

## EVOLUCION DEL ANALISIS DE TENSIONES EN TUBERIAS NUCLEARES

Juan Ignacio BURGALETA y José Manuel LOROÑO

*Durante la última década, el costo de la ingeniería en los proyectos de centrales nucleares ha sufrido un considerable incremento. Una de las disciplinas más afectadas por este aumento es la del Análisis de Tensiones en Tuberías y Soportes que, en lo sucesivo, se citará como Análisis de Tensiones. Como resultado, el volumen total de horas-hombre alcanzado en esta disciplina constituye un porcentaje muy importante del total de horas de proyecto.*

*Se ha de destacar, por otra parte, el impacto que produce en la construcción cualquier retraso o cambio de los soportes de tuberías, al ser el número de éstos muy elevado y realizarse su montaje al final de la obra.*

*En este trabajo no se expondrán ni discutirán métodos de análisis orientados a resolver problemas específicos. Más bien se tratará de cuáles, a juicio de los autores, han sido los principales motivos que han originado que el Análisis de Tensiones, pasara de ser una parte relativamente pequeña de la ingeniería de centrales convencionales a la magnitud que tiene hoy día en las centrales nucleares.*

### CENTRALES CONVENCIONALES Y NUCLEARES

Los estudios que se realizan en las tuberías de una central convencional son principalmente los de expansión térmica y peso propio, si bien en algunos casos se realiza un estudio sísmico, tratado de forma estática, con aceleraciones generalmente bajas.

Las diferencias comienzan ya con el mismo análisis de peso propio. En las centrales convencionales, este estudio se ha realizado basándose simplemente en la colocación de los soportes de las tuberías, a distancias determinadas por el código y normas de buena práctica. Cuando la tubería está clasificada como nuclear, no es suficiente realizar esta labor de seleccionar y situar los soportes, sino que al tener que conocerse las tensiones debidas al peso propio, para posteriormente realizar la combinación de tensiones, es necesario un análisis más detallado, con el fin de obtener en diferentes puntos (codos, injertos, pesos concentrados, etc.) el valor de dichas tensiones.

En los estudios de expansión térmica de tuberías nucleares se consideran más condiciones de funcionamiento que en las convencionales, debido a los análisis de fatiga exigidos por el Código (clase nuclear 1). Por otra parte, en las tuberías donde el análisis de fatiga no es tan riguroso (clase nuclear 2 y 3), por la misma razón expuesta en el análisis de peso propio, hay que realizar estudios detallados para conocer las tensiones en la tubería, mientras que en la mayoría de las tuberías convencionales el análisis se efectúa mediante el auxilio de ábacos, garantizando solamente que las tensiones máximas son menores que la admisible.

Se debe resaltar aquí el hecho de que, desde el punto de vista de situación de soportes en las tuberías, el efecto de expansión térmica está en oposición con el efecto sísmico. Térmicamente es deseable que el número de soportes sea el indispensable por necesidades de peso propio; por el contrario, un mayor número de restricciones favorecerá el comportamiento de la tubería en el caso de movimiento sísmico. Esto, unido a la clara necesidad de utilizar la menor cantidad posible de amortiguadores, lleva consigo el hecho de que el analista de tensiones deba llegar a una solución de compromiso para satisfacer ambos requisitos, lo cual exige un estudio en profundidad y detalle del soportado de las tuberías.

### ANALISIS SISMICOS

El análisis sísmico es uno de los factores que más influencia ha tenido en el au-

Juan Ignacio BURGALETA ORDOÑEZ, Ingeniero industrial, 34 años, trabaja desde 1974 en la Sección de Tensiones de la División Industrial y Nuclear de S.E.N.E.R. Con anterioridad había trabajado como Ingeniero en el Departamento de Planificación a Largo Plazo de Talleres Mecánicos de Astilleros Españoles.

Como especialista ha intervenido en los proyectos de la C.N. Santa María de Garoña y en el del circuito de sodio líquido ML-3, de la J.E.N., como responsable de tensiones en la C.N. de Lemóniz y como responsable de proyectos en la realización de programas para el cálculo de refuerzos en tuberías nucleares s/ASME III, de Enara.

José Manuel LOROÑO IBARRA, Ingeniero industrial, 32 años, trabaja desde 1974 en la Sección de Tensiones de la División Industrial y Nuclear de S.E.N.E.R. y ha intervenido en los proyectos de la C.N. de Lemóniz, como responsable de diseño de soportes, y en el sistema adicional de residuos de la C.N. Santa María de Garoña.

mento de las horas-hombre del Análisis de Tensiones. Como ya hemos mencionado, en las unidades convencionales, cuando se ha realizado un análisis sísmico, éste se ha hecho generalmente de forma estática y con aceleraciones bajas. En las centrales nucleares la situación es bastante más compleja. Por una parte, si se pretende hacer análisis estáticos y conservadores a todas las líneas, esto implicaría principalmente que los soportes de tuberías de diámetro superior a 6 pulgadas, deberían diseñarse con unas cargas sísmicas excesivamente elevadas y por supuesto conservadoras. Por esta razón, el análisis estático sólo es recomendable en las tuberías de pequeño diámetro; en las restantes hay que realizar un detallado estudio, que generalmente consiste en dos análisis, uno espectral y otro de desplazamientos diferenciales de soportes.

El análisis espectral es costoso, tanto por las horas-hombre necesarias para su realización, como por el tiempo de ordenador consumido. Se ha de comenzar seleccionando los espectros de respuesta que son aplicables; revisar el soportado desde el punto de vista de excitación sísmica, intentando minimizar el número de amortiguadores; realizar un detallado modelo de la tubería, incluyendo todas las peculiaridades que posea (masas concentradas y excéntricas, líneas conectadas, etc.), dependiendo en gran parte los resultados del análisis de la idónea modelización de la tubería. Posteriormente se debe realizar una ejecución en un programa de ordenador específico de análisis dinámico de tuberías, analizándose después los resultados, teniendo en muchas ocasiones que volver a replantearse el soportado de la tubería por no ser los resultados obtenidos aceptables.

El análisis de desplazamiento diferenciales de soportes es comparativamente menos costoso que el anterior, al ser un análisis estático. Incluso en algunas ocasiones no es necesaria su realización por ser sus efectos despreciables.

Si bien el hecho de la necesidad de realización de análisis sísmicos detallados ha incrementado sensiblemente el costo del proyecto, también ha supuesto un impacto notable la evolución en los criterios ocurrida en los últimos años. Esta evolución ha supuesto, en algunos casos, hasta incluso la necesidad de efectuar reanálisis y repetir estudios ya finalizados. A continuación se enumeran los cambios más significativos:

- Acelerograma base de diseño.
- Métodos para obtener los espectros de respuesta.
- Amortiguamientos empleados.
- Modelizaciones más refinadas.

- Rigidez de soportes.
- Criterios utilizados para la separación de cálculos.
- Combinación intermodal e intramodal.

A juicio de los autores, las razones para la aparición de estos cambios, que en esencia no son otra cosa que el perfeccionamiento de la metodología de los análisis sísmicos, están, en primer lugar, en la falta del detalle necesario en la normativa existente que no reflejaba debidamente el procedimiento a seguir. Así, por ejemplo, hasta Diciembre de 1974 no aparece la Guía Reguladora 1.92, indicando la combinación modal que debe de realizarse. Por otra parte, la experiencia acumulada nos ha ayudado a todas las personas involucradas en el diseño sísmico a descubrir que ciertos detalles del diseño tienen particular importancia en el análisis sísmico de estructuras.

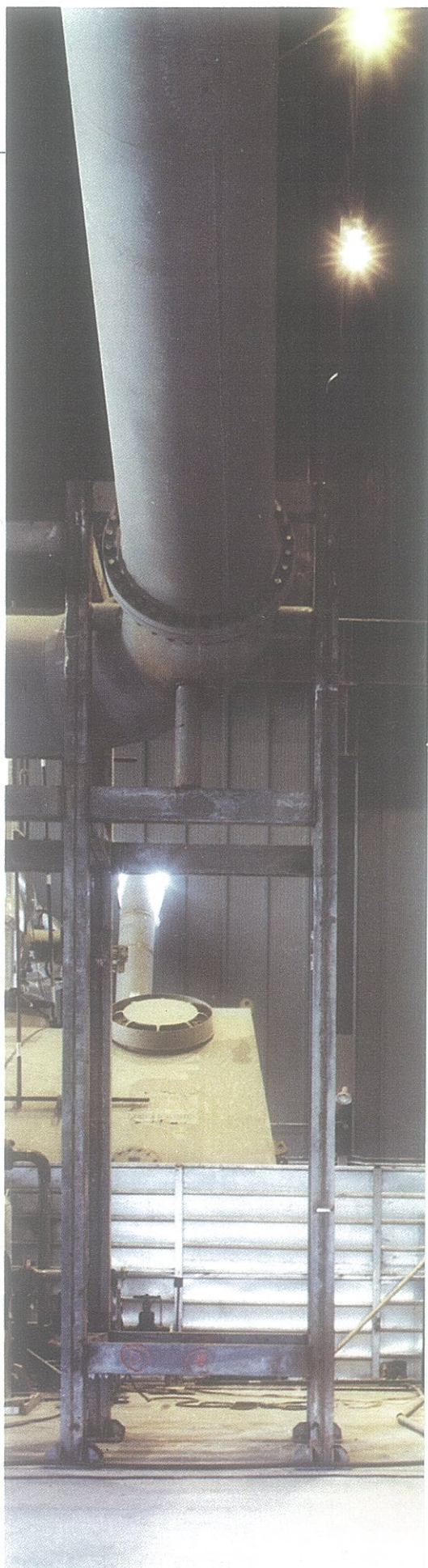
Todo esto ha originado la necesidad de que centrales, incluso ya en operación, tengan que plantearse un programa de revisión de los análisis sísmicos realizados.

Otro aspecto a tener en cuenta es la necesidad de comparar lo que se ha construido, con lo que se ha diseñado para todas las tuberías relacionadas con la seguridad (I.E.B. 79-14). Si las discrepancias encontradas son significativas, puede tener que llegar a repetirse el cálculo sísmico. A esta necesidad se ha llegado después de haberse encontrado en algunas centrales, diferencias entre el diseño y el montaje, llegándose incluso en algunas situaciones a descubrir la existencia de tuberías que, aun estando correctamente diseñadas, han sido tensionalmente inaceptables al ser analizadas con los datos reales de montaje.

Otro punto posible causante de problemas y, por lo tanto, de incremento de costos de análisis sísmico es la falta de una clara definición de los límites de responsabilidad entre la ingeniería y el suministrador del reactor. Normalmente, éste es responsable del análisis de las tuberías principales que componen el circuito primario y la ingeniería lo es de las líneas conectadas a él. La falta de una precisa definición de la información que la firma responsable del circuito primario debe suministrar a la ingeniería, como puede ser un modelo sísmico detallado de los lazos del primario o los espectros de respuesta de los puntos de conexión de las tuberías auxiliares, puede dar lugar a problemas de costosa solución.

## DISEÑO DE SOPORTES

El diseño de soportes para tubería en centrales nucleares ha sufrido numerosas



*Somos una compañía de ingeniería con una organización de más de mil empleados, de implantación internacional, líder en el campo de las plantas de proceso, con 22 años de experiencia profesional.*

*Muchos de nuestros proyectos se basan en procesos TR desarrollados a través de nuestra propia investigación, a la que dedicamos una gran actividad.*

*El éxito que hemos obtenido en los proyectos «llave en mano», al igual que en proyectos totalmente controlados por TR como contratista principal, demuestran nuestra solvencia financiera.*

*Existen más de 150 plantas TR en funcionamiento alrededor del mundo.*

*Hemos exportado a Argentina, Brasil, Yugoslavia, Egipto, Portugal, Turquía, Venezuela e Indonesia.*

*Refinerías de petróleo, Gas natural, Petroquímica, Fibras sintéticas, Industria química,*

# TECNICAMENTE HABLANDO.

*Industria alimentaria, Fertilizantes, Productos farmacéuticos, Plantas metalúrgicas, Hidrometalurgia, Centrales nucleares (en agrupaciones temporales con EPTISA y GHESA), Minería, etc.*

*TR presta los siguientes servicios:*

*Evaluación económica y análisis financiero.*

*Diseño básico.*

*Ingeniería de detalle.*

*Dirección e ingeniería de proyectos.*

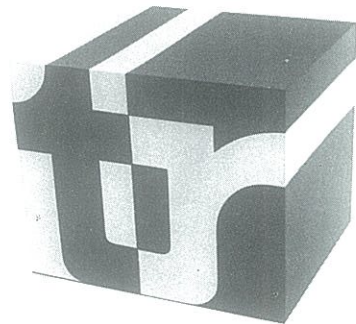
*Compras, inspección y activación.*

*Supervisión de construcción.*

*Control de proyectos, materiales y costos.*

*Garantía de calidad.*

*Puesta en marcha y contratos de mantenimiento.*



**TECNICAS REUNIDAS, S.A.**

INGENIEROS Y CONSTRUCTORES PARA LA INDUSTRIA

Arapiles, 13 y 14 - MADRID-15 (España)

Tel. 445 70 00. Télex n.os 27429 y 42845

TR Internacional. Arapiles, 13 - MADRID-15

Télex 43718 TRI



*Porque siempre  
hemos pensado en el futuro,  
afrontamos esta década  
con nuevas energías.*

Trabajamos con años de adelanto. Porque para resolver problemas de energía, es preciso pensar en futuro.

En 1962 producíamos 800 millones de kwh. Hoy alcanzamos los 7.700 millones. Esta cifra es el fruto de una labor que no ha dejado lugar a la improvisación. Ha sido un esfuerzo continuo. Gracias a el, podremos entrar confiados en esta década, aportando soluciones reales:

La primera central nuclear española funcionando desde 1968, otra que ha entrado en servicio en 1981 y una tercera en construcción, una continua ampliación de la red del tendido eléctrico, nuevas aplicaciones de nuestra energía...

Día a día realizamos una investigación de vanguardia para avanzar al ritmo del progreso.



**UNION ELECTRICA.**  
ENERGIA AL SERVICIO DEL HOMBRE Y PARA EL HOMBRE.

La falta de una clara definición de los límites de responsabilidad entre la ingeniería y el suministrador del reactor es, posiblemente, un punto causante de problemas en el análisis de tensiones en tuberías.

modificaciones a lo largo de los años setenta, debido fundamentalmente a la publicación en la Agenda de invierno de 1973, del código ASME III de la subsección NF.

Anteriormente a dicha fecha no había ninguna norma particular para el diseño de soportes nucleares, regulándose su diseño por las indicaciones recogidas en las normas MSS-SP-58, 69 y B31-1 comunes a soportes tanto convencionales como nucleares.

Dicha subsección NF trae consigo inicialmente un giro total en el diseño de soportes, ya que originó un cambio en el proceso de diseño de soportes, aumentando considerablemente los costos del mismo.

A pesar de ello, nueve años después de la aparición de la subsección NF, los límites de su jurisdicción no son lo suficientemente claros, lo que ha originado diferentes puntos de interpretación que todavía no están aclarados por la normativa oficial. Otro punto conflictivo de dicha norma son los límites de deformación permisibles en soportes, ya que la subsección NF sólo fija límites tensionales para el diseño de soportes.

Ahora bien, en los análisis tensionales de las tuberías se considera a los soportes como muelles en una cierta constante de rigidez. Para evitar discrepancias entre el modelo utilizado y la realidad deben diseñarse los soportes bajo criterios de deformación. Por otra parte, los soportes tienen características de masa y rigidez que deben ser consideradas en la modelización de la tubería para garantizar que no habrá efectos de resonancia entre la tubería y sus soportes, debiéndose exigir a estos un criterio de frecuencia en su diseño.

Dichos criterios de diseño, deformación y frecuencia siguen siendo objeto de polémica, en cuanto a la fijación de sus límites admisibles.

Las exigencias de criterios de rigidez y frecuencia, han traído consigo que los soportes para tuberías en centrales nucleares sean excesivamente aparatosos y que los costos de ingeniería hayan aumentado considerablemente.

Por otra parte, la aparición de las Guías Reguladoras 1.124 y 1.130, en 1978, que fijan límites de tensiones para soportes de clase nuclear I, más restrictivos que los definidos en la subsección NF, ha aumentado las discrepancias y dudas sobre la aplicación de dicha norma. Es de esperar que la próxima revisión de la subsección NF, anunciada para el próximo año, aclare los puntos conflictivos y agilice las normas a seguir en el diseño de soportes.

## ANÁLISIS DE FATIGA

Los análisis de fatiga de las tuberías de clase nuclear I exigen un detallado estudio de sus diferentes condiciones de funcionamiento a lo largo de la vida de la planta. Es necesario conocer las variaciones de caudal, presión y por supuesto temperatura, para poder obtener la distribución de temperaturas a través de la pared de la tubería en cada transitorio, es decir, los coeficientes  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $T_a - T_b$  señalados por el código ASME III. Además es necesario conocer el número total de veces que cada transitorio puede presentarse, para así realizar el estudio de fatiga.

Debido al amplio volumen de información que hay que manejar, tanto en la entrada como en la salida de datos, la existencia de preprocesadores y posprocesadores del programa principal es de gran ayuda.

## EFFECTOS DINAMICOS DE VALVULAS

Tanto la apertura y cierre de válvulas como la descarga de válvulas de seguridad y alivio han originado, en algunos sistemas de tuberías, largos y laboriosos estudios. Incluso en ciertas ocasiones ha sido necesario hacer un replanteamiento de las hipótesis de partida y realizar de nuevo el análisis de tensiones originadas

por la fluctuación de la presión en las tuberías cuando tienen lugar estos fenómenos.

Ejemplos de lo anteriormente citado son la descarga de válvulas de seguridad del presionador en las centrales PWR y la descarga de las válvulas de seguridad dentro del pozo seco en las BWR.

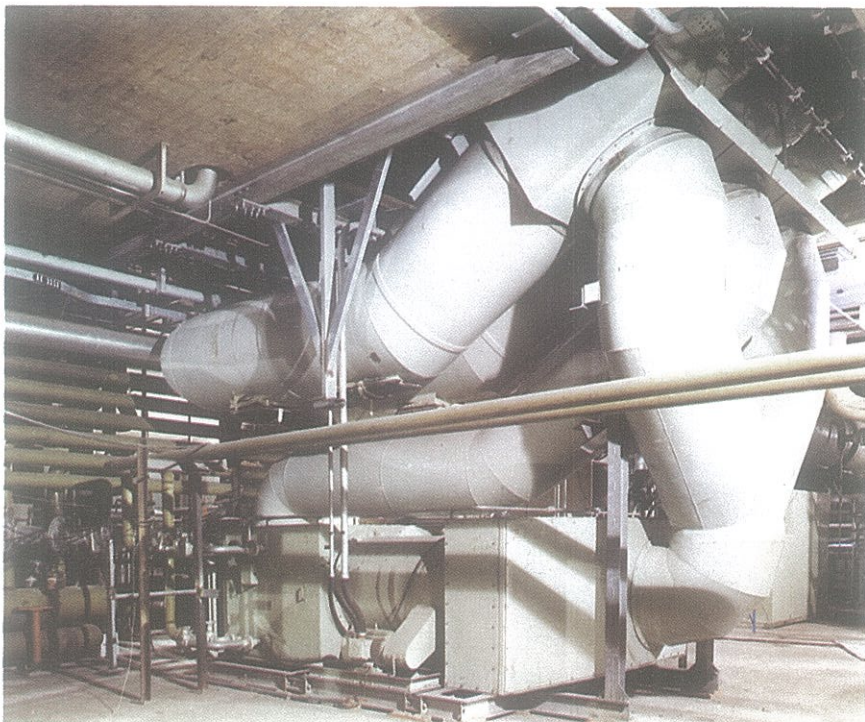
## ESTUDIOS DE ROTURA DE TUBERIAS

Un aspecto completamente nuevo dentro del análisis de tuberías es el estudio de los efectos derivados de las roturas de las mismas, que aparece en el análisis de las tuberías nucleares.

Por una parte es necesario realizar los cálculos pertinentes para obtener los puntos donde debe postularse alguna rotura, analizar sus efectos para decidir si es necesario la colocación de soportes anti-látigo, seleccionar la situación de éstos y efectuar su diseño.

Además se deben evaluar todos los efectos que una rotura de tuberías pueda originar, ya que, al propio efecto de látigo, hay que añadir los producidos por el chorro, inundación y radiación. Así, el analista de tensiones debe de colaborar conjuntamente con otras disciplinas, para mitigar sus efectos en el caso de que estos sean importantes.

Refrigeración de las barras de fase aislada. Edificio de turbinas de la C. N. de Almaraz.



Por otra parte, se ha dado la circunstancia de que la normativa a este respecto ha sido escasa y poco explícita, habiendo quedado muchas veces al juicio de las ingenierías la adopción de soluciones apropiadas.

### INDICES DE TENSION Y COEFICIENTE DE INTENSIFICACION DE TENSIONES

El código ASME III proporciona índices de tensión para el estudio de tuberías de clase nuclear 1 y coeficientes de intensificación de tensiones para las tuberías de clase nuclear 2 y 3. Existe, sin embargo, el problema de que no todos los componentes y accesorios utilizados quedan cubiertos por el código, a pesar de no prohibirse su utilización en el mismo (por ejemplo: codos, tes y reductores de enchufe y soldadura, ciertos refuerzos de injertos, etc.). En estos casos es nuevamente la firma de ingeniería la que tiene que realizar los estudios necesarios para determinar y justificar los valores que deben ser adoptados.

### COMBINACIONES DE TENSIONES

El código establece ecuaciones para comprobaciones de tensiones e indica, para cada nivel de servicio, el límite de tensión de cada ecuación a satisfacer. Sin embargo, no matiza con claridad la combinación de tensiones a realizar dentro de cada ecuación en un determinado nivel de servicio. Así, por ejemplo, no indica si en una tubería se han de sumar las tensiones originadas por la descarga de una válvula de seguridad, con las debidas al estudio sísmico, dentro del nivel de servicio B (O.B.E.) y/O D (S.S.E.).

Esto ha originado diferentes cambios de criterios a lo largo de los últimos años, incluso dentro de un mismo proyecto, llegando a tener que repetir cálculos por problemas surgidos en los cambios de criterios de la combinación de tensiones.

La combinación de tensiones debe dejarse claramente establecida desde el inicio del proyecto y debe ser fijada por el propietario, asistido por la firma de ingeniería y aceptada por los organismos reguladores.

### ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Como se puede deducir de los anteriores puntos, la falta de una clara definición de los métodos de análisis ha originado aumento de los costos, así como ha dado lugar, en ocasiones, a la repetición de estudios. Por lo tanto se considera de gran



Cajas de agua de los acumuladores (CN Almaraz).

ayuda la existencia de unas especificaciones de diseño, que marquen el camino a seguir en el Análisis de Tensiones.

Las especificaciones deben realizarse al comienzo del proyecto y recoger con claridad aquellos puntos que no estén suficientemente definidos en el código y norma vigentes.

La existencia de unas buenas especificaciones de diseño lleva consigo una reducción de los costos y una unificación de los criterios utilizados durante el diseño.

### GARANTIA DE CALIDAD

La garantía de calidad no es desde luego un aspecto exclusivo del Análisis de Tensiones, pero si debe tenerse en consideración cuando se habla del coste de una actividad. En nuestro caso concreto, al tener que manejarse un gran volumen de información, realizar un elevado número de cálculos y controlar una gran cantidad de cambios hace que se necesite un conjunto de horas importantes para desarrollar con las debidas garantías de éxito estos trabajos.

### OTRAS CONSIDERACIONES

En un diagrama que muestre cronológicamente las diferentes actividades ne-

cesarias dentro del Proyecto de una Central Nuclear, el Análisis de Tensiones se encuentra al final del mismo, dependiendo de la información que recibe de otras disciplinas (Mecánica, Obra Civil, etc...). Así pues, un cambio originado por una cualquiera de las disciplinas precedentes, lleva consigo la necesidad de su evaluación y, en ocasiones, origina la invalidación y repetición de trabajos ya ejecutados. Es, por lo tanto, de gran importancia, por su incidencia en el total de horas-hombre empleadas en el Análisis de Tensiones, que los cambios sean cuidadosamente controlados por la Dirección del Proyecto.

La Dirección del Proyecto debe establecer, auxiliada por expertos de la Disciplina de Análisis de Tensiones, la planificación de los trabajos (cálculos preliminares, diseños de soportes, análisis de rotura, cálculos definitivos, etc.). Un comienzo adelantado de los trabajos originará el riesgo de adaptación a mayor número de cambios y repeticiones inesperadas de los mismos. Un comienzo retrasado originará graves problemas en la construcción y montaje. Por ejemplo, falta de definición y diseño de placas embebidas, en el momento de hormigonar, o falta de soportes en el momento de realización de pruebas hidrostáticas.