directamente comprobaciones puntuales sobre las diversas actividades, como son la recepción de materiales, la colocación de armaduras y sistemas de postensado, hormigonado, soldaduras, cualificación de operadores, etc., prestando especial atención en aquellos puntos donde la experiencia indica que suelen presentarse problemas, tales como zonas de difícil hormigonado por acumulación de armaduras, estructuras profundas por debajo del nivel freático, control de asentamientos diferenciales, y otros aspectos importantes relacionados con el proyecto, tales como la disposición de las vainas de postensado de acuerdo a especificaciones, comprobación de tensiones en el sistema de postensado, comprobación de dimensiones de juntas sísmicas, etc.

## **5.- BIBLIOGRAFÍA**

- Instrucción de Hormigón Estructural.- EHE.- 1999.- Ministerio de Fomento. Elaborada por la Comisión Permanente del Hormigón.
- ACI 349-85.- Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures.- American Concrete Institute.
- ACI Manual of Concrete Inspection-1992.- American Concrete Institute.
- Código ASME.- Sección III, Div. 2 .- "Code for Concrete Reactor Vessels and Containments".
- NUREG-800, Standard Review Plan, de USNRC. Secciones 3.7 y 3.8.
- Control de calidad en el proyecto y construcción de la obra civil de Centrales Nucleares. Curso de la Universidad Politécnica de Madrid.-.
- Hormigón armado.- P. Jiménez Montoya y otros. Edit. Gustavo Gili.
- Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón.- José Calavera.- Editado por INTEMAC,SA.