

504 - 1

# torre de televisión Stuttgart

F. LEONHARDT, ingeniero

## S I N O P S I S

Descripción general y estudio estático de la torre de televisión, construida en Stuttgart, de unos 210 m de altura total—antena metálica incluida—y provista de una especie de tronco de cono invertido, de mayor diámetro medio que el del fuste de la torre que, situado en la parte superior de la torre entre los 138 y 150 m de altura respecto al suelo, se ha subdividido, en altura, formando cuatro plantas, en las que se han alojado los servicios y un restaurante. Por encima de este cuerpo superior troncocónico se ha construido una terraza para poder disfrutar de espléndidas vistas panorámicas. La torre propiamente dicha tiene 10,8 m de diámetro en la base y 5,04 m en la parte superior, con una altura de 138 m entre estas dos secciones extremas.

### Generalidades

Para la construcción de la torre-antena de televisión de Stuttgart se pensó, en primer lugar, en elevar una especie de castillete metálico de unos 200 m de altura. Las flexiones derivadas en estos tipos de estructuras parecían aconsejar una celosía metálica como solución viable. Pero el autor de este trabajo propuso, a fin de ganar más forma estética y posibilidades de poder admirar los magníficos panoramas que rodean a la ciudad, la construcción de un esbelto cuerpo troncocónico de hormigón, que dispondría, además de los servicios funcionales inherentes, de un restaurante y una terrama-mirador, etc.

La idea de una explotación económicamente sana del restaurante y mirador permitió dar mayor amplitud al proyecto. Después de no pocas consultas y estudios entre ingenieros y arquitectos, en mutua colaboración, se llegó a la forma actual, es decir, a un edificio de cuatro plantas, sostenido por un apoyo troncocónico de 138 m de altura con diámetros de 5,04 y 10,8 m en sus bases respectivas.

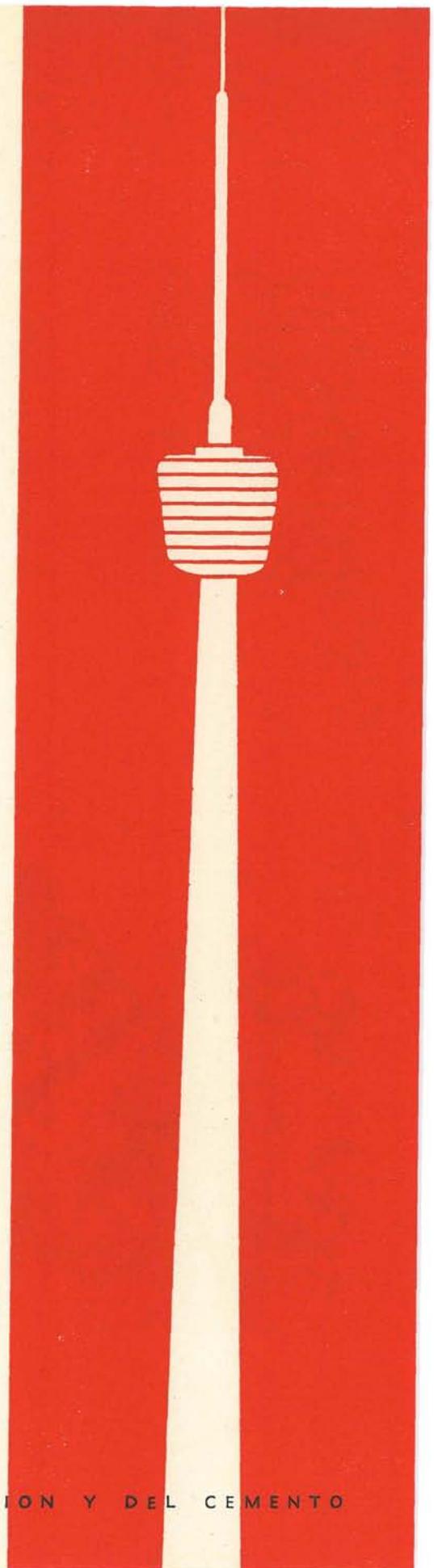
La forma externa del edificio flotante en altura debía tener como condición la de ofrecer la menor resistencia posible a los efectos del viento. Es decir, superficie exterior lisa, redondeada, libre de cantos, aristas o relieves, aerostática y revestida con chapa de aluminio brillante, que arranca reflejos caprichosos de la iluminación.

Al pie de la torre se ha construido el edificio que alberga el servicio técnico y los auxiliares.

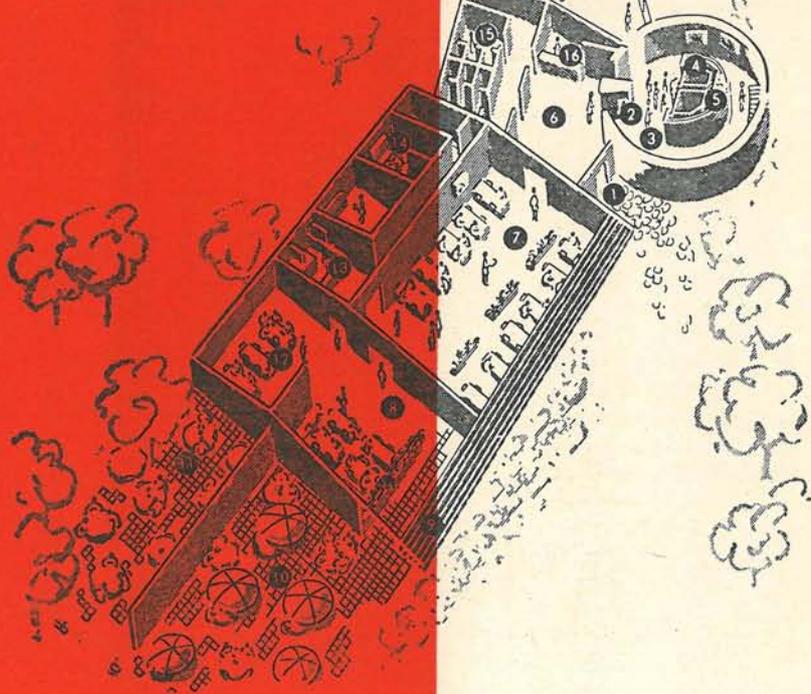
### Descripción general de la obra

Al estudiar el terreno de apoyo se vió que no eran de temer grandes asientos ni irregularidades de éstos. La carga prevista para el terreno fué de 3,60 kg/cm<sup>2</sup> y una adicional de 1,3 kg/cm<sup>2</sup>, debida a los efectos del viento.

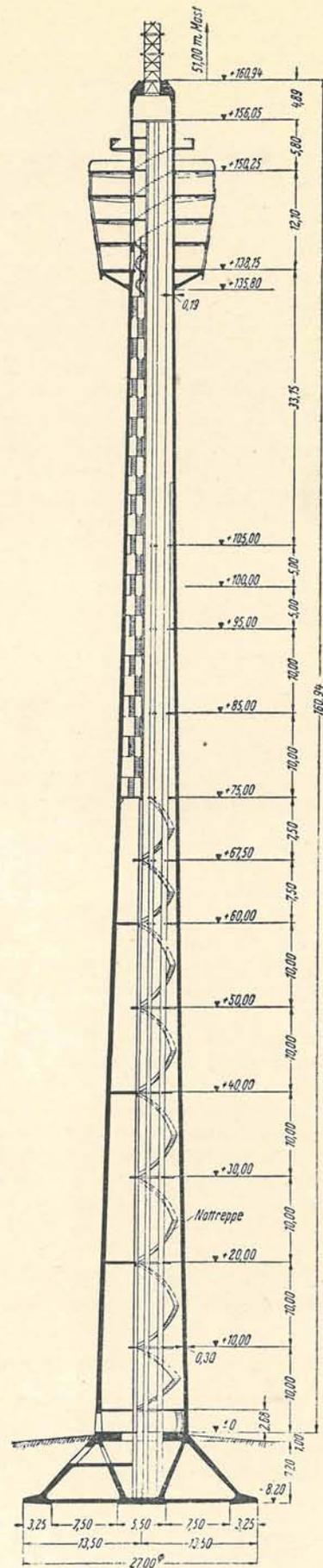
I N S T I T U T O   T E C N I C O   D E   L A   C O N S T R U C C I O N   Y   D E L   C E M E N T O



1. Entrada a la torre.—2. Taquilla.—3. Acceso al ascensor.
4. Ascensor.—5. Hueco para cables.—6. Vestibulo.—7. Restaurante.—8. Pequeño restaurante.—9. Parteluz.—10. Jardín al sol.—11. Jardín en la sombra.—12. Comedor reservado.—13. Oficio.—14. Cocina.—15. Lavabos.—16. Guardarropa.—17. Dormitorio.—18. Dormitorio.—19. Almacén.—20. Taller.—21. Cabina de escucha.—22. Sala de emisión.—23. Escalera.—24. Sala de control.—25. Laboratorio.—26, 27 y 28. Oficinas.—29. Control del ascensor.



Edificio al pie de la torre.



La forma acariciada desde un principio para el cimiento era circular. Estudiado este tipo de apoyo, dió por resultado un anillo de base de 27 m de diámetro exterior y 3,25 de interior. Entre el pie de la torre y este anillo de base se formó un tronco de cono de paredes relativamente delgadas. El Dr. Ingeniero Pieckert, que contribuyó poderosamente en el cálculo estático de la torre, propuso reforzar el tronco de cono externo de cimientos con otro interno invertido, cuya parte inferior se fijó a una placa delgada horizontal. La pared del tronco de cono exterior tiene 30 cm de espesor sobre el anillo de cimiento y 60 cm en su unión con la base de la torre, mientras que la pared del interior es de 30 cm en la parte superior y 45 en la inferior.

Las cargas de la torre se transmiten al cimiento por medio del tronco de cono externo, que da lugar a una tracción de 540 toneladas en el anillo de la base de cimientos. Esta enorme tracción se ha absorbido por medio de cables pretensados, que se han colocado en el anillo de base formando cuatro capas y en la dirección de diámetros y cuerdas paralelas a ellos. Cada capa está formada por siete paquetes de cuatro cables, es decir, de 28 cables. Las cuatro capas tienen, por tanto, 112 alambres. Estos cables son del tipo Freyssinet, de 50 toneladas, de 12 alambres de 8 mm de diámetro. Esta disposición ha permitido absorber 141 toneladas por metro de circunferencia exterior del anillo. Los paquetes se han espaciado convenientemente para dejar suficientes huecos donde poder vibrar el hormigón.

Sobre este cimiento se apoya la torre propiamente dicha, de 136 m de altura, formando un tronco de cono hueco, de 5,04 m de diámetro superior y 10,80 m en la base. El espesor de paredes varía de 0,60 m en el pie hasta 0,30 a 10 m de altura, y de esta sección hacia arriba va disminuyendo hasta 0,18 m en la parte superior.

La torre se ha rigidizado interiormente por medio de diafragmas transversales espaciados a 10 m. De cada dos diafragmas, uno de ellos sirve de rellano de la escalera interior. Estas losas transversales se sostienen interiormente por medio de cinco columnas, las cuales fijan también las guías de los dos ascensores que circulan en el interior de la torre.

El edificio de cuatro plantas que constituye la cabeza de la torre arranca a los 136 m de altura, y la plataforma mirador se encuentra a 150 m sobre el terreno. La antena empieza a los 158 m y termina a los 214 m. El mirador se halla a la cota 630 m respecto al nivel del mar.

La parte inferior de la torre tiene tres puertas, de 1,50 m de luz, que dan acceso a los ascensores. La sección transversal restante de muros se reforzó, dando a éstos un espesor de 0,80 metros.

Con objeto de resistir a los fuertes momentos que da lugar el viento, la torre se armó con una sección de acero Tor de  $765 \text{ cm}^2$  en la base. La tensión de trabajo de este acero es de  $2.400 \text{ kg/cm}^2$ . Transversalmente, la torre se zunchó con dos anillos, uno interior y otro exterior, que se extienden desde la base a los  $102,5 \text{ m}$  de altura.

El edificio flotante de cuatro plantas tiene un diámetro de  $12,10 \text{ m}$  en la primera planta, que va aumentando hasta el techo de la tercera, donde es de  $14,85 \text{ m}$ . Esto da lugar a una cuarta parte cilíndrica de este último diámetro. Con objeto de no aumentar exageradamente la altura del edificio, la altura de planta es de  $2,91 \text{ m}$ . Estas cuatro plantas se comunican entre sí.

La antena, de  $56 \text{ m}$  de altura, se ha anclado por medio de cuatro placas transversales soldadas en los pies, hormigonadas formando bloque, y se ha rigidizado en la parte inferior con otras placas soldadas en planos verticales.

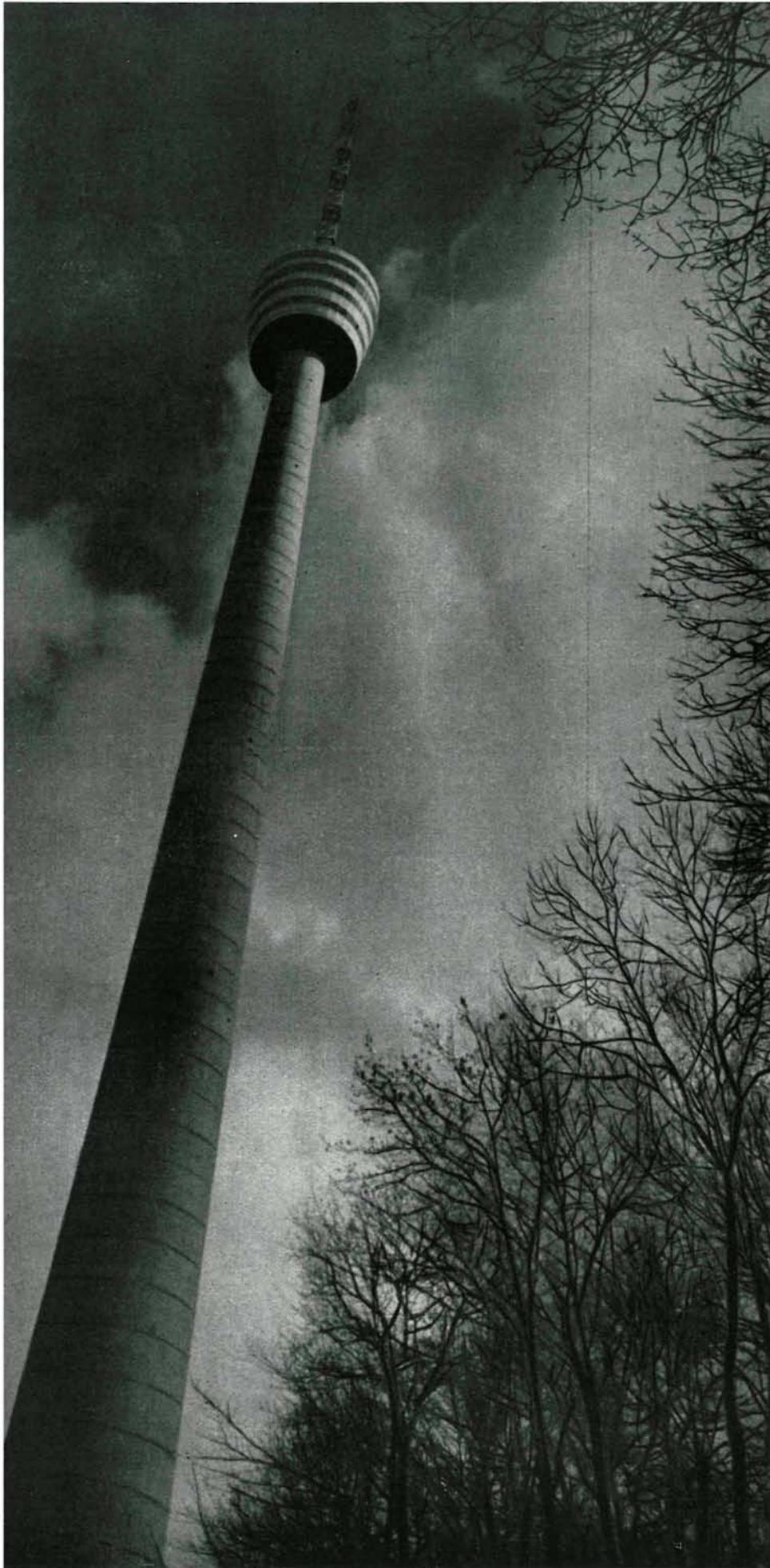
### **Cálculo estático**

Las cargas verticales no presentaban grandes dificultades para su determinación, pero no sucedió otro tanto para los de dirección horizontal, ya que se trataba de una estructura de señalada esbeltez. Los procedimientos empleados en las Normas DIN para la estabilidad de chimeneas sin apoyo lateral no podían emplearse directamente sin previa comprobación.

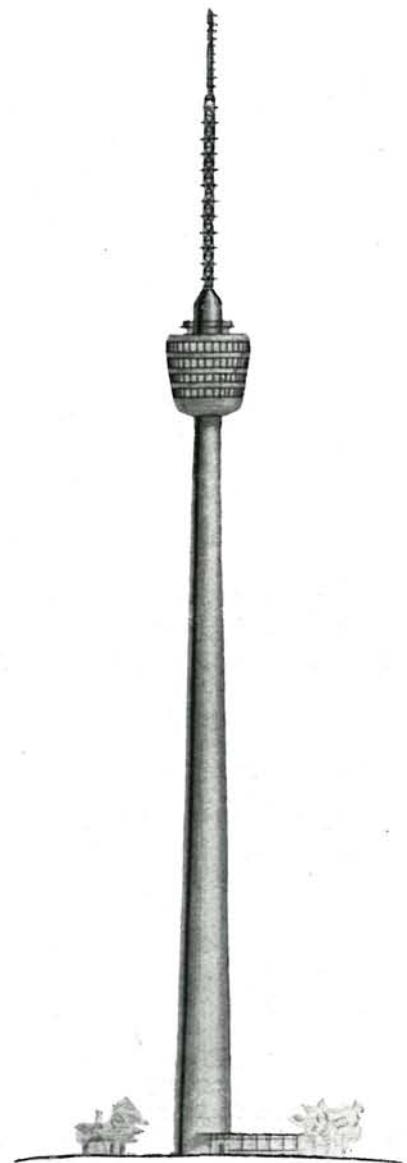
Para la determinación de las cargas que debían adoptarse respecto a la acción del tiempo se tuvieron en cuenta, no sólo las directivas actuales admitidas, sino una serie de publicaciones de especialistas y el consejo y aprobación de notables ingenieros de la Escuela de Stuttgart.

Se empezó estudiando las velocidades máximas del viento observadas en Alemania. La velocidad máxima resultó estar comprendida entre  $40$  y  $54 \text{ m/s}$ , mientras que la velocidad básica admitida fué de  $23$  a  $30 \text{ m/s}$ , es decir, el  $60$  por  $100$  de la máxima. Esta relación de velocidades es función de la altura sobre el mar, pues mientras las velocidades máximas no varían apenas con la altitud, las básicas aumentan con la altura. La aceleración máxima observada en las ráfagas es del tipo de  $7,5 \text{ m/s}^2$ . En la formación de ráfagas tienen gran influencia la topografía natural del terreno local y el encombramiento artificial (edificación, por ejemplo). En la zona montañosa de Stuttgart no son de temer los tornados.

La velocidad máxima admitida después de las consideraciones anteriores es de  $49 \text{ m/s}$ , o, lo que es igual,  $176 \text{ km/h}$ , a la que corresponde un efecto de  $150 \text{ kg/m}^2$ ; pero, debido a la gran superficie de la torre y los valores reducidos de la velocidad en las



al z a d o s



cercanías del suelo, se admitió una carga media, aplicable a toda la torre, de  $120 \text{ kg/m}^2$ , que corresponde a  $43,8 \text{ m/s}$ .

Se estudió también la posibilidad de aplicar, estáticamente, los valores máximos sobre toda la superficie de la torre o si, por el contrario, había que tener en cuenta un factor que afectaría al empuje o repetición consecutiva de efectos de ráfagas, sin olvidar la oscilación de la torre. Estas consideraciones demostraron que el viento da lugar a efectos desfavorables.

Como la torre es muy esbelta y tiene una cabeza relativamente pesada, oscila lentamente y acumula una gran cantidad relativa de energía al actuar las ráfagas con una gran aceleración y, además, ha de tenerse presente el peligro al balanceo ocasionado por la repetición continuada de la intermitencia de ráfagas. En este caso, se ha supuesto que la ráfaga máxima puede repetirse cada tres minutos y que la repetición coincide con el período de la oscilación.

Supuesta la torre rígida y trabajando a compresión, la constante elástica fué:

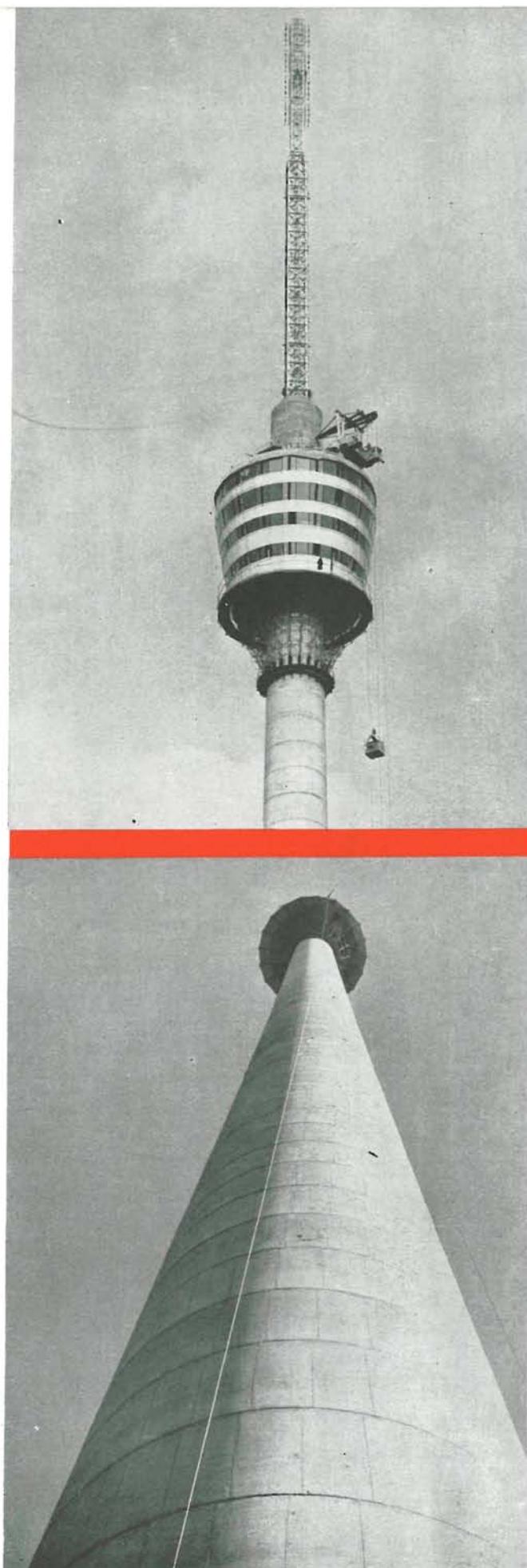
$$c = 103,1 \text{ t/m},$$

y el período, de 4,71 segundos. Si se tiene en cuenta la elasticidad de cimientos y terreno, el nuevo período calculado es de unos seis segundos; es decir, que la oscilación es muy lenta y, por tanto, desfavorable respecto a la repetición de ráfagas. Por otra parte, ha de tenerse en cuenta que la baja frecuencia evita las oscilaciones transversales.

Las oscilaciones transmitidas por el mástil de la antena carecen de importancia, pues su amplitud es pequeña respecto a la carga que da lugar el viento. Aunque en la oscilación lenta el efecto de ráfagas repetidas en fase es desfavorable, no es de temer en la torre un balanceo regulado en la dirección del viento, ya que las ráfagas actúan irregularmente y de acuerdo con las observaciones del mecanismo de la dinámica del viento. El coeficiente de amortiguamiento en las estructuras de hormigón, según Ehlers, es de 0,035, que, como se ve, es muy pequeño.

El aumento de empuje en una ráfaga depende de ésta y de la oscilación de la estructura sobre la que actúa. Si la velocidad básica de cálculo es de  $28,3 \text{ m/s}$ , que corresponde a  $50 \text{ kg/m}^2$ , y aumenta a una máxima de  $43,8 \text{ m/s}$ , afectando toda la torre en un tiempo de dos segundos, que corresponde a una aceleración de  $7,8 \text{ m/s}^2$ , el empuje en la torre, con un período aproximado de oscilación de seis segundos,

$$t' = 2s \text{ (tiempo necesario para el cambio de velocidad).}$$



$\omega t' = \pi/2$  y, por tanto,  $\omega = \frac{\pi}{4} = 0,785$  (frecuencia).

$\lambda = 1,048$  (frecuencia circular de la propia oscilación).

$\alpha = \omega/\lambda = 0,785/1,048 = 0,750$ , y una amplitud, según Föppl y Rausch, de:

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha^2 - 1} \sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha \operatorname{sen} \frac{\pi}{2\alpha}} =$$

$$= \frac{0,750}{0,437} \sqrt{1,562 - 1,5 \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3}} = 0,88,$$

será afectado al pasar de la carga inicial estática de  $50 \text{ kg/m}^2$  a  $70 \text{ kg/m}^2$  con el siguiente factor:

$$\varphi_{s,t} = \frac{50 + 70 \times 1,88}{50 + 70} = 1,51$$

Suponiendo que la segunda ráfaga máxima aparece a los 3 minutos, es decir, después de 30 oscilaciones o períodos, la amplitud restante será  $0,8\alpha$ , y el factor de repetición  $\varphi_w = 1,25$ .

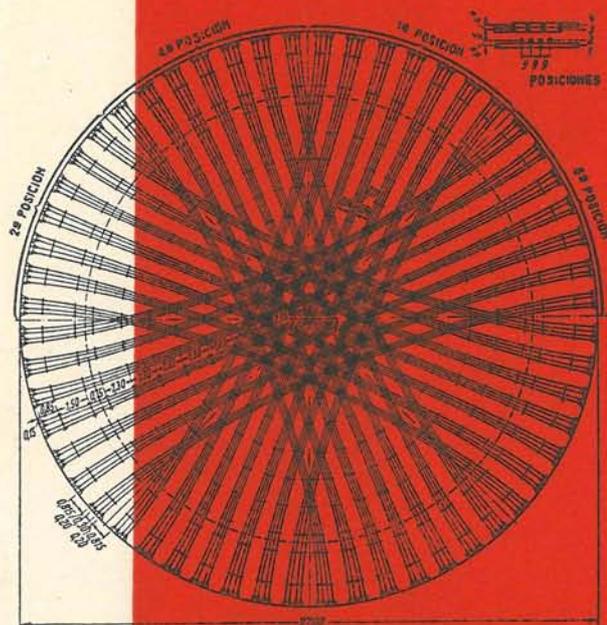
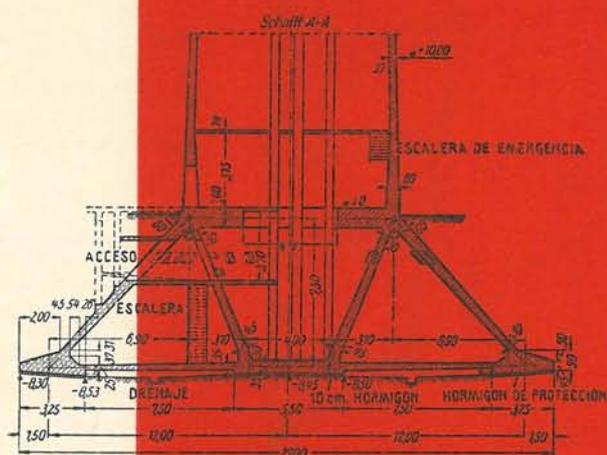
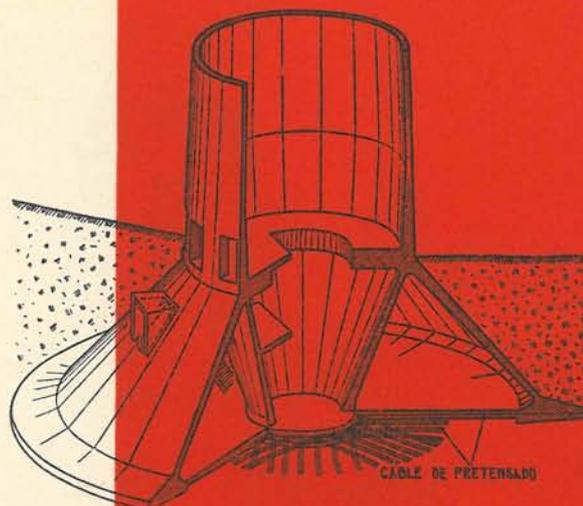
Teniendo en cuenta estos coeficientes adicionales, la fuerza total que da lugar el viento será, admitiendo una carga media de  $120 \text{ kg/m}^2$ ,

$$W = 1,51 \times 1,25 \times 120 c_w \times F = 228 c_w \times F,$$

donde  $c_w$  es un coeficiente de forma y  $F$  la superficie opuesta al viento.

Comparando este resultado con el correspondiente a chimeneas con períodos de oscilación de 1,5 a 2,5, en las que el factor de empuje  $\varphi_{s,t}$  varía de 1,1 a 1,2, y el de repetición, de 1,05 a 1,09, para llegar a una carga total por viento de  $130 \text{ a } 150 \times c_w \times F$ , que se corresponde con las Normas DIN-1056, se puede apreciar que en la torre se ha de emplear una carga por efecto del viento considerablemente mayor.

Como la torre tiene una forma lisa, sin aristas, el coeficiente  $c_w$  es relativamente bajo. En las superficies cilíndricas lisas este coeficiente baja a 0,30, valor que sólo se emplea en corrientes laminares; pero en el caso de la torre, la velocidad que se ha de considerar es elevada y da lugar a un régimen turbulento. En las chimeneas de fábrica de ladrillo con juntas de 2 mm de profundidad, Ackeret da 0,50 para  $c_w$  y 0,42 para juntas a tope y ladrillos esmaltados. Para chimeneas de fábrica ordinaria de ladrillo con un número elevado de Reynolds, el coeficiente  $c_w$ , según Flachsbarth, varía de 0,65 a 0,70, y en la fábrica de



cimentación



## edificio flotante

1. Escalera.—2. Ascensor.—3. Ventilación de la emisora.—4. Sala de transmisión.—5. Planta para cocina, acondicionamiento de aire y lavabos.—6. Restaurante.—7. Restaurante.—8. Escalera.—9. Terraza.—10. Mirador.—11. Sala de máquinas del ascensor.—12. Salida al mástil.—13. Mástil de la antena.—14. Señales para aviones.—15. Transformador.—16. Depósito de agua.—17. Ascensor.—18. Pantallas.—19. Canales de aire acondicionado.—20. Elementos prefabricados de metal ligero.—21. Radiadores.—22. Conductos de distribución de instalaciones y calefacción.—23. Transmisor de televisión.—24. Ventilación del transmisor de televisión.—25. Puertas en el fuste de hormigón.—26. Vigas de acero para maquinaria del ascensor.—27. Tubos de 76 mm de diámetro.

ladrillo plana es de 0,50. Como el zócalo de la torre se ha hormigonado con encofrado metálico, la superficie se puede comparar a la de una fábrica de ladrillo plana y con juntas completamente llenas y enrasadas.

La cabeza de la torre, formada con superficies lisas, redondeadas y cristales, presenta magníficas condiciones para reducir el coeficiente, de forma que, en la torre, se redujo a 0,50 en toda ella, valor que se juzgó prudente.

Teniendo en cuenta este valor, la carga por efecto del viento es de  $W = 0,114 \text{ t/m}^2$ . Según DIN-1055, debería aplicarse  $W = 0,091 \text{ t/m}^2$ . De acuerdo con las Normas para chimeneas DIN-1056, la carga sería de  $W = 0,140 \text{ t/m}^2$ . Esta última Norma no se exige en las estructuras de hormigón armado.

En el cálculo estático del mástil de la antena, la carga empleada fué, relativamente, mucho mayor, previendo una posible evolución de la técnica de antenas de televisión. El esfuerzo total admitido fué de 27 toneladas, que dió un momento en el pie del mástil de  $821 \text{ t} \times \text{m}$ , con un peso de 46 t para la antena.

En el gráfico de momentos que se acompaña se han representado los momentos principales y secundarios, así como la suma total de ellos; para esto se tuvo en cuenta el desplazamiento de la torre, provocado por el viento, y cargas laterales móviles, así como las deformaciones en el estado de equilibrio de la estructura. Al momento total de  $18,802 \text{ t} \times \text{m}$ , en el pie de la torre le corresponde un momento adicional de  $743 \text{ t} \times \text{m}$  como consecuencia de un desplazamiento de 1,68 m en la punta de la antena y 0,61 m en la plataforma de la cabeza de la torre; estos valores se han obtenido con los coeficientes de  $1,51 \times 1,25 \approx 1,9$  y  $120 \text{ kg/m}^2$ . Estas exigencias son conservadoras, pues es difícil se cumplan en la práctica, ya que, con una fuerte tormenta, el desplazamiento de la plataforma de la cabeza de la torre respecto al eje es de esperar que varíe de 20 a 25 centímetros.

La zona de emplazamiento de la torre se halla comprendida en una región sísmica, de potencia de 6 a 7 de las 12 que clasifica y subdivide la escala de Mercalli-Cancani-Sieberg. Esta potencia da una aceleración en el terreno

$$b = 0,10 \text{ a } 0,25 \text{ m/s}^2 ,$$

que puede dar lugar de 1 a 10 oscilaciones irregulares con periodos de 1 a 1/5 segundos. Como este sistema vibrante puede tener una frecuencia aproximada a la propia de la torre, a la amplitud aplicada en ésta se le da un valor cinco veces mayor.

$$\begin{aligned} \text{Si } \omega &= \frac{2\pi}{T} = 6,285^{-1}, \text{ tenemos } a_o = \\ &= \frac{b}{\omega \text{ sen } \omega t} = 0,032 \text{ m.} \end{aligned}$$

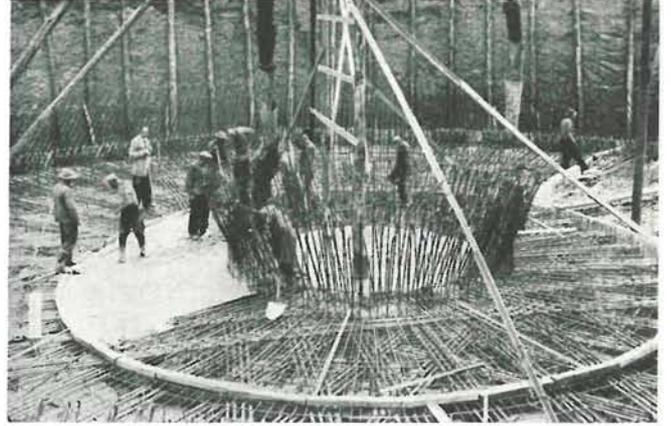
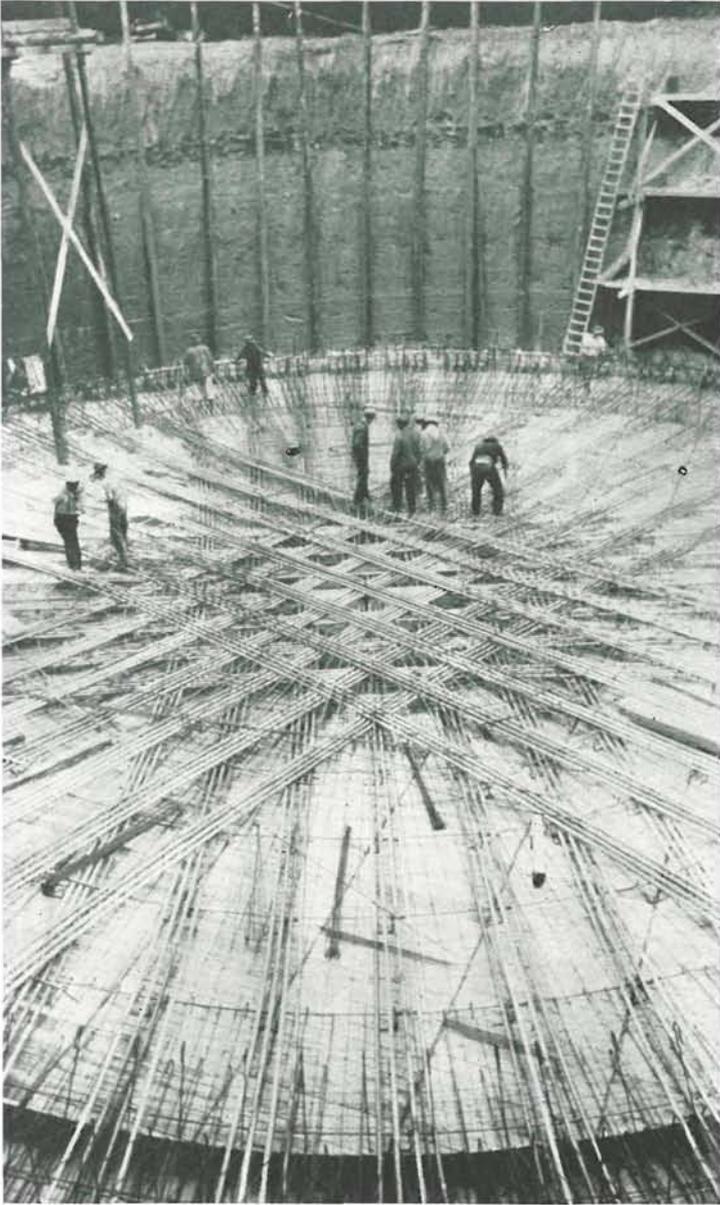
Tomando  $5a_o$ , los esfuerzos resultantes suelen ser casi los mismos que los que daría el tercio de la carga máxima total, pues ésta da casi el mismo desplazamiento del centro de gravedad de la torre, es decir, unos 16 cm. Como la carga máxima debida al viento y la que da lugar la vibración del terreno no coinciden apenas en fase y con la repetición de fenómenos, los efectos sísmicos se pueden considerar cubiertos por la acción que da lugar la carga por viento.

Las cargas se han detallado como sigue:

	Peso propio (en toneladas)	Sobrecarga (en toneladas)	
Obra muerta por encima del mirador ... ..	129	60,4	
Edificio flotante de cuatro plantas ... ..	510	314	
Carga total en la cota $\pm 20$ m ... ..	2.398	374	
Carga total en la cota $\pm 0,00$ ... ..	2.980	374	
Carga total en la base de cimientos, cota $- 8,4$ m ... ..	4.520	574	
Sobrecarga de tierra ...	2.940		
		7.460	574

Por tanto, las cargas verticales acumuladas dan 8.034 toneladas.

## cimentación



Montando las armaduras de los dos conos de la base.

Colocación de cables de pretensado.

Preparación del encofrado de cimientos.



## ejecución

Las características en cimientos son:

a) Anillo de cimiento, de 243 m<sup>2</sup> de superficie y 17.140 m<sup>4</sup> de momento de inercia.

b) Placa circular del núcleo, de 24 m<sup>2</sup> y 45 m<sup>4</sup> de momento de inercia.

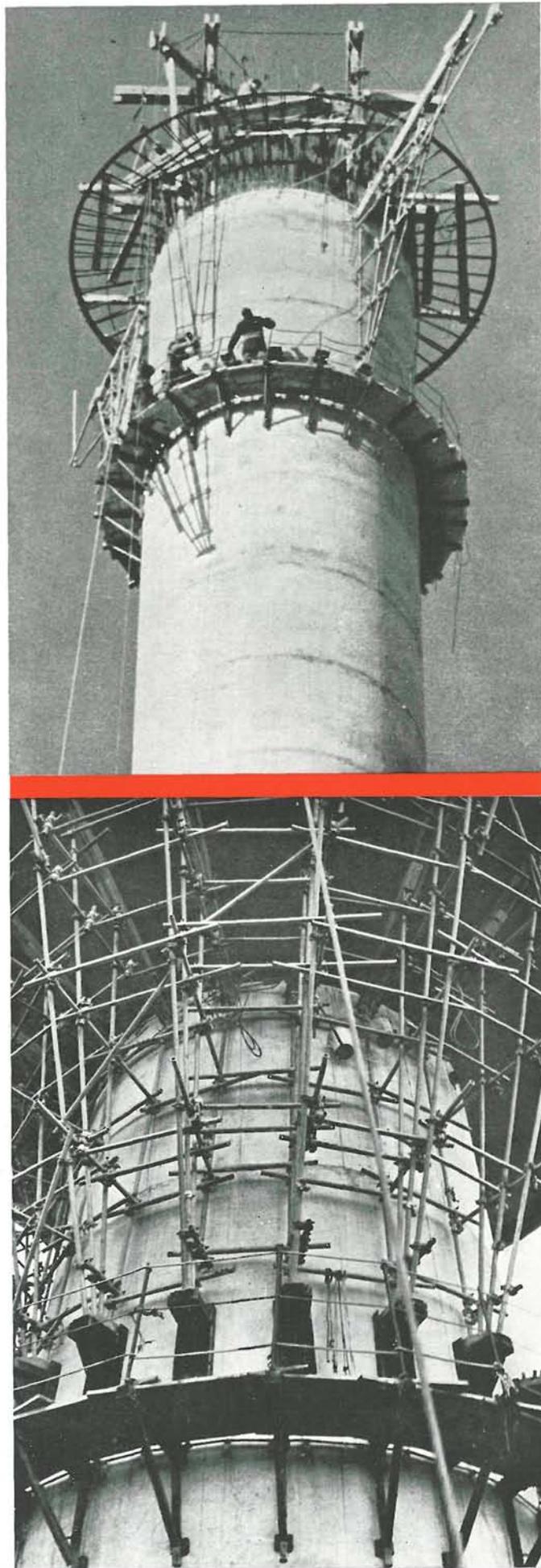
Suponiendo una distribución uniforme de las cargas verticales en cimientos, el suelo trabajará de 3,04 kg/cm<sup>2</sup>, valor que es inferior a los 3,60 kg/cm<sup>2</sup> que han admitido los geólogos. El momento máximo de 18,802 t × m da tensiones marginales de  $\pm 1,30$  kg/cm<sup>2</sup>. La compresión máxima en el borde resulta ser de 4,34 kg/cm<sup>2</sup>, que es menor que el valor admitido de 4,68 kg/cm<sup>2</sup>.

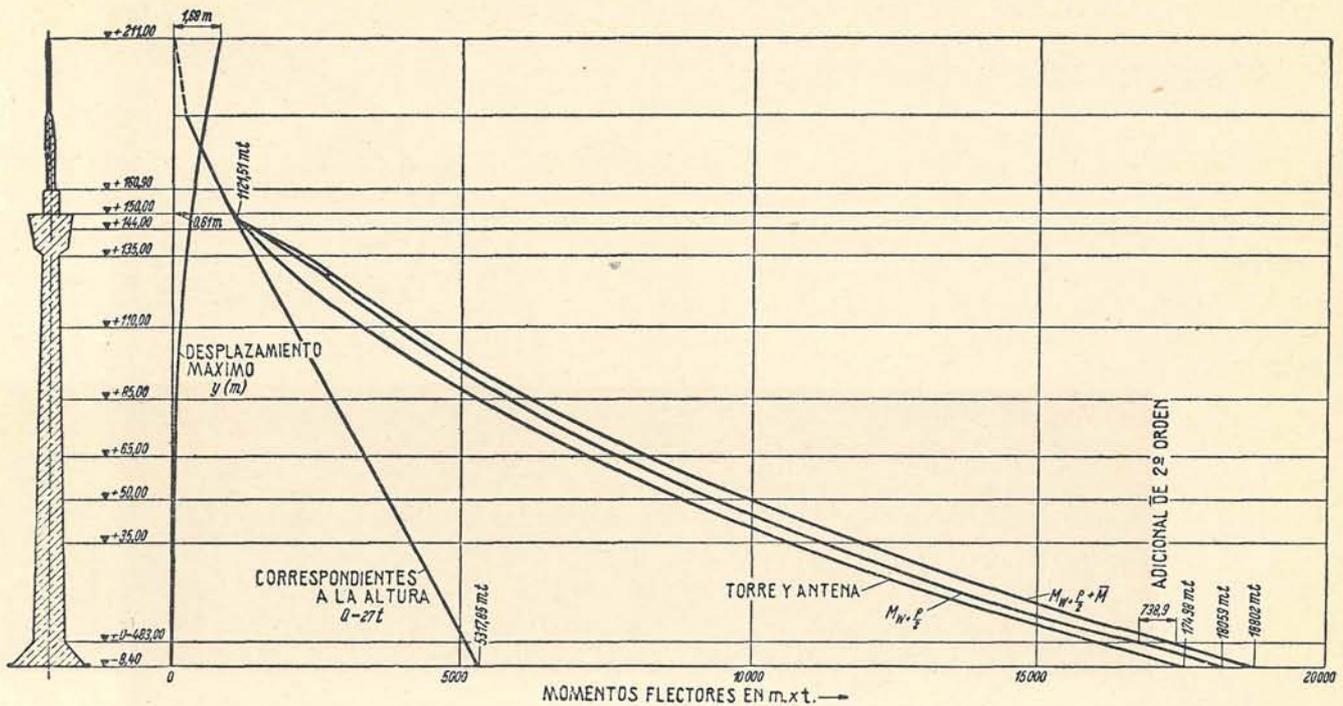
El cimiento se dimensionó de tal forma que, aun con momentos dobles, la resultante pasa siempre por el núcleo central. Para llegar al vuelco es necesario un momento cuádruple al calculado en el caso más desfavorable. Si no se tiene en cuenta la sobrecarga de tierra en el pie, la seguridad al vuelco da un coeficiente de 2, lo que permite una estabilidad de la torre sin relleno de tierra. La seguridad contra la rotura en cimientos, calculada bajo distintos supuestos, es de 8 a 14.

El cálculo estático del cuerpo troncocónico de cimientos presentó gran dificultad, ya que las paredes debían tener un gran espesor, pues no se podía dimensionar ateniéndose únicamente a los esfuerzos de la propia lámina envolvente. El ingeniero Pieckert, de Stuttgart, dió una solución notable al problema, que piensa publicar.

Es fácil darse cuenta del modo de comportarse de los dos elementos troncocónicos de la cimentación si observamos las deformaciones del elemento cónico exterior, debidas al efecto del viento, sin tener en cuenta el elemento interior (ver esquema adjunto). Se puede ver que el tronco de cono interior se halla sometido a fuerzas de compresión y tracción; además, que la unión de la base inferior del tronco con sus esfuerzos horizontales transmitidos al anillo de la placa de cimiento sirve de estabilizador.

Fotos: DORIS ECKARD y LEONARD WETT





## gráfico de momentos

Para una unión articulada entre la pared del cono interior y el anillo horizontal del cimiento, el cálculo de las fuerzas verticales en la lámina hubiera resultado relativamente fácil. Como los grandes esfuerzos en esta zona requerían un gran espesor de hormigón, se determinaron con la mayor exactitud posible los momentos en el borde. El resultado fué el dotar esta parte con una armadura fuerte y reforzar la unión con un espesor de hormigón de 60 centímetros.

El anillo de la base de cimiento se pretensó radialmente, a razón de 141 t por metro de circunferencia, y dió lugar a un esfuerzo cortante en el anillo de, aproximadamente, 21 kg/cm<sup>2</sup>, suponiendo el cimiento sometido al peso propio de la torre únicamente. El pretensado se ha dispuesto de manera que se eviten las tracciones, incluso con plena carga por viento.

La pared del tronco de cono exterior ha de absorber, además, la compresión que crea el relleno que se halla sobre ella.

La parte inferior de la torre se armó con barras verticales, que se admitía trabajasen a 2.400 kg/cm<sup>2</sup> a tracción. Pero un cálculo posterior tuvo en cuenta, a pesar de esta gran tracción, que aparecerían momentos debidos al viento 2,5 veces mayores que debía

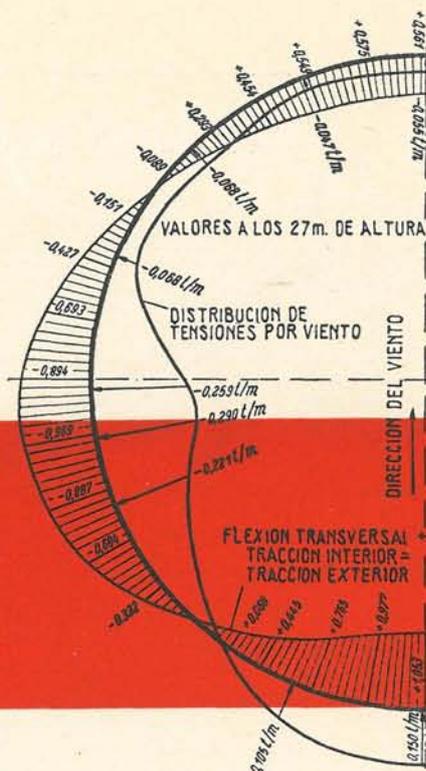
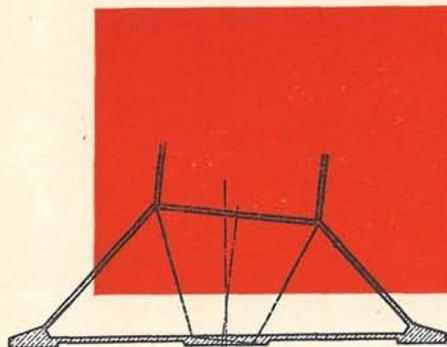
absorber el hormigón armado con acero de límite elástico de 4.200 kg/cm<sup>2</sup>. Estos momentos podían absorberse con un número suficiente de armaduras, consiguiendo así un coeficiente de seguridad de 2,5.

Considerando únicamente el peso propio, el hormigón de la torre trabaja a 29 kg/cm<sup>2</sup>. La suma del momento principal y secundario da una carga media de tensión en flexión de  $\pm 70$  kg/cm<sup>2</sup>, teniendo en cuenta el peso propio, viento y momentos secundarios que se derivan. Esto quiere decir que, considerando el estado indicado de cargas, el hormigón trabajará como máximo a 40 kg/cm<sup>2</sup> en tracción.

Dadas las buenas cualidades del hormigón previsto para esta obra, se le puede atribuir una resistencia a tracción, en dirección vertical, de unos 50 kg/cm<sup>2</sup>, pues este material endurece bajo una ligera compresión constante, y, dado el reducido espesor de pared, no son de esperar grandes tracciones por retracción y diferencias de temperatura. Todo esto, unido al efecto de pretensado que introduce la deformación lenta en las armaduras, induce a pensar que, aun en las grandes tormentas, estas armaduras apenas experimentarán tracciones. Este análisis demuestra que sería impropio pretensar una torre de este tipo, ya que los momentos medios de máximos dan una tracción aproximada de 6 kg/cm<sup>2</sup> en el hormigón.

Distribución de momentos de flexión transversal.

Deformación en la base de no existir una unión fija de la parte inferior del cono interior.



La mayor tensión de compresión, teniendo en cuenta las tracciones es de 108 a 111 kg/cm<sup>2</sup> en, prácticamente, todas las secciones y contando con el estado real de carga y sobrecargas de toda clase. En el cálculo se ha admitido el valor de 15 para la relación entre módulos de elasticidad de los dos materiales.

Los momentos transversales de flexión se han calculado con una carga por viento de 150 kg/m<sup>2</sup>, un coeficiente de forma de 0,5 y la distribución de compresiones según la Norma DIN-1055, hoja 4. El adjunto gráfico da estos momentos con valores límites de +1,05 a -0,97 t × m en una sección situada a 27 metros de altura. Estos momentos transversales requieren una armadura de 2 cm<sup>2</sup> de sección por metro. Calculando con la sola carga propia, viento y momentos secundarios derivados, aparecen tensiones de ± 7,50 kg/cm<sup>2</sup> en el hormigón, por lo que, aun siendo bajas, se dispuso una armadura exterior y otra interior. Estas armaduras están constituidas por dos anillos en cada una de ellas. Las armaduras interiores se han recubierto con una buena capa de hormigón, que se extiende desde las armaduras verticales al paramento interior, para que, al aparecer las tracciones, no se puedan tender a enderezarse las armaduras interiores o anillos. Con esta disposición, basta para contrarrestar el efecto de las tracciones transversales de flexión, ya que éstas son relativamente pequeñas.

El voladizo de la parte inferior del edificio flotante se calculó, cuidadosamente, como una caja circular sometida a torsión. Esta caja está formada por un anillo plano y las paredes de un tronco de cono que se une a la torre y al anillo rigidamente, condición esta necesaria, principalmente, para el cálculo de momentos flectores respecto al viento y cargas móviles en las partes de la torre afectadas por la caja de torsión, así como para la propia seguridad de la cabeza de la torre. El resto del edificio flotante no presentó dificultades de tipo estático.

La debilitación por los huecos de las puertas de los ascensores en la pared de la torre que se extiende en la zona del edificio, se calculó simulando los huecos de las puertas a un pórtico de dos tramos, sometido a esfuerzos transversales, en el que se debía obtener una rigidez similar a la que daría un trozo de pared llena de la torre a la misma altura. El análisis de esta cuestión dió por resultado dar un espesor de 35 cm a las zonas próximas a las puertas, en lugar de los 18 cm que corresponde a la pared normal en esta parte; pero teniendo en cuenta que sólo 2 cm de espesor serían suficientes para hacer frente al esfuerzo transversal, se desprende que la parte de pared no debilitada absorberá la mayor parte del esfuerzo transversal. Las zambas y dinteles de las puertas se armaron convenientemente para resistir a los efectos de momentos y esfuerzo transversal.

J. J. U.