

10 AÑOS DE PROGRESO EN TORRES DE REFRIGERACION INVESTIGACION Y PRACTICA (1)

IHSAN MUNGAN (*)

RESUMEN. Se presenta en este trabajo un resumen de buena parte de las Ponencias presentadas en el último Symposium del Grupo de Trabajo N.º 3 de las IASS sobre «Torres de Refrigeración», celebrado recientemente en París. En ellas pueden seguirse las tendencias actuales en este campo, tanto en cuanto a los estudios teóricos, como en cuanto a la construcción y reparación

ABSTRACT. *This work presents a summary of most of the papers from the latest Symposium of the IASS N.º 3 Work Group on «Cooling Towers», recently held in Paris. The present trends in this field can be followed, as regards both theoretical studies and construction and repairing.*

1. INTRODUCCION

Las personas que asistieron al «Congreso Mundial sobre Láminas y Estructuras Espaciales» celebrado en Madrid en 1979 con motivo del 20 Aniversario de IASS, recordarán el informe que hizo el Profesor Paduart sobre el Grupo de Trabajo número 3 de IASS «Torres de Refrigeración». En aquel tiempo el Profesor Paduart, presidente de IASS, era también Presidente de este grupo. En la reunión del Comité Ejecutivo de Oulu, 1980, a propuesta del mismo, la presidencia de este Grupo de Trabajo fue concedida al Profesor Krätzig de Bochum (Alemania), quien ha venido desempeñando este cargo desde entonces.

El Grupo de Trabajo de IASS sobre Torres de Refrigeración ha sido muy activo y productivo desde el principio. Las investigaciones realizadas hasta 1979 se recogieron en el documento «Recomendaciones para Proyecto de Torres de Refrigeración Hiperbólicas u otras similares» publicado aquel mismo año en Madrid (1). Este documento, que pone especial énfasis en la influencia que ejerce la acción del viento sobre el pandeo y en los detalles constructivos, ha encontrado gran aplicación y ha servido de base en muchos países para confeccionar las normas sobre «Proyectos de Torres de Refrigeración».

El período que transcurre a partir de 1980 ha sido muy productivo experimentándose un gran desarrollo en el campo de la investigación y de la práctica.

2. PERIODO ENTRE 1979 Y 1984

Todos los aspectos más destacados desarrollados en la investigación y en la práctica durante estos últimos cinco años sobre torres de refrigeración fueron presentados en el II Symposium Internacional sobre Torres de Refrigeración Natural, celebrado en el año 1984 en Bochum, organizado en colaboración con la Universidad del Ruhr, Bochum.

En este Symposium se trataron todos los aspectos más importantes de las torres de refrigeración, destacando entre ellos: «Realizaciones Estructurales Recientes» (8 ponencias), «Cargas de Viento» (2 ponencias), «Dinámica» (5 ponencias), «Estabilidad y Comportamiento No-lineal» (8 ponencias), «Comportamiento Estructural y Problemas Especiales» (6 ponencias), «Análisis de Tensiones» (5 ponencias) y finalmente, «Durabilidad» (5 ponencias).

La conclusión que podría sacarse a la vista de los títulos precedentes es que la investigación durante la primera mitad de los años ochenta se consagró principalmente al comportamiento no-lineal de la lámina en las torres de refrigeración.

El punto de partida para el «método de elementos finitos» (FEM) utilizado por Mang y Trappel para estudiar el pandeo y el análisis de los esfuerzos de las láminas de torres de refrigeración es un trabajo virtual híbrido basado totalmente en la formulación de Lagrange. Para considerar la no-linearidad física y/o geométrica se sugiere la utilización de un procedimiento de análisis aumentativo-iterativo. Para obtener la no-linearidad física de las láminas de hormigón, se toman elementos finos de la lámina, de forma curva, triangular, subdivididos en un suficiente número de capas delgadas.

La investigación numérica consiste en comparar fisuras y esfuerzos en dos torres de refrigeración distintas:

(1) Conferencia invitada en el Congreso de IASS de Madrid, 1989

(*) Mimar Sinan University, Estambul, Turquía.

en una pequeña de 93 m de altura construida en Austria y en otra grande de 150 m de altura construida en Port Gibson, USA, ambas sometidas a carga muerta y a cargas de viento casi estáticas, con cargas de pandeo resultantes a partir de 3 métodos distintos de análisis lineal físico del pandeo. En base a los resultados numéricos obtenidos, los autores sacaron las conclusiones siguientes: Primero, la carga final es considerablemente inferior a la correspondiente carga de pandeo inicial. Segundo, la carga de fisuración inicial es un límite inferior al de la carga final, mientras que la extrapolación lineal a partir del análisis lineal de la resistencia elástica permite apreciar correctamente la carga de fisuración. Por otra parte, aunque intrínsecamente importante como ejercicio académico competitivo, el pandeo lineal no es una necesidad del proyecto (2).

Los resultados de las investigaciones no-lineales llevadas a cabo por el autor y sus colegas de Bochum, no concuerdan con las conclusiones precedentes. En primer lugar, en cuanto a la seguridad a pandeo se refiere, es necesario considerar el carácter no-lineal de la deformación del hormigón a compresión a altos niveles de tensión. Para demostrar este efecto, el análisis bifurcado de la lámina de la torre de refrigeración dado en la figura 1, como Geometría 1, proyectada para una seguridad de pandeo de $\Gamma_b = 5$, se realiza considerando la ley constitutiva biaxial de la figura 2 para hormigón y una relación bilineal tensión-deformación para las barras de armado. En esta figura se muestra también el elemento placa utilizado. La carga de viento es sustituida por una carga con simetría axial que produce las peores combinaciones de tensiones con respecto al pandeo en cada altura. La figura 3 resume el resultado de estos cálculos. Manteniendo constante el módulo de elasticidad tangencial inicial para cada nivel de carga, es decir aceptando la hipótesis de Hooke, se obtiene la

curva de trazos. Por otro lado, la rigidez tangencial dependiente de la tensión, disminuye en la curva. Cerca del fallo final, que se produce por la resistencia a compresión del hormigón, tal como se ve en la figura 2, la seguridad a pandeo es sólo la mitad del valor obtenido asumiendo un comportamiento elástico.

Segundo, debido a que la consideración del pandeo disminuye el espesor necesario de la pared e igualmente el peso propio de la lámina de la torre de refrigeración, existe una interacción entre el pandeo y la rotura tensional, que son ambos fenómenos locales. Con el fin de aumentar el coeficiente de seguridad a pandeo se obtiene una lámina de mayor espesor, un pretensado superior por peso propio, unas fuerzas de torsión resultantes inferiores y de esta forma una resistencia al viento mucho más alta. Esta correlación es nuevamente investigada en las láminas de las torres de refrigeración de la figura 1. Estas dos láminas tienen la misma altura, pero en el caso de Geometría 2, el diámetro de la base es un 20 % mayor. El espesor de la pared de las láminas de las torres de refrigeración se obtiene según las prescripciones locales, tal como se indica en las Recomendaciones de IASS (1).

Para cada lámina se escogieron factores de seguridad en pandeo elástico entre 2,1 y 5. Estos valores vienen dados a la derecha de la figura 1 entre paréntesis. A excepción de los bordes superior e inferior, la cuantía de armado se tomó como igual a 0,3 % en ambas direcciones, tal como se indica en la mayoría de las recomendaciones para construcción de torres de refrigeración (1, 3).

Cada una de las láminas diseñada con un factor de seguridad a pandeo determinado, fue estudiada después de ser sometida a una carga sin simetría axial incrementada paso a paso hasta rotura. Las láminas fueron discretizadas mediante elementos placa de forma cua-

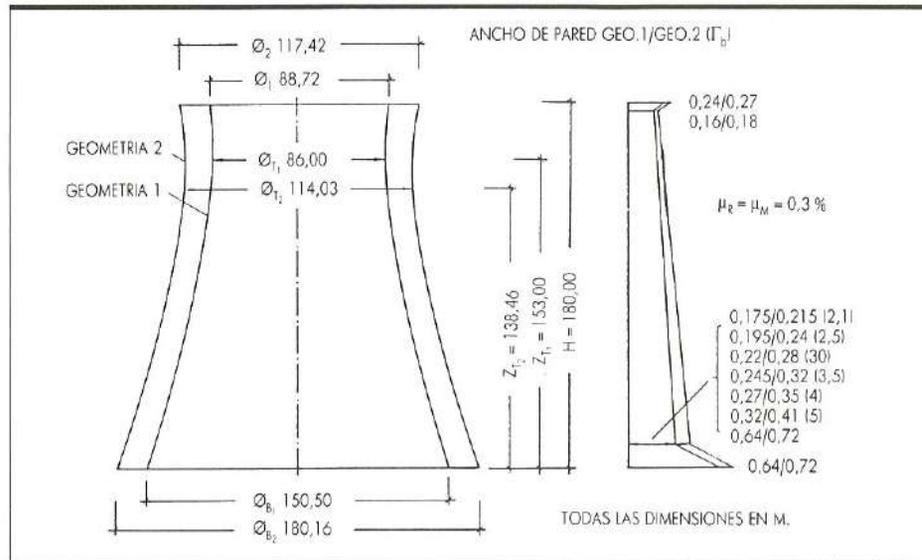


FIGURA 1. Geometría de las torres de refrigeración investigadas.

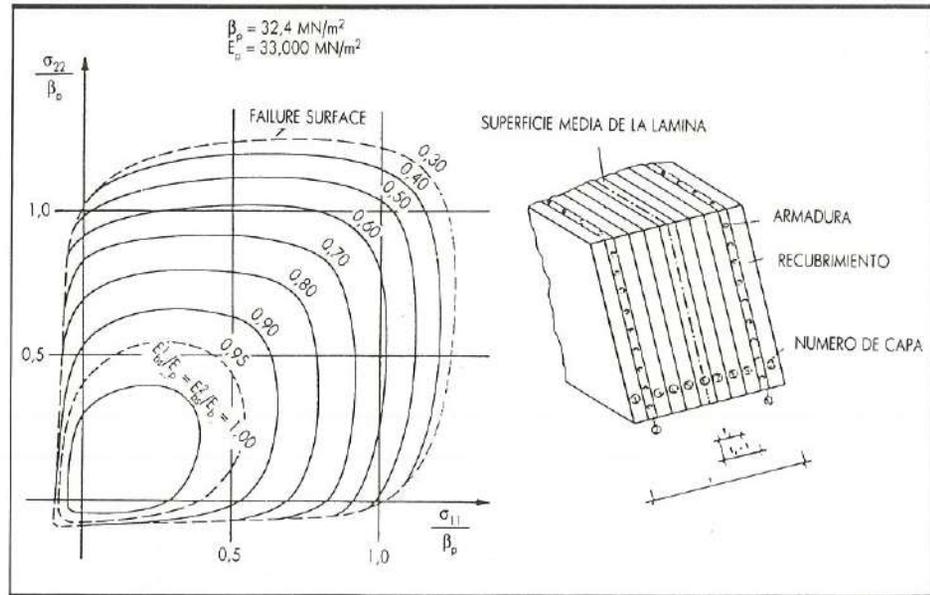


FIGURA 2. Comportamiento del hormigón bajo tensión biaxial y elemento finito en capas de hormigón armado.

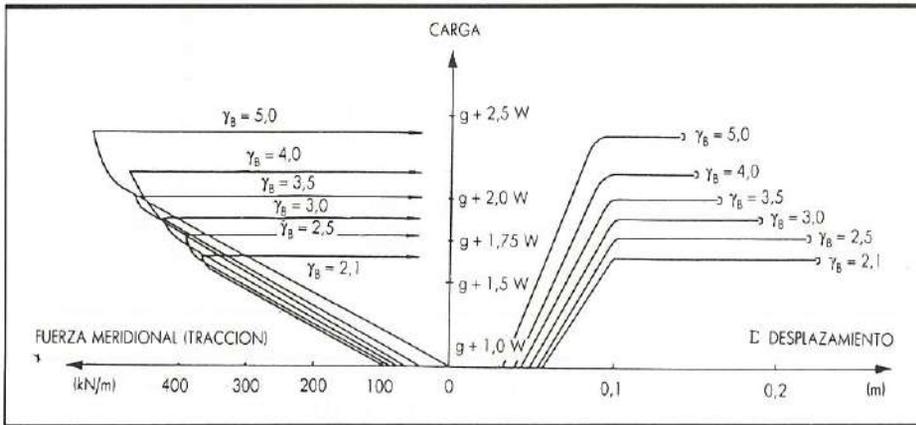


FIGURA 3. Efecto de la rigidez del material en el coeficiente de seguridad a pandeo γ_B .

drangular con 32 grados de libertad. Los cuales, son comúnmente conocidos como «semi-loof». Estos elementos fueron divididos de nuevo en 11 capas, tal como se muestra en la figura 2. Con el fin de limitar el tiempo de trabajo del ordenador, en la primera aproximación, no se tenía en cuenta la rigidez a tracción del hormigón, es decir, las capas agrietadas de hormigón permanecían como tales en las siguientes iteraciones y no eran tomadas en cuenta en los siguientes incrementos de carga. Las figuras 4 y 5 resumen los resultados de todas las investigaciones para las torres 1 y 2 de torres de refrigeración. A cada coeficiente de seguridad a pandeo le corresponde un determinado valor crítico de la carga de viento, para el cual la lámina de la torre se rompe por tracción. La rotura se alcanza inmediatamente después de que empiecen a aparecer grietas en el hormigón de

algunas capas de los elementos más críticos. Primero la relación entre la carga y la fuerza en los meridianos, y entre ésta y los desplazamientos, se convierte en una relación no-lineal. Se produce una redistribución local limitada de fuerzas internas, después de lo cual, la fuerza de tensión meridional cae violentamente, mientras que el desplazamiento radial aumenta rápidamente.

La diferencia existente entre los comportamientos de las torres 1 y 2 consiste en que en la torre mayor las fuerzas meridionales bajo la carga de servicio, es decir ($g + w$), son de compresión para todos los coeficientes de seguridad a pandeo. En el caso de la torre 1 el factor último por carga de viento, siempre es menor que el coeficiente de seguridad a pandeo de diseño. Por ejemplo, para resistir un factor de carga por viento de magnitud 1,75 bajo tensión, es necesario tomar un coefi-

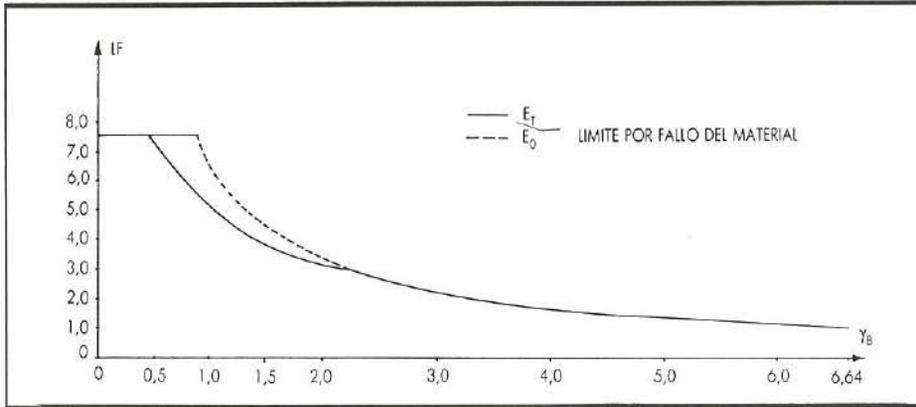


FIGURA 4. Relación entre el factor de la carga de viento y el comportamiento en rotura por tracción de la torre n. 1 para diferentes coeficientes de seguridad a pandeo.

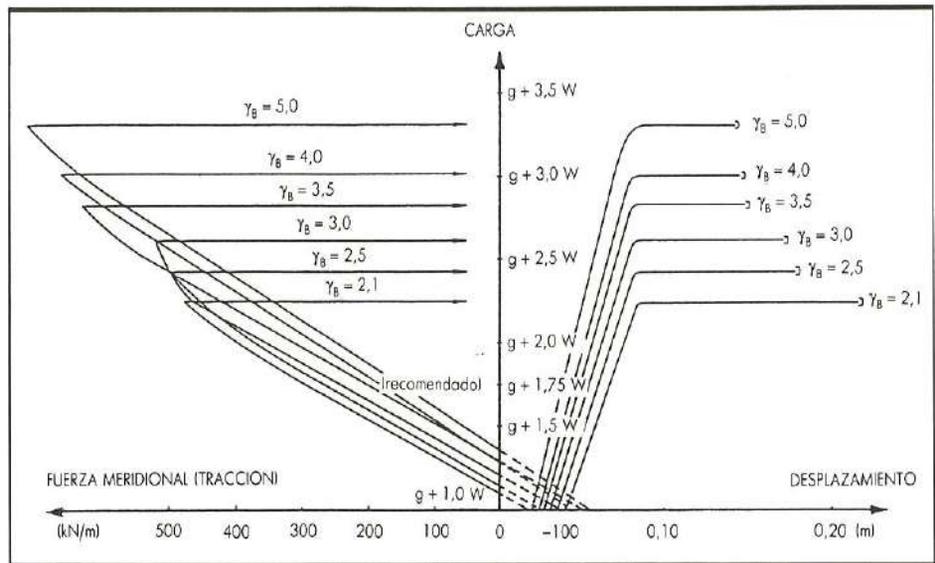


FIGURA 5. Relación entre el factor de la carga de viento y el comportamiento en rotura por tracción de la torre n. 2 para diferentes coeficientes de seguridad a pandeo.

ciente cercano a 2,5. Por otro lado, el mismo factor de seguridad nos lleva en el otro caso a un factor para la carga viento de 2,44 tal como se muestra en la figura 5.

La correlación entre el coeficiente de seguridad a pandeo γ_b y el factor da la carga de viento Γ_{uw} viene representada en la figura 6. Para la misma altura, aumentando el diámetro de la torre de refrigeración, es muy probable que se produzca pandeo en vez de rotura debido a la tracción (4).

La rotura a tracción viene determinada por la resistencia a tracción supuesta para el hormigón. El efecto que produce la cantidad de armadura en la carga final es despreciable, hasta que la armadura sea lo suficientemente fuerte como para asumir toda la fuerza a tracción que se desprende del hormigón después de agrietarse, condición que no puede ser aceptada desde el punto de vista económico (7).

Abel, Chang y Hanna afirman que en los proyectos normales americanos de torres de refrigeración se intenta controlar las proporciones de la lámina más por la

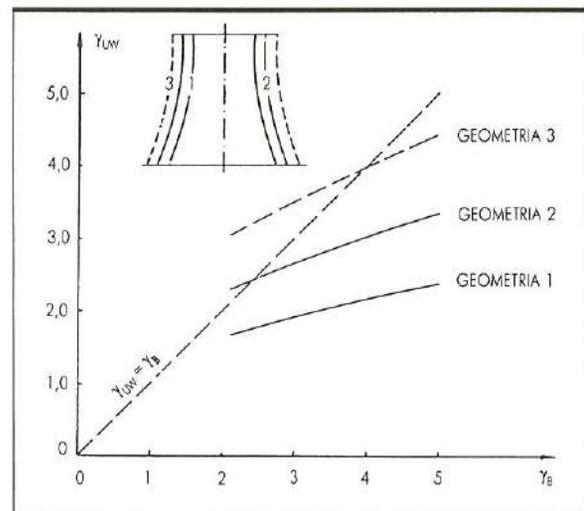


FIGURA 6. Correlación entre factor de la carga última y coeficiente de seguridad a pandeo para diferentes geometrías.

resistencia de ésta que por su rigidez. Sin embargo, un punto importante a tener en cuenta en el proyecto es la realización de una comprobación de la estabilidad para confirmar que la carga elástica de pandeo sea significativamente superior al estado último de resistencia. Las conclusiones basadas en varios procedimientos de análisis aplicados en 8 configuraciones distintas de torres de refrigeración son las siguientes:

- La concordancia casi absoluta entre el pandeo clásico y el análisis no-lineal, indica que el comportamiento pre-pandeo es esencialmente lineal.
- Las predicciones lineales de pandeo son en todos los casos inferiores a las obtenidas en pandeo no-lineal y en pandeo clásico.
- El método equivalente de carga «con simetría axial», como método mucho menos caro y más asequible, proporciona una estimación conservadora del límite de estabilidad elástica.

Krätzig y sus colegas comparan a continuación distintos procedimientos para proyectar láminas de torres de refrigeración resistentes a fenómenos de pandeo no-lineal:

- Cálculo completo no-lineal.
- Problema de «autovalores» incluyendo la carga de viento de diseño.
- Problema de «autovalores» para una carga de viento aproximada como una presión lateral con simetría axial.
- El concepto de pandeo reducido en membranas.
- El algoritmo hallado experimentalmente según recomendación IASS (1).

El análisis completo no-lineal, que lleva bastante tiempo, puede ser sustituido por un análisis lineal de autovalores para cargas de viento reales prácticamente sin ningún error. Pueden aparecer errores de hasta un 20 %, si la carga de viento real es sustituida por una presión con simetría axial. Láminas reales, es decir, imperfectas, pueden ser proyectadas según un algoritmo hallado experimentalmente, si las imperfecciones se limitan a la magnitud del espesor de la lámina. En el caso de grandes imperfecciones se hace inevitable realizar cálculos completos no-lineales haciéndose inevitable tener en cuenta también las no-linearidades del material (6).

Milford y Schnobrich investigan el efecto de la rigidez a tracción en la carga de rotura. Si se utiliza un modelo de rigidez a tracción relativamente alta puede activarse un 40 % de reserva de resistencia superior a la carga de rotura de la torre (7). Sin embargo, esta es una reserva muy alta si se compara con los resultados de Bochum que nos dan una reserva de sólo 20 % (7). Como señalan los autores, es necesario realizar más investigaciones antes de que estos resultados puedan generalizarse (8).

La interacción suelo-estructura bajo efectos dinámicos como un terremoto, es otro problema abordado en los ochenta. Wolf señala que para suelos muy blandos la frecuencia de humedad activada conduce a valores de

humedad equivalente más altos (9). Por otra parte, el análisis que hace Gould de la respuesta de una torre de refrigeración cimentada sobre pilotes muestra que, con un número mayor de éstos, la frecuencia natural se aproxima al valor que le correspondería en caso de estar sobre una base fija, mientras que el efecto interacción reduce la respuesta de la estructura laminar cuando le ha sido aplicada una carga de sismo fuerte (10).

El efecto de los anillos de rigidización sobre el pandeo en las torres de refrigeración ya había sido investigado, teórica y experimentalmente por el autor, durante la segunda mitad de los setenta (11, 12, 13). Peter y Form informan en los ochenta sobre la aplicación de anillos en las torres de refrigeración en las plantas nucleares de Doel III en Bélgica y en la de Isar II en Alemania y hacen hincapié en que las láminas de las torres de refrigeración rigidizadas con anillos no sólo son una alternativa estructural, sino que por encima de determinado tamaño, más bien superior a lo normal, aparte de tener unas ventajas económicas, cumplen igualmente con una necesidad estática y dinámica (14). Guedelhofer explica la aplicación de dos anillos para compensar la reducción del factor de seguridad a pandeo después de producirse una abolladura tras un tornado en la torre «Mississippi I» en USA.

Otro tema de estudio en los años ochenta ha sido el estado de deterioro de algunas torres de refrigeración. Las torres de tipo «húmedo» alemanas, puestas en servicio entre 1968 y 1975, han sido investigadas en relación a los defectos y daños producidos en la parte interior de la lámina. En todos los casos pudieron observarse depósitos de arena que tendían a perder la pasta de cemento, dejando al aire el árido grueso y, por tanto, una superficie basta y granulosa.

Para repararlas, en primer lugar, se aplica un chorro de agua a gran presión para retirar la capa quebradiza y escamosa de hormigón. A continuación, se da una doble capa de protección a las barras de armado descubiertas por el chorro de agua. Por último, la superficie interior de la lámina se cubre con una capa de resina epoxy (15).

3. PERIODO DESDE 1984

El seguimiento de los progresos realizados en los últimos 5 años puede efectuarse por los «Proceedings del 3.º Congreso Internacional de IASS sobre Torres de Refrigeración Natural», organizado conjuntamente con el EDF (Electricité de France) y SCAM, celebrado en París en abril de 1989 (6). El libro contiene 72 artículos relacionados con: «Mantenimiento, reparación e inspección» (13 ponencias), «Dinámica, sismos» (9 ponencias), «Elasticidad y carga límite» (9 ponencias), «Materiales, construcción» (8 ponencias), «Asientos del terreno» (7 ponencias), «Viento» (6 ponencias), «Diseño, análisis» (4 ponencias), «Investigación» (4 ponencias), «Nuevas tecnologías» (3 ponencias), «Aberturas» (3 ponencias), «Temas estadísticos» (2 ponencias) y «Recomendaciones» (1 ponencia). Se reunieron en París 152

expertos de 18 países y discutieron todos los temas relacionados con las torres de refrigeración. Como puede deducirse por el número de aportaciones, el tema «Mantenimiento y Reparación» ha sido el más estudiado durante los últimos cinco años. Por otra parte, la reparación de torres de refrigeración es una de las operaciones más delicadas debido a su altura y a las dificultades de acceso. Un sistema que permite esta operación ha sido desarrollado en Francia y es mostrado en la figura 7.

Los principales problemas son el acceso fácil a todo el área de la torre para su limpieza, reparación e impermeabilización a un coste y en un plazo razonables, así como la elección de la reparación apropiada y del material indicado. En Alemania están siendo diseñados unos aparatos de limpieza que operan horizontal y verticalmente por control remoto, así como plataformas especiales para efectuar el trabajo. Para la reparación, primero se utiliza un dispositivo para limpiar la suciedad, las partículas sueltas y los desconchados de hormigón de la superficie de la torre de refrigeración, consistente en un chorro de agua a gran presión. La operación de limpieza empieza en la cornisa de la torre de refrigera-

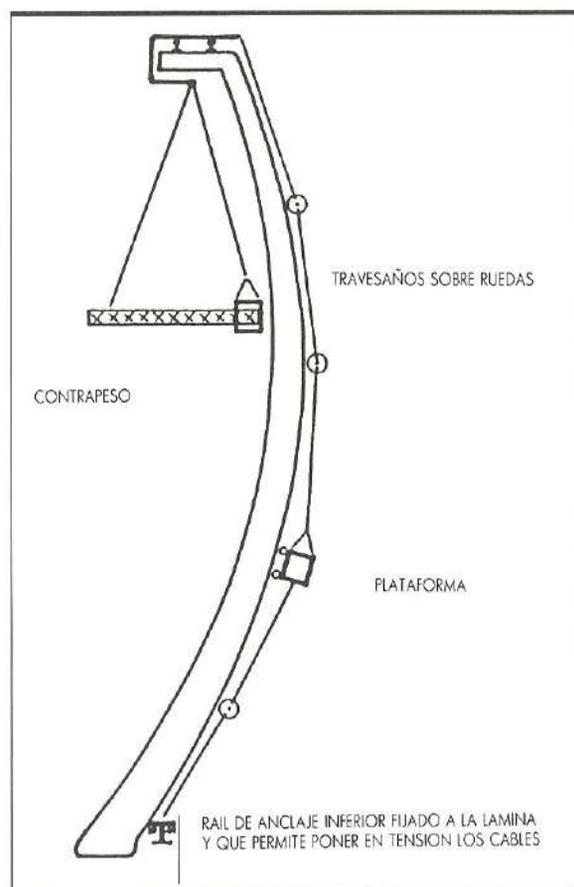


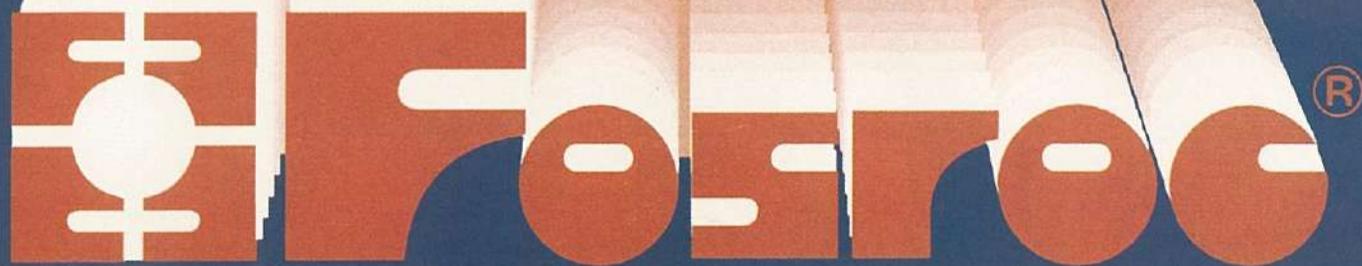
FIGURA 7. Sistema de inspección, limpieza y reparación de torres de refrigeración.

ción trazando círculos horizontales de arriba a abajo, para no contaminar con el agua sucia que chorrea, las áreas de la lámina de hormigón ya limpiadas. Después de la limpieza se realiza una inspección final y toma de notas de los datos observados en el hormigón. Se efectúa utilizando plataformas especialmente diseñadas que se desplazan horizontal y verticalmente. Los residuos de hormigón que puedan quedar en las barras de armado se retiran manualmente y se tratan con chorro de arena. A continuación son recubiertas manualmente con un material plástico especial con una base acrílica de dispersión, que sirve al mismo tiempo como adhesivo para los dos componentes del mortero, con el cual a continuación son rellenadas todas las cavidades y reparada todo el área dañada (17).

Como protección a largo plazo, se utiliza un recubrimiento o impermeabilización de 2 mm de espesor que se aplica con pistola y permanece permanentemente elástico y puentea las grietas. Además, los gases ácidos de combustión despedidos en el transcurso de la desulfurización hacen más susceptible a la lámina. Esta atmósfera ha de considerarse como muy perjudicial para el hormigón, ya que las partículas nocivas se depositan sobre la superficie interna preferentemente por encima de la cintura, aunque también lo hagan en la superficie externa. Es necesaria una protección complementaria contra este ataque. Hasta ahora no existe en el mercado ningún sistema de recubrimiento que cumpla las propiedades que se requieren. La tabla I resume el cuadro de requisitos o exigencias de los recubrimientos de torres de refrigeración con la introducción de gases de combustión limpios (18).

En dos torres de refrigeración de la central de Kelvin, en Sudáfrica, se observó la aparición de grietas verticales poco tiempo después de entrar en servicio a principios de los años sesenta. La propagación de las grietas fue observada cuidadosamente y por aquella época se aplicó a la parte externa de la lámina una especie de «piel» de gunita de 50 mm de espesor. En 1983 se volvió a observar la aparición de grietas; esta vez más importantes, y se optó por reparar la lámina de la torre de refrigeración colocando 7 anillos externos (19).

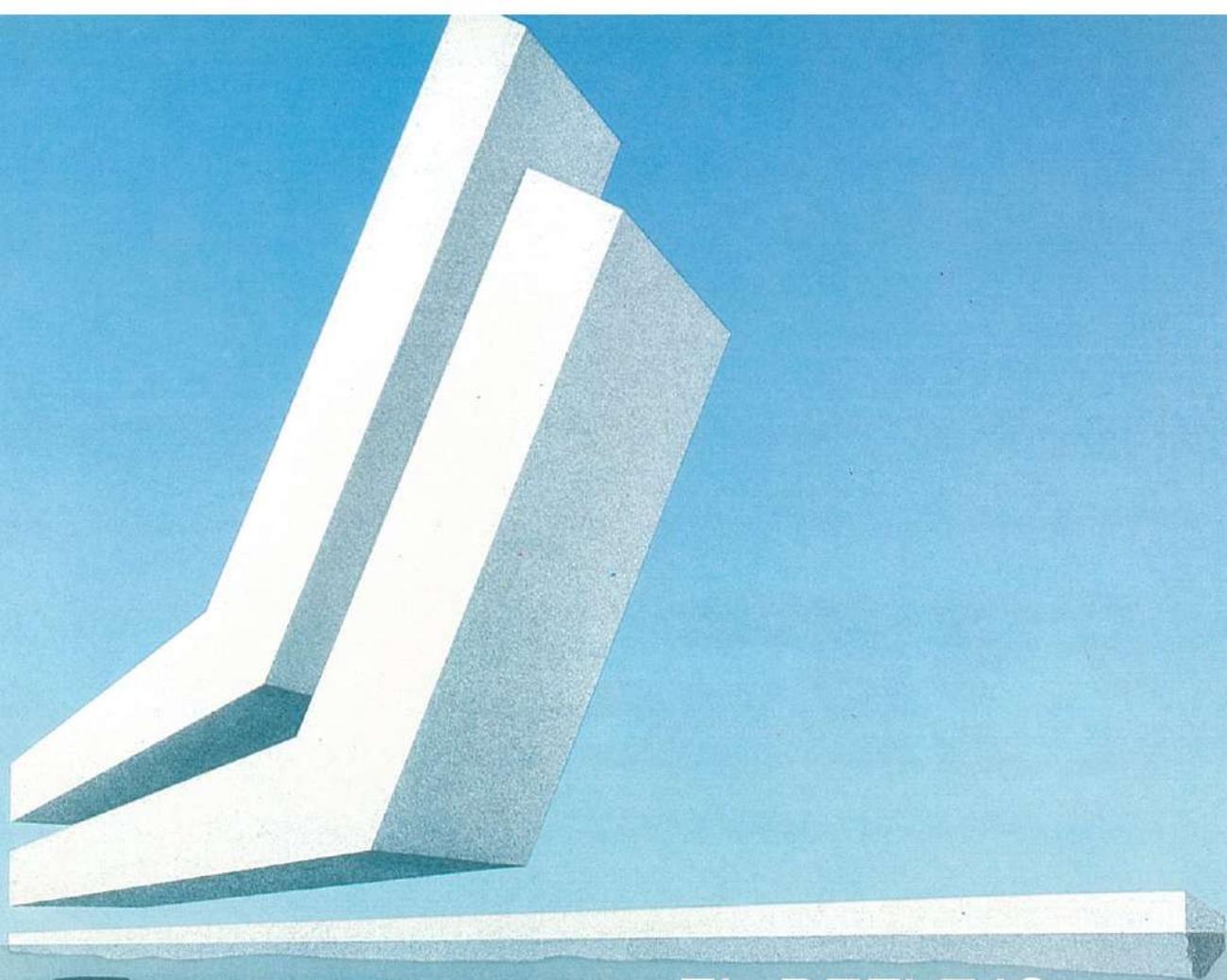
Desde 1986, Electricité de France ha comenzado un programa de control sistemático de las torres de refrigeración, cuyo fin es aplicar la experiencia adquirida a la decisión de reparar o reforzar las torres de refrigeración existentes. En 1989, de todas las torres de refrigeración en servicio, 21 están bajo control. El control regular incluye efectuar mediciones topográficas anuales y efectuar una inspección visual. La inspección visual llevada a cabo desde el suelo, proporciona un balance de los defectos y señala las áreas más dañadas o con defectos y las que tienen un nivel de deterioro más alto. Las mediciones topográficas incluyen el nivelado de la cimentación de la estructura, cuyo fin es detectar los asentamientos diferenciales del anillo de cimentación y la planimetría de tres círculos característicos en la lámina. Se puede efectuar la medición de forma fotogramé-



1970-1990 XX ANIVERSARIO

**Tecnología para Estructuras,
Cimentaciones y Hormigón
en general.**

**FOSROC, S.A.
Apartado 100
48200 DURANGO (Vizcaya)
Teléfono: (94) 681 15 16
Fax: (94) 681 51 50
Télex: 34406**



EL REFLEJO DE UNA SOLIDA REALIDAD

Este símbolo refleja una idea que nació hace más de setenta años: convertir el cemento español en materia prima universal. Este símbolo significa prestigio en todo el mundo, porque representa a la **COMPANÍA VALENCIANA DE CEMENTOS**: una empresa española que crece sin fronteras. Por eso este símbolo es el reflejo de una sólida realidad.

 **VALENCIANA
DE CEMENTOS**

POR EL PROGRESO DE LA CONSTRUCCION

Resistencia química química	Sustancias agresivas: a) Gases SO ₂ NO _x CO ₂ y otros b) Acidos HXOOH H ₂ SO ₄ HCl HNO ₃ y otros c) Vapores valor pH 1 - 2	Efectos combinados
Resistencia a la temperatura	Condiciones extremas: a) Temperaturas altas temperatura del gas de combustión hasta 65 °C máx. b) Helada, formación de hielo c) Gradientes elevados de temperatura dentro a fuera (interior/exterior) d) Cambios rápidos de temperatura, por ejemplo en el momento de arranque y parado	
Resistencia a los rayos UV	Ataque especialmente duro en las zonas superiores	
Características de aplicación	a) A ser posible, independientemente de las condiciones meteorológicas b) Adecuadas para trabajo «in situ» (enormes superficies en poco tiempo)	
Capacidad de impedir la forma de fisuras	La formación de fisuras y los cambios que se producen en el ancho de las mismas es inevitable	
Impermeabilidad	a) Impermeable a líquidos b) Resistente a la difusión (es imprescindible que la superficie no presente imperfecciones ni bolsas de aire)	

TABLA 1. Requisitos de las capas de protección para torres de refrigeración con introducción del gas de combustión [18].

trica o aplicando vibraciones dinámicas locales con el fin de detectar deterioros locales. Las deformaciones en el meridiano se miden aplicando planimetría láser. La formación de fisuras y roturas se sigue con un equipo de vídeo o aplicando técnicas especiales como el radar o la tomografía sísmica.

Otra importante experiencia obtenida durante la última década en la única torre de refrigeración de red de cables del mundo es su alta sensibilidad al deterioro. La torre de este tipo de Schmehausen, en Alemania, fue terminada hace 12 años. Durante éste relativamente corto espacio de tiempo, se observaron los siguientes daños importantes, descritos por Erdmann (20):

En 1982 se observó que aparecían defectos en la cabeza del pilón de hormigón armado y la superficie del hormigón fue tratada con un sellador. A pesar de esta medida, durante una detallada inspección, en 1985, se observaron deterioros más serios. La superficie de la cubierta estaba agrietada en un buen número de sitios y en algunos puntos los elementos de acero estaban corroidos, por lo cual una vez retirados los trozos corroidos hubo de aplicarse una gruesa capa de hormigón. En 1988, tanto los inspectores como las personas que intervinieron en la reparación acordaron las siguientes medidas:

- Limpiar la superficie con el fin de retirar las capas deterioradas.
- Utilizar una capa de imprimación con el fin de asegurar una base firme.

— Aplicar una capa de sellador como protección contra los esfuerzos mecánicos.

— Tratamiento de las superficies laterales, por ejemplo el chorro de arena, posiblemente también con medidas de protección contra la corrosión del acero.

Los daños producidos, se supone, son el resultado de la agresividad y fricción inducida por el polvo y las partículas de carbón expulsados por la torre de refrigeración. Otro tipo de deterioro es la corrosión observada en los cables cubiertos de aluminio, llamados «alumowelt». El recubrimiento aluminico sella el cable de acero tan perfectamente que evita la corrosión. En el presente caso, la corrosión se produjo únicamente en los puntos donde el recubrimiento estaba mecánicamente dañado. Por otro lado, los 36 cables sustentantes entre el anillo elevador y el anillo triangulado eran cables de acero completamente sellados, galvanizados exteriormente y de 35 mm de alma metálica. Como medida adicional, durante la fase de construcción, se aplicó un recubrimiento bituminoso de 20 mm de espesor.

A pesar de todo, se comprobó que se habían producido grietas e incluso la capa galvanizada había sido atacada debido a la penetración de agua. La causa principal de este deterioro suponemos que fueron las vibraciones tan pronunciadas en los cables. Se limpiaron mecánicamente los cables y se cubrieron con una capa protectora de 0,4 mm de espesor. A pesar del alto grado de pretensado, la construcción de red de cables y, consecuentemente, las láminas de estaño adosadas a ella son

objeto de considerable movimiento debido a la influencia del viento y la temperatura. Consecuentemente, algunos de los pernos auto-cortantes estaban medio sueltos o se rompían. Por otra parte, en los últimos años, cada una de las conexiones ribeteadas ha sido reemplazada por nuevos remaches expansivos y los pernos autocortantes también han sido reemplazados por otro tipo.

Los 216 cables meridionales y los 16 oblicuos de la torre de refrigeración acababan en una cimentación en forma de anillo de hormigón armado anclado al suelo. En la inspección de 1982 se observó gran número de anchas fisuras que hacían peligrar la armadura debido a la corrosión. En 1982 y 1983 se repararon todas las fisuras. Las más finas recibieron una inyección de cepillo (brush-injection) y las más anchas fueron rellenadas a presión con poliuretano. En 1986 había 15 puntos en donde las grietas que ya se habían inyectado a presión se habían abierto nuevamente. De nuevo fueron reparadas e impermeabilizadas. Sin embargo, en 1988 había aparecido otro conjunto de fisuras. Entre las posibles causas para la formación de fisuras, podemos citar la influencia de la temperatura y de las cargas de viento que causan tensiones variables en el anillo de la base. Esto hace que los anclajes del suelo se deslicen, resbalen y disminuya su resistencia (20). Después de esta enumeración de defectos, es difícil afirmar que el sistema de red de cables sea el apropiado para las torres de refrigeración.

Después de tantos informes sobre los daños producidos en estas torres en la última década, también deberíamos mencionar algunos avances e innovaciones que se han producido en este campo. Pudo realizarse con éxito un agujero de casi 10 m de diámetro y la rigidez de la lámina fue llevada hasta su valor original por medio de anillos alrededor de las aberturas. El problema estriba en mantener el coeficiente de seguridad frente a los factores de pandeo y fallo de los materiales. Las aberturas son necesarias para las tuberías que llevan los gases limpios procedentes de las plantas de desulfuración a la torre de refrigeración. Las torres de refrigeración construidas más recientemente ya tienen esas aberturas desde el principio.

La estabilidad, la carga máxima, los efectos producidos por los sismos y la relación suelo-estructura son problemas intensamente investigados, también después de 1984. El gran número de ponencias (25) relacionadas con estos temas, demuestra fehacientemente este hecho. Desde 1973, en China se han construido aproximadamente 100 torres de refrigeración de más de 90 m de altura, siendo la mayor de 130 m (21). Aunque el espesor de la lámina varía por escalones, con espesor constante en secciones divididas, sin embargo se utilizan las fórmulas de pandeo recomendadas por IASS para la acción combinada de carga muerta y acción del viento.

Para efectuar el análisis en rotura según Krätzig y Zhuang de Bochum, se consideran las no-linearidades geométricas y del material en las láminas de hormigón

armado de las torres de refrigeración utilizando elementos finitos de 8 capas para modelar el hormigón, tomando en consideración el reblandecimiento a compresión, según la teoría plástica de rotura, mientras que la armadura se da por hecho que actúa elastoplásticamente. Los cálculos realizados indican la propagación de las zonas agrietadas y el debilitamiento de la estructura al aumentar los niveles de carga. Se tienen en cuenta todas las combinaciones de «carga muerta» con «cargas de viento» según las normas alemanas y el Código modelo del CEB. Se llega a la conclusión de que ambos estados límite especificados en estos códigos o normas, resultan ser muy conservadores, mientras que el código alemán hace alcanzar un límite más bajo con una redistribución muy limitada de fuerzas internas después de producirse la fisuración (22). Lu Wen-Da y sus colegas de la Universidad Tecnológica de Shanghai hallaron efectos bastante interesantes sobre las propiedades materiales de la carga final en las torres de refrigeración. Teniendo en cuenta el cambio de dirección de las fisuras, se llega a una redistribución de las cargas meridionales y a un aumento del 60 %. Este es un efecto que está vigente actualmente y concuerda con el resultado que dio Schnobrich de un 40 %. Por otra parte, si se multiplica la cantidad de armado por dos, esto nos lleva a un factor de aumento de 2,77, que parece muy elevado. Este valor tan elevado está en contradicción con el otro resultado que se obtiene reduciendo la resistencia a tracción del hormigón a la mitad de su valor y todavía es casi tan elevado como la carga máxima para el caso de tener en cuenta toda la resistencia a tracción del hormigón (23).

Todos estos resultados, obtenidos por distintos métodos, indican la dificultad de conseguir modelos matemáticos que reflejen el comportamiento físico del hormigón armado en rotura. Por otra parte, en lo que a pandeo se refiere, los resultados obtenidos después de efectuar cuidadosos ensayos en modelos elásticos, siguen siendo fidedignos y actuales.

Debido al limitado espacio de este análisis, es imposible tratar los muchos aspectos importantes investigados durante la última década. Por ejemplo, la estructura espacial de acero de forma cilíndrica y cónica de 160 m de altura o las torres de refrigeración descritas por Cholnoky y Kollar prometen ser una alternativa interesante a las láminas de hormigón armado (24). Sin embargo, los autores no dan información alguna sobre la eficacia de la forma cilíndrica para la circulación del aire y sobre la protección a largo plazo contra la corrosión de las barras de acero. Incluso en las torres de refrigeración de tipo-seco, como es el caso de la torre de refrigeración de red de cables de Schmehausen, la corrosión no pudo ser prevenida del todo.

Los muchos y polifacéticos proyectos llevados a cabo en Francia, como por ejemplo la aplicación de soportes meridionales tipo pared empleados en las torres de refrigeración más altas del mundo (Golfech, 178,5 m y Chooz, 172,0 m de altura) (26) o el uso de membranas textiles fijadas a través de un hiperboloide reticulado

que, aunque por el momento es aplicable sólo en torres de refrigeración bastante pequeñas (27), pueden ser innovaciones prometedoras para el futuro.

Si las torres han sido construidas en grupo o bien cercanas a otras edificaciones altas de la central energética, el efecto del viento debe seguirse investigando en túneles de viento con modelos apropiados (25).

Volviendo al documento de IASS de 1979 (1), es igualmente válido en 1989. Sin embargo, puede ser conveniente añadir algunas cosas relacionadas con el efecto de los anillos rigidizadores y el mantenimiento, la reparación y la protección de las mismas, recogiendo la experiencia de los últimos 10 años.

REFERENCIAS

1. IASS. «Recommendations for the Design of Hyperbolic or Other Similarly Shaped Cooling Towers», Madrid, 1979.
2. MANG, H. A., y TRAPPEL, F. «Physically Linear Buckling Analysis of Reinforced Concrete Cooling Towers-Design Necessity or Academic Exercise?», in *Natural Draught Cooling Towers*, P. L. Gould, W. B. Krätzig, I. Mungan y U. Wittek (editors), Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984, pp. 279-297.
3. ACI-ASCE. (1977). Committee 334: «Reinforced Concrete Cooling Tower Shells-Practice and Commentary», *ACI Journal*, 74, pp. 22-31.
4. MUNGAN, I. «Research and Design of Large Cooling Towers», in *Proceedings of the IASS International Congress: Theory and Experimental Investigation of Spatial Structures, Application of Shells in Engineering Structures*, Moscow, 1985, Volume 3, pp. 155-169.
5. ABEL, J. F.; CHANG, S.-C., y HANNA, S. L. «Comparison of Complete and Simplified Elastic Buckling Loads for Cooling Tower Shells», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 309-318.
6. ECKSTEIN, U.; HARTE, R.; KRÄTZIG, W. B., y WITTEK, U. «Nonlinear Elastic Stability of Cooling Tower Shells», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 333-346.
7. MUNGAN, I. «Wind-Buckling Approach for R/C Cooling Towers», in *Civil Engineering Practice*, P. N. Chermisinoff, N. P. Chermisinoff, y S. L. Cheng (editors), Technomic, Lancaster, Basel, 1987, pp. 627-661.
8. MILFORD, R. V., y SCHNOBRICH, W. C. «The Effect of Cracking on the Ultimate Load of Reinforced Concrete Cooling Towers», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 319-332.
9. WOLF, J. P. «Seismic Analysis of Cooling Towers», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 159-176.
10. LEE, B. J., y GOULD, P. L. «Seismic Response of Cooling Towers on Interactive Shallow or Deep Foundations», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 177-187.
11. MUNGAN, I. «Buckling Stresses of Stiffened Hyperboloidal Shells», *ASCE, Journal of the Structural Division*, vol. 105, núm. ST8, Proc. Paper 14775, august 1979, pp. 1589-1604.
12. MUNGAN, I., y LEHMKÄMPER, O. «Buckling of Stiffened Hyperboloidal Cooling Towers», *ASCE, Journal of the Structural Division*, vol. 105, núm. ST10, Proc. Paper 14917, october 1979, pp. 1999-2007.
13. ZERNA, W., y MUNGAN, I. «Construction and Desig of Large Cooling Towers», *ASCE, Journal of the Structural Division*, vol. 106, núm. ST2, Proc. Paper 15217, february 1980, pp. 531-544.
14. PETERS, H. L. «Ring-Stiffened Shell Constructions a Structural Alternative or a Technical and Economical Necessity», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 21-38.
15. LEHMKÄMPER, O. «Durability of the Inner Surface of Cooling Tower Shells», in *Natural Draught Cooling Towers* (Ref. 2), pp. 501-512.
16. IASS, EDF and SCAM *Receuil des Communications/Proceedings*, 3rd. International Symposium on Natural Draught Cooling Towers, Paris, april 24-26, 1989, F. Goldwirt (editor), volumes 1 and 2, Paris, 1989.
17. HOFMAN, R., y BÖSEBECK, H. O. «A New Method for Long-Term Repair and Reconditioning of Natural Draught Cooling Towers - The EOB-System», in Ref. 16, pp. 369-380.
18. LOHAUS, L. «Concrete and Concrete Coating in the Construction and Operation of Natural-Draught Cooling Towers with the Introduction of Flue Gases», in Ref. 16, pp. 449-458.
19. BOSMAN, P. B. «Repairs of Two Severely Cracked Cooling Tower Shells Using Stiffening Rings», in Ref. 16, pp. 381-390.
20. ERDMANN, W. «Experiences With the First Dry Cooling Tower for the THTR Power Plant in Schmehausen/Germany», in Ref. 16, pp. 427-437.
21. BAOQING, L. «Review and Feedback of Natural Draught Cooling Towers Research Over the Last Fifteen Years in China», in Ref. 16, pp. 537-543.
22. KRÄTZIG, W. B., y ZHUANG, Y. «Nonlinear Physical and Geometrical Collapse Analysis of Cooling Towers», in Ref. 16, pp. 135-144.
23. WEN-DA, L., y LON-YUAN, L. «The Static and Buckling Analysis of Reinforced Concrete Cooling Towers Under Considering Geometric and Material Nonlinearities», in Ref. 16, pp. 259-269.
24. CHOLNOKY, P., y KOLLAR, L. «New Trends in the Design and Erection of Large Reticulated Steel Cooling Towers», in Ref. 16, pp. 633-639.
25. KÖPPER, H.-D. «Influence of Neighbouring Buildings on Wind Induced Stresses in Cooling Tower Shells», in Ref. 16, pp. 641-665.
26. JALIL, W. «Optimisation of the Supporting System of High Cooling Towers of the Third Generation-Simulation of Accidental Abnormal Imposed Soil Deformations», in Ref. 16, pp. 103-113.
27. BOZETTO, P.; TRUCHETT, J.-M.; BARBAUD, J., y PERMEZEL, P. «Feasibility Study of a Textile Cooling Tower (T.P. Project)», in Ref. 16, pp. 545-556.

Las Eléctricas invierten 62.000 millones en Investigación y Desarrollo

Empresas de Ingeniería participan en los proyectos

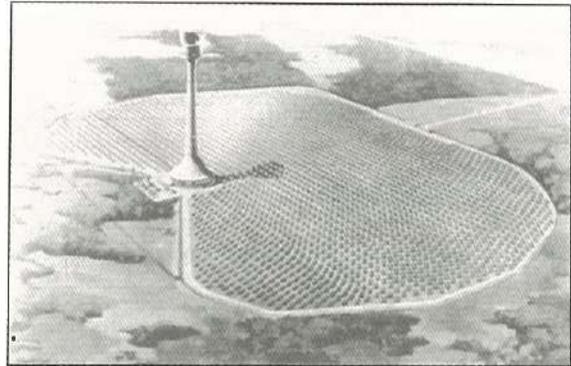
Unos 62.000 millones de pesetas suman en la actualidad los presupuestos totales de los aproximadamente 800 proyectos incluidos en el Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico Electrotécnico (PIE) que desarrollan desde el año 1980 las empresas eléctricas españolas en colaboración con otras empresas, organismos e instituciones. Estos presupuestos se cubren, por un lado, con un porcentaje fijo sobre los ingresos por venta de electricidad que las empresas eléctricas dedican a tal fin; y por otro, con aportaciones suplementarias de dichas empresas y de las demás entidades que colaboran en su realización, entre ellas varias de ingeniería.

Los trabajos que actualmente se llevan a cabo —un eslabón más de una tarea permanente de investigación de las empresas eléctricas españolas que arranca de finales del pasado siglo— son analizados en la publicación «El sector eléctrico y la investigación» elaborada por UNIDAD ELECTRICA, S. A. (UNESA).

Los proyectos de investigación que se desarrollan en el área relativa al sistema eléctrico son los referentes a la infraestructura. El objetivo de estas investigaciones es incrementar el rendimiento de las instalaciones eléctricas y aumentar su fiabilidad, contribuyendo al desarrollo de una tecnología nacional en este terreno. Los proyectos cuya finalidad es incrementar la fiabilidad de las instalaciones son fundamentalmente, los relativos a telecontrol, comunicaciones y protección, mientras que los que se centran en el aumento de su rendimiento y la disminución de costes afectan esencialmente a la medición, racionalización y planificación de la explotación.

Los proyectos incluidos en el área de combustibles fósiles son los que tratan de conseguir una combustión más limpia y rentable de los combustibles fósiles. Al conocimiento de las características de los carbones españoles, a su preparación para conseguir una combustión del mineral compatible con la preservación del medio ambiente y al empleo de nuevas tecnologías que proporcionan una utilización más limpia y rentable de este combustible se consagran diversos proyectos.

Una veintena de proyectos se dedican a incrementar la fiabilidad y seguridad de las centrales nucleares, y muy especialmente al aumento del rendimiento de las instalaciones. Un cierto esfuerzo adicional se dirige a participar en el desarrollo de las nuevas tecnologías nucleares que están siendo puestas a punto en diversos países industrializados y que contribuirán al futuro de esta forma de energía. Algunos de estos proyectos se centran en el estudio de los materiales empleados en las centrales nucleares españolas. Otros contribuyen a un mayor conocimiento del comportamiento de componentes y sistemas y un tercer grupo se centra en temas de seguridad.



Maqueta del proyecto de central termosolar GAST.

Aunque no cabe un excesivo optimismo sobre cuál puede ser la contribución de las energías renovables al abastecimiento energético a corto y medio plazo, las empresas eléctricas han dedicado y están dedicando una mayor atención a aquellas cuya explotación se encuentra más cercana a lo que es producción de energía eléctrica —hidráulica, fotovoltaica y eólica—, que son las que absorben mayor número de proyectos; y, dentro de ellas, a los aspectos de su aprovechamiento que guardan más estrecha relación con la generación de electricidad, es decir, el diseño y operación de sistemas y equipos.

En el ámbito de la energía hidráulica, cabe mencionar el proyecto que estudia el potencial hidráulico aprovechable mediante minicentrales que existen actualmente en España, así como el de la elaboración de un modelo numérico para analizar y predecir el comportamiento de presas que presentan problemas de expansión del hormigón. Otros dos proyectos centran su atención sobre los materiales empleados.

Por lo que se refiere a la energía eólica, seis investigaciones abordan la construcción y explotación de instalaciones de este tipo de distintas características y potencia unitaria; otros se han venido desarrollando para conocer el potencial de los recursos existentes en España. Asimismo, cabe mencionar los que se refieren a diseños de aerogeneradores.

En cuanto a la energía solar fotovoltaica, varios de los proyectos se refieren a la operación de diversas instalaciones en condiciones reales de explotación. Sobre nuevos diseños y subsistemas existen en la actualidad tres investigaciones en marcha.

Finalmente, en el área de planificación y diversos incluye una serie de actividades relacionadas con información, documentación e impacto social y económico de la producción y distribución de la electricidad, gestión de los programas de investigación del sector, etc.