Informes de la Construcción Vol. 23, nº 225
Noviembre de 1970

la torre de telecomunicación de Hamburgo

ALEMANIA

proyecto: Prof. F. TRAUTWEIN, Prof. F. LEONHARDT y Dipl. Ing. R. BEHN

504-5

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

sinopsis

Este artículo describe, con precisión y minuciosidad, las características de proyecto y constructivas de tan importante obra de ingeniería, así como los detalles de su ejecución y montaje, con ilustración de numerosos planos y fotografías.

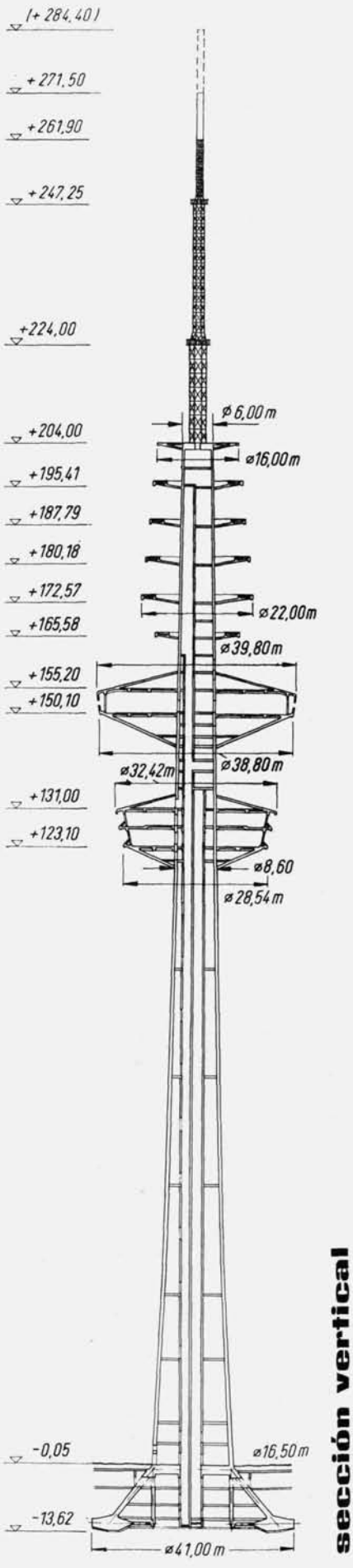
Historia de su creación

Para las transmisiones a larga distancia, los correos federales alemanes utilizan en el servicio de telecomunicación, además de los cables, instalaciones de radiotransmisión dirigida. Condición indispensable para un radioenlace dirigido es la visibilidad sin obstáculos entre los puntos de la radiotransmisión dirigida. En las grandes ciudades, debido a las construcciones elevadas que interrumpen la línea de visibilidad, se obtiene este enlace, visible únicamente con ayuda de altas torres como portaantenas.

En los primeros años después de la guerra, la Dirección General de Correos de Hamburgo tuvo que montar sus antenas encima del refugio elevado del campo del Espíritu Santo, reformándose para locales de servicio algunos recintos del refugio y edificaciones complementarias. Las posibilidades que aquí se daban no bastaban ya, ni con mucho, a satisfacer las cada vez mayores exigencias. La creciente altura de las construcciones urbanas aumentaba cada día más el peligro de que se interrumpieran los enlaces de visibilidad a los puntos de relés siguientes, peligro al que no podía exponerse Hamburgo como importante nudo de comunicaciones para transmisiones a larga distancia, sobre todo a los países escandinavos.

Iguales y parecidas reflexiones se hicieron también en lo referente a las instalaciones de radiotransmisión dirigida de la comunicación regional, es decir, de la radiotelefonía automóvil pública para la transmisión de conferencias interurbanas a buques y vehículos terrestres. Como quiera que los correos federales son también competentes para la irradiación del segundo y tercer programa de televisión, resultaba rentable el aprovechar los puntos de radiotransmisión dirigida también como emplazamiento de las emisoras de televisión y de las antenas previstas para las mismas, ya que, cuanto más elevado y céntrico es el emplazamiento de las antenas, tanto mejor y más lejana es la recepción. Como consecuencia de todas estas reflexiones, la Dirección General de Correos de Hamburgo se vio obligada a gestionar con energía el planeamiento de una torre de telecomunicaciones.

El programa para su construcción incluía determinadas exigencias técnicas: preveía una superficie de locales de servicio, de 1.000 m² en números redondos, con cuatro grandes plataformas superpuestas de aproximadamente 20 m ⌀ para la colo-



sección vertical

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

cación de gran número de antenas de radiotransmisión dirigida; sobre las plataformas había que disponer de un portaantenas de unos 70 m de altura para la colocación de antenas destinadas a la radiotelefonía automóvil pública, y encima, para las antenas de televisión del segundo y tercer programa. Después de prolongadas negociaciones se fijó en unos 280 m la altura total de la torre, con el fin de no sobrepasar la altura máxima autorizada, de 300 m del nivel del mar, teniendo en cuenta la seguridad de vuelo, ya que el terreno elegido se halla a unos 20 m sobre el nivel del mar en el puerto.

De acuerdo con la ciudad hanseática y libre de Hamburgo se eligió, como emplazamiento de la torre, un terreno al norte del recinto de la exposición «Plantas y Flores», debido, por una parte, a que ya no se autorizaba a seguir construyendo en el campo del Espíritu Santo —muy favorablemente situado— y, por otra, a la proximidad del parque de la exposición —que ofrecía buenas perspectivas para el aprovechamiento rentable de un restaurante de torre, que la ciudad ansiaba—.

La sección de obras de la Dirección General de Correos, bajo la dirección del actual Presidente de Sección, Dipl. Ing. Barthel, y del Ingeniero Jefe de Correos, Böhm, como ponentes, expuso las condiciones de la obra en varios croquis y modelos. Como Ingeniero Asesor se nombró al Profesor F. Leonhardt, por sus experiencias en la construcción de otras torres.

En íntima colaboración con el Organismo de construcciones de la ciudad hanseática, bajo el, en aquel tiempo, Director Jefe, Prof. Hebebrandt, y el Director del Negociado de Planeamiento Regional, primer Director de Construcciones, Dr. Ing. Speckter, se decidió, teniendo en cuenta la gran importancia urbanística de la torre, con su emplazamiento en el centro cívico de la ciudad, efectuar un dictamen de expertos, en el que participaron cinco de los arquitectos domiciliados en Hamburgo, con objeto de determinar emplazamiento y forma de la torre.

La valoración común de las opiniones periciales llevadas a cabo por los técnicos de los correos federales alemanes y del negociado de construcciones de la ciudad hanseática libre de Hamburgo, dio por resultado el que la solución más favorable, desde todos los puntos de vista, fuera la proposición del Prof. F. Trautwein, el cual había dispuesto la superficie necesaria para el local de servicios en una planta de 40 m de diámetro, y el restaurante, con plataforma panorámica, en un cuerpo especial colocado debajo. Para el núcleo de la torre se man-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

tuvo como solución técnica más favorable el tubo circular de hormigón armado.

El Prof. Trautwein se preocupó principalmente de la adaptación urbanística favorable de la torre al recinto de la exposición «Plantas y Flores», la cual se llevó a efecto después de prolongadas negociaciones con la ciudad de Hamburgo y con la que se consigue, asimismo, sanear y aumentar el valor de esta zona.

La Dirección General de Correos de Hamburgo confirió el estudio ulterior del planeamiento al experto Prof. Fritz Trautwein, quien admitió a su colaborador el arquitecto Dipl. Ing. R. Behn en una comunidad de trabajo con el Prof. Fritz Leonhardt. La estructura se le encargó al Prof. Leonhardt. En íntima colaboración con la sección de obras de la Dirección General de Correos de Hamburgo, bajo la dirección del Presidente de Sección, Dipl. Ing. Barthel, del Ingeniero Jefe de Correos, Dipl. Ing. Hock, y del Jefe de Correos (Superior) Dipl. Ing. Stegmeyer, se pudo constituir un buen equipo de trabajo, en el que intervinieron arquitectos e ingenieros de los correos federales alemanes.

Se encomendó la ejecución de la obra a la firma Wayss & Freytag KG, sucursal de Hamburgo. El restaurante e instalaciones anejas al pie de la torre se contrataron a la sociedad Kroepels & Jarchow KG, de restaurantes de torres de televisión.

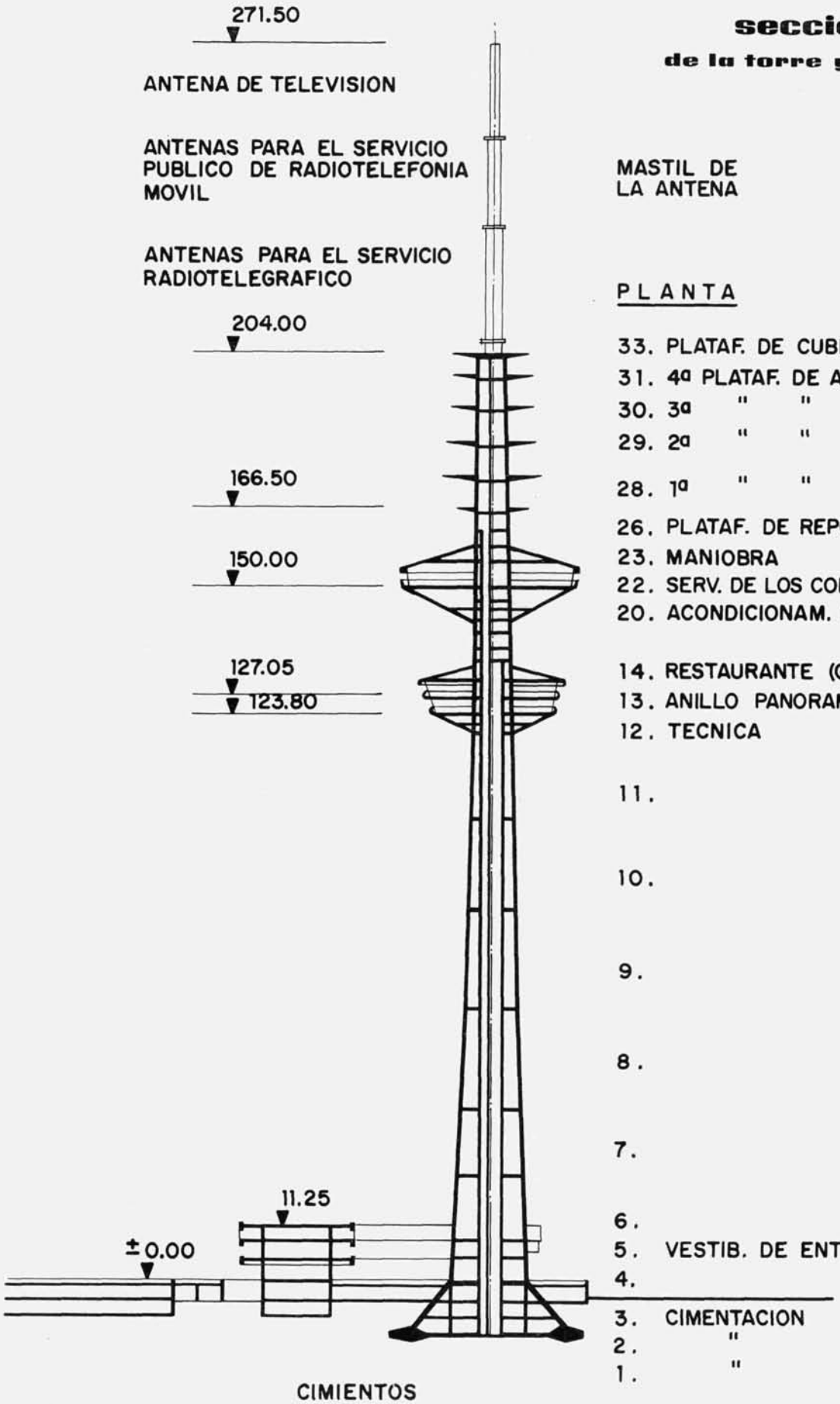
En abril de 1965 pudo iniciarse la obra. Fueron de decisiva ayuda los dictámenes periciales de la Dirección General de Correos y la ciudad hanseática y libre de Hamburgo, gracias a los cuales se llegó a una forma caprichosa que confiere a la torre de Hamburgo su fisonomía propia. Es de celebrar que esta forma haya sido aceptada por los hamburgueses en general.

Descripción general

El núcleo de hormigón armado tiene una altura de 204 m. El diámetro de la base es de 16,5 m, el cual va disminuyendo hasta los 119 m de altura. Igual que en la torre de Hannóver, resultó conveniente agrupar los locales de servicios en una planta inmediata a las plataformas de las antenas. En el restaurante, el suficiente tamaño de la planta aligeraba las instalaciones. Las cabezas, en amplio voladizo, debían de construirse a base de superficies cónicas y, como quiera que en los locales no se deseaban soportes, se ofrecieron estas cubiertas de lámina como solución económica también para

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

sección vertical
de la torre y cuerpo bajo

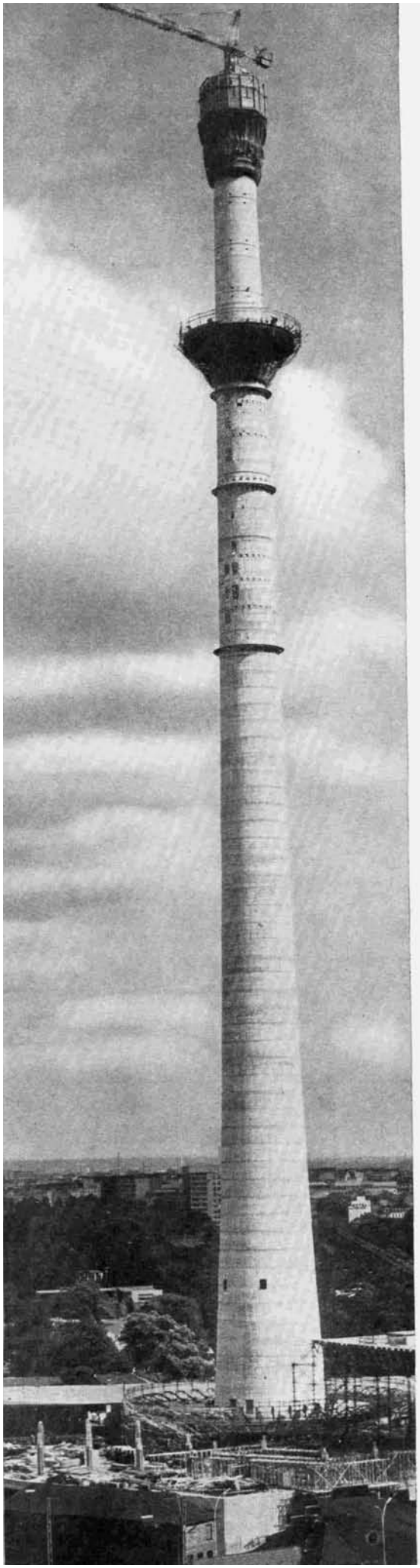


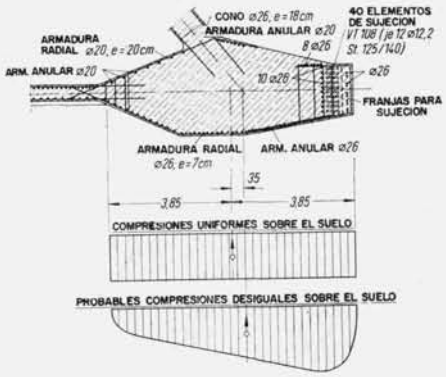
MASTIL DE LA ANTENA

PLANTA

33. PLATAF. DE CUBIERTA
31. 4ª PLATAF. DE ANTENAS
30. 3ª " " "
29. 2ª " " "
28. 1ª " " "
26. PLATAF. DE REPORTAJE
23. MANIOBRA
22. SERV. DE LOS CORREOS FED. ALEM.
20. ACONDICIONAM. DE AIRE
14. RESTAURANTE (GIRATORIO)
13. ANILLO PANORAM. CON BAR
12. TECNICA
11.
10.
9.
8.
7.
6.
5. VESTIB. DE ENTRADA
4.
3. CIMENTACION
2. "
1. "

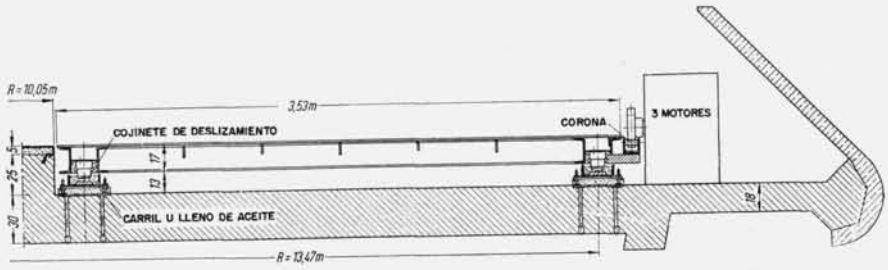
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



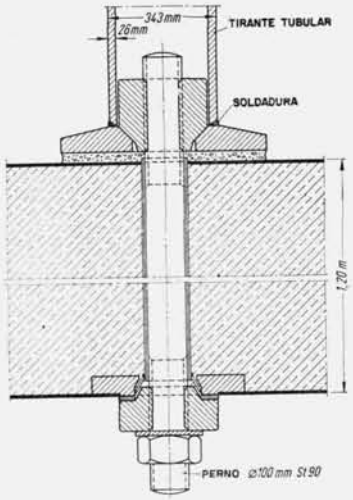


Anillo de cimentación con sus armaduras, y gráficos previstos de compresión del terreno.

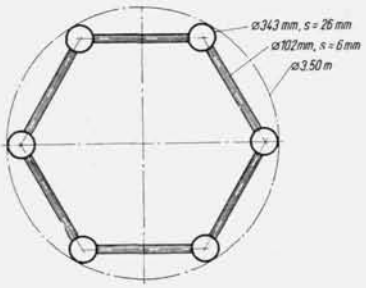
Sección, por el anillo giratorio, en la cabeza del restaurante.



Anclaje del mástil de las antenas en la placa de hormigón del soporte.



Sección transversal de la sección inferior del mástil de las antenas.



los tejados. A 127 m de altura, la cabeza del restaurante tiene un diámetro de 32,4 m; aloja una planta panorámica y de restaurante; en los huecos de las cubiertas de sección triangular se distribuyen las instalaciones de acondicionamiento de aire y otras.

La cabeza de los Servicios de Correos se encuentra a 150 m de altura, con 39,8 m de diámetro exterior y un único gran local de servicios con 1.000 m² de superficie útil, aproximadamente.

En los huecos de la cubierta, bajo la planta de servicios, se alojan instalaciones de acondicionamiento de aire; encima va una planta distribuidora para los guía-ondas, a fin de llevar éstos desde allí por el camino más corto a lo largo del núcleo hacia lo alto de las antenas. Para estas últimas se dispone de cinco plataformas circulares, con diámetros entre 16,5 y 22 m y con 300 m de perímetro en total. La plataforma superior, que se halla a 204 m de altura, soporta un aparato elevador, con el que se izan las antenas desde el suelo a las plataformas a lo largo de un cable inclinado.

Sobre el núcleo de hormigón armado va un mástil de celosía de acero, de 57,9 m de alto, sobre el que han de montarse todavía antenas cilíndricas autosustentantes, de 9,6 m de alto o bien de 22,5 m de altura, en la última etapa de la construcción. La torre alcanza así una altura total de 271,5 m y, más adelante, de 284,4 m.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

La estructura de sustentación

La cimentación

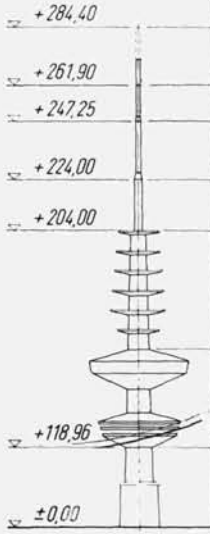
Las cargas de la torre se transmiten a la cimentación a través de un círculo que forma la base del núcleo, el cual se une a la cimentación anular constituyendo una estructura de sustentación compuesta de placas circulares.

La placa circular superior requiere su espesor, de 1,8 m, no solamente para desviar las cargas verticales del núcleo, sino también porque en su borde interior soporta la caja del ascensor, de 210 m de altura, y de ella cuelga también el resto inferior de dicha caja del ascensor. Los forjados intermedios no están incluidos entre las partes sustentantes de la cimentación.

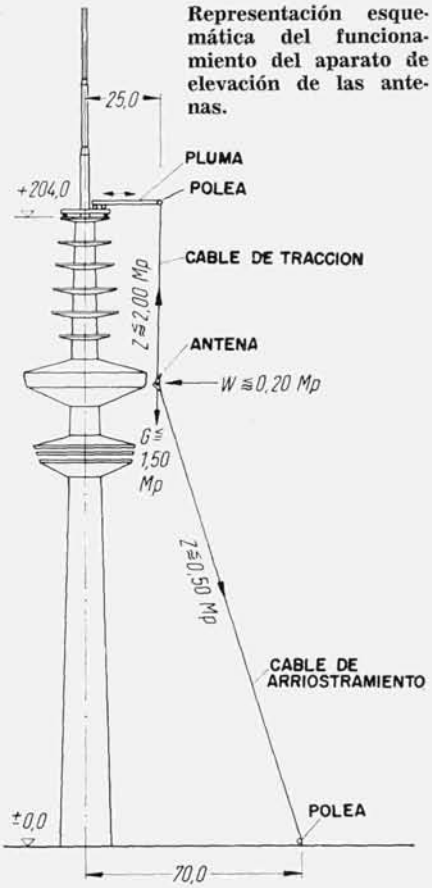
Para cargas exclusivamente verticales del núcleo, de 17.500 Mp del peso propio, hasta el borde superior de la cimentación, y 2.900 Mp de sobrecarga, hubiera podido prescindirse del refuerzo interior de la cimentación. Bajo el efecto del momento de viento, de 95.000 Mp · m en la unión con el suelo, la placa cónica hubiera

TABLA I. Coeficientes de resistencia del viento C_w, según los ensayos en el túnel aerodinámico

Superficie de referencia F = Superficie de proyección de la torre y mástil sin estar las antenas colocadas



SECCION	SUPERF. DE REFERENCIA (m^2)	COEFIC. DE RESIST. C_w SIN ANTENAS	COEFIC. DE RESIST. C_w CON ANTENAS COLOCADAS
ANTENA Ø=1,5m CILINDRICA	33,8	0,5 (HIPOTESIS)	
Ø=1,4m	20,5		
MASTIL DE Ø=2,0m CELOSIA	46,5	0,8 VEASE TABLA II	1,1
Ø=3,5m	70,0		
PLATAFORMAS DE LAS ANTENAS	366	0,65	1,50
CABEZA DE SERVICIOS RESTAURANTE	840	0,71	
NUCLEO	1370	0,5 (HIPOTESIS OPTIMA 0.6-07)	



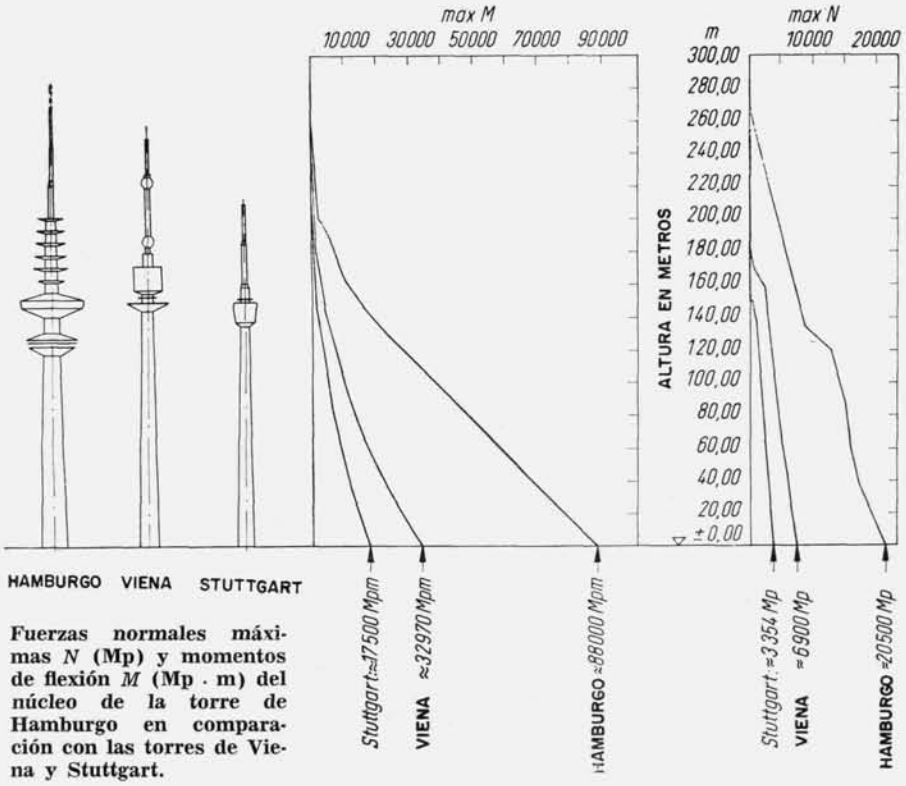
Representación esquemática del funcionamiento del aparato de elevación de las antenas.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

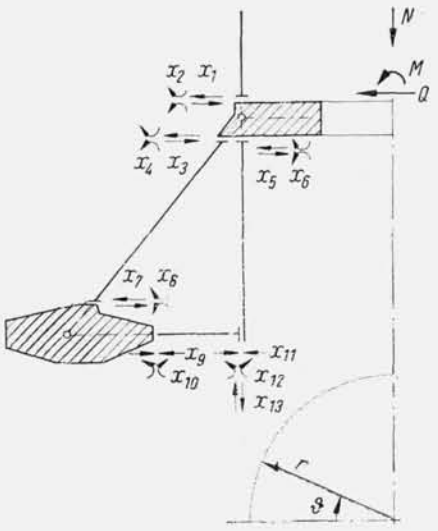
TABLA II. Coeficientes de resistencia del viento C_w de un mástil hexagonal de celosía tubular con diámetro exterior D y de un núcleo cilíndrico con antenas colocadas, según pruebas en el túnel aerodinámico

Resistencia del viento $W = C_w \cdot q \cdot D \cdot \lambda$.
$D \geqslant 1{,}0$ m: $\lambda = 1{,}0$.
$D < 1{,}0$ m: λ (ver tabla).

ESTRUCTURA DEL MASTIL			C_w	λ PARA $D<1{,}0$m
MASTIL EXAGONAL DE CELOSIA TUBULAR CORRESPONDIENTE A LA FIG. 14	SIN OCUPACION O CON TAPONAMIENTO INTERIOR POR CABLES		0,8	1,2
	CON OCUPACION EXTERIOR ADICIONAL POR ANTENAS DE DOS CAMPOS O GRUPOS DE IRRADIADORES O CUBIERTAS ANTIHIELO		1,1	1,1
MASTIL CILINDRICO (NUCLEO DE HORMIGON ARMADO) CON OCUPACION EXTERIOR POR GRUPOS DE IRRADIADORES			0,8	1,0



Fuerzas normales máximas N (Mp) y momentos de flexión M (Mp · m) del núcleo de la torre de Hamburgo en comparación con las torres de Viena y Stuttgart.



Sistema básico para el cálculo de la cimentación con arreglo al método de magnitudes de fuerza.

Carga simétrica rotativa N. Sistema básico determinado estáticamente:

$$X_i = n_r = \text{const.} \quad i = 1, 3, 5, \ldots, 11$$
$$X_k = m = \text{const.} \quad k = 2, 4, 6, \ldots, 12$$
$$X_{13} = q = \text{const.}$$

Carga antimétrica M, Q. Sistema básico:

$$X_i : n_r \cdot \cos\theta \quad \text{y} \quad -\bar{n}_{r,\vartheta} \cdot \operatorname{sen}\theta \qquad i = 1, 3, 5, \ldots, 11$$
$$X_k : \bar{m} \cdot \cos\theta \quad \text{y} \quad -m/r \cdot \cos\theta \qquad k = 2, 4, 6, \ldots, 12$$
$$X_{13} = \bar{q} \cdot \cos\theta$$

sufrido deformaciones considerables, cosa que impide la placa cilíndrica interior, unida por otra horizontal al anillo de la cimentación.

Las acciones sobre el suelo, debajo del anillo de cimentación, como consecuencia del momento de viento máximo calculado, son de $\pm 1{,}6$ kp/cm², resultando pequeñas en comparación con las producidas por las cargas verticales, que son de 5,2 kp/cm². Esta relación favorable hay que atribuirla al gran diámetro del núcleo de la cimentación circular. Las torsiones en la cimentación debidas al viento y las desviaciones de la dirección de las antenas resultan así muy pequeñas.

Según un dictamen del Dr. Ingeniero Steinfeld, de Hamburgo, el subsuelo existente debajo de la cimentación, 8 a 9 m de arena y material de acarreo glacial, permitía las altas presiones mencionadas.

Los esfuerzos de tracción del anillo de cimentación son de hasta 5.270 Mp, que se absorbieron con cuarenta elementos pretensados de 108 Mp de fuerza tensora cada uno. La protección anticorrosiva era aquí importante, ya que el agua subterránea de Hamburgo es agresiva y puede subir 2 m por encima del fondo de la cimentación.

Para el anillo de cimentación se necesitaron aproximadamente 1.800 m³ de hormigón fabricado con cemento de bajo calor de fraguado y gran densidad, obtenido con granulometría discontinua y adición de trass. A los 3 días del hormigonado se colocó parte del pretensado del anillo para evitar grietas debidas a la temperatura.

Núcleo

El núcleo, de hormigón armado, tiene, hasta la base de la cabeza del restaurante, un espesor de pared medio de 60 a 65 cm, con un diámetro exterior que va disminuyendo linealmente de 16,5 a 8,6 m; a los 204 m, el espesor de pared es de 30 cm, y el diámetro exterior, de 6 m.

El porcentaje medio de armadura vertical es del 2 % de la su-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

En la sección transversal crítica del núcleo: $H = +80$ m.
Diámetro exterior: $\varnothing a = 10$ m.
Espesor de pared: $d = 65$ cm.
Armadura: $\mu = 2{,}2\ \%$.

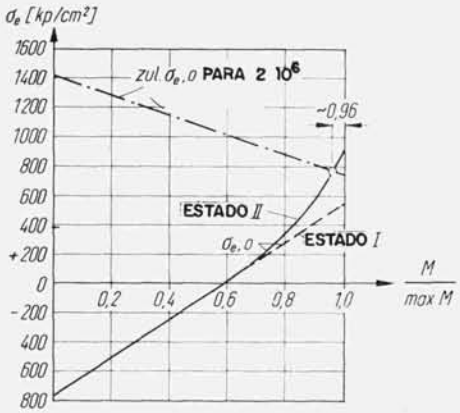
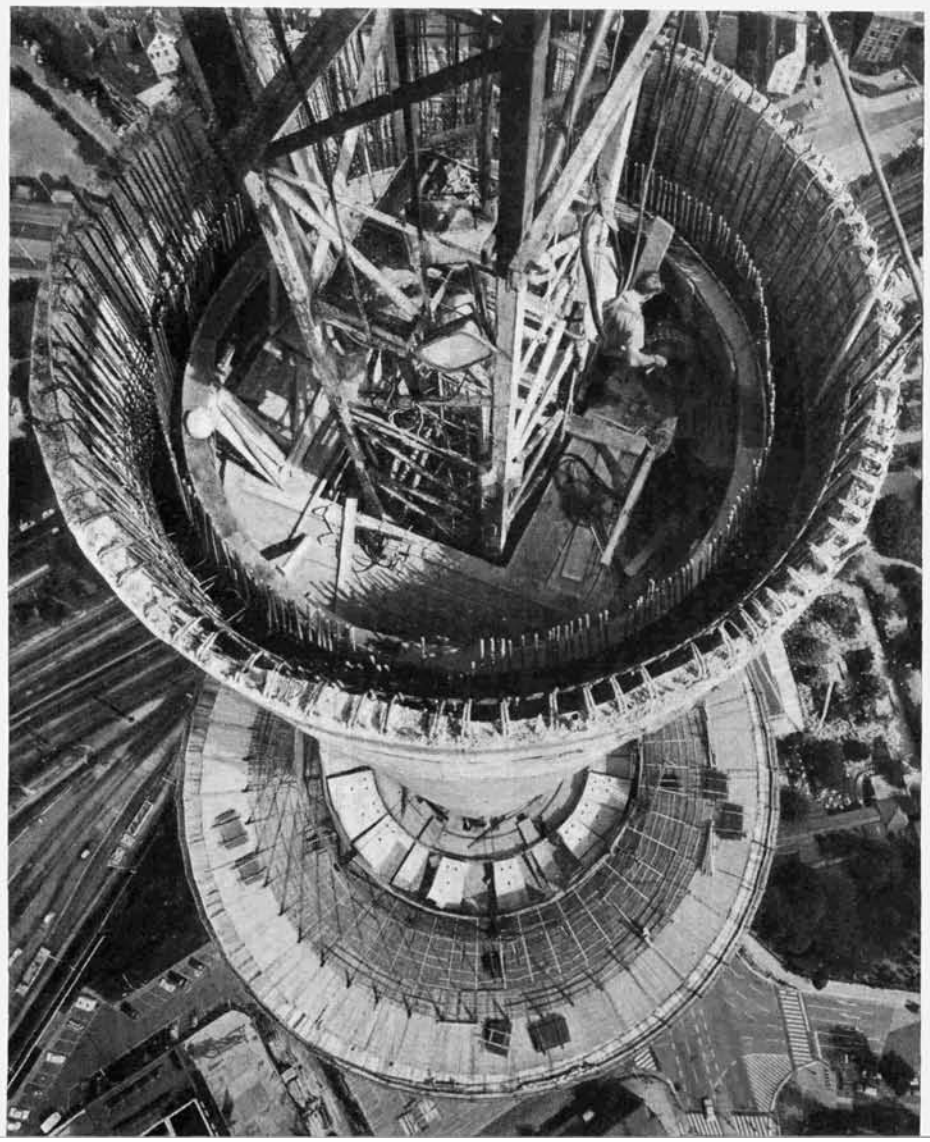


TABLA III. σ_b **y** σ_e **máximos y mínimos (kp/cm²) como consecuencia de** $N = 13.100$ **Mp y** $0 \leqslant M \leqslant$ **máx.** $M = 48.600$ **Mp · m. Amplitud de vibración** σ_A **de la armadura vertical y tensión superior correspondiente admitida** $\sigma_{e,o}$ **de acero nervado para armaduras de hormigón St. III con** 2×10^6 **cambios de carga.**

N / max N	M / max M	ESTADO I: σ_b min	σ_b max	$\sigma_e = n \cdot \sigma_b$ min σ_e = $\sigma_{e,u}$	max σ_e = $\sigma_{e,o}$	$\lvert\sigma_A\rvert$ = $\lvert\sigma_{e,u}-\sigma_{e,o}\rvert$	$2 \cdot 10^6$ CAMBIO DE CARGA zul. $\sigma_{e,o}$	ESTADO II: $n \cdot \sigma_b$ = min σ_e = $\sigma_{e,u}$	max σ_e = $\sigma_{e,o}$	$\lvert\sigma_A\rvert$	$2 \cdot 10^6$ CAMBIO DE CARGA zul. $\sigma_{e,o}$
1,0 = const	0	-51,5		-772		0	(+1420)				
	0,2	-69,0	-34,0	-1035	-510	525	+1280				
	0,4	-86,4	-16,6	-1296	-249	1047	+1140				
	0,6	-103,9	+0,9	-1558	+14	1572	+1030	(-103,4)	(-1558)	(+14)	(1572)	(+1030)
	0,8	-121,3	+18,3	-1820	+275	2095	+880	-122	-1830	+333	2118	+870
	1,0	-138,7	+35,7	-2081	+535	2616	+750	-140	-2100	+882	2982	+740

perficie de la sección del núcleo; aproximadamente los 2/3 se disponen en la parte exterior del núcleo y 1/3 en la parte interior. Esta armadura se halla sometida, sobre todo, a esfuerzos de compresión, y únicamente en caso de huracanes sufre tracciones.

En la torre de Hamburgo se colocaron varillas de armadura de 12 m de longitud, con las juntas de las varillas exteriores oxisoldadas. La parte interior del núcleo sí permitía juntas, aseguradas con una pequeña espiral. En las juntas de imbricado de la armadura del aro en la parte exterior del núcleo, que se halla allí fuera de la armadura vertical, no obstante ser las varillas nervadas, se doblaron hacia adentro los extremos de las varillas o bien se les proveyó de ganchos angulares. A causa de las fuerzas de inversión dirigidas hacia el interior, la armadura interior del aro se halla en la parte de dentro de las varillas verticales. Para una mayor seguridad al pandeo, estas últimas recibieron un abundante recubrimiento de hormigón.

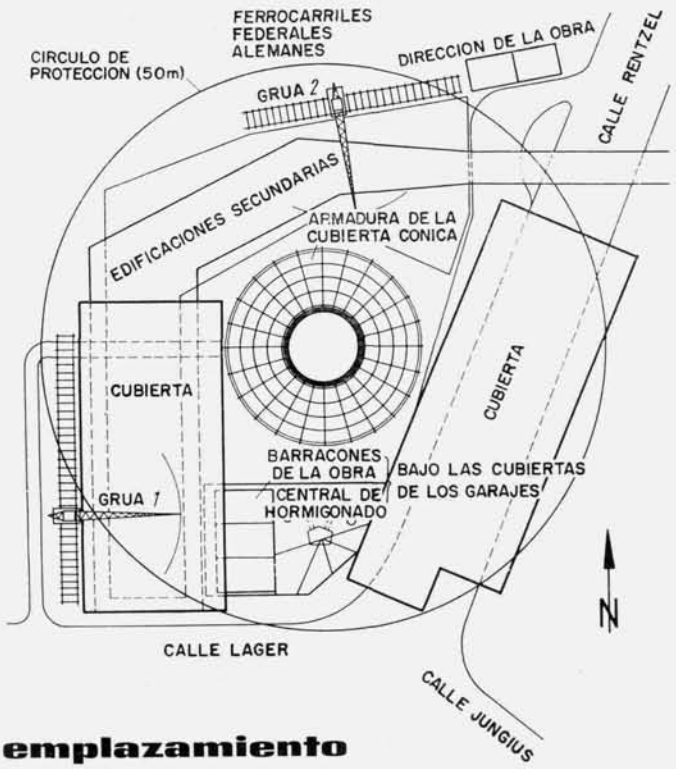


Las uniones de las cabezas —con sus plataformas y forjados interiores— al núcleo se proyectaron sin armaduras auxiliares, lo cual permitió construir el núcleo, sin interrupción desde la base hasta su extremo, con el auxilio de encofrado deslizante.

Las estructuras en el interior del núcleo

La caja del ascensor es, hasta la zona del restaurante, un tubo prismático, de hormigón, con pared de 12 cm de espesor continuo, y alberga tres ascensores. Por encima de la cabeza del restaurante va un tubo de ascensor con pared de 10 cm de espesor. Toda la caja de dicho ascensor es soportada por la placa, de

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



emplazamiento

1,8 m de espesor, que remata el cono de cimentación. Para evitar que dicha caja se contrajera o dilatara de distinta manera que el núcleo, se apoyó en los forjados intermedios, los cuales, a su vez, están apoyados en el núcleo, de modo que tampoco allí fue necesaria una armadura de unión. Estos forjados están atravesados por huecos para las escaleras y tuberías.

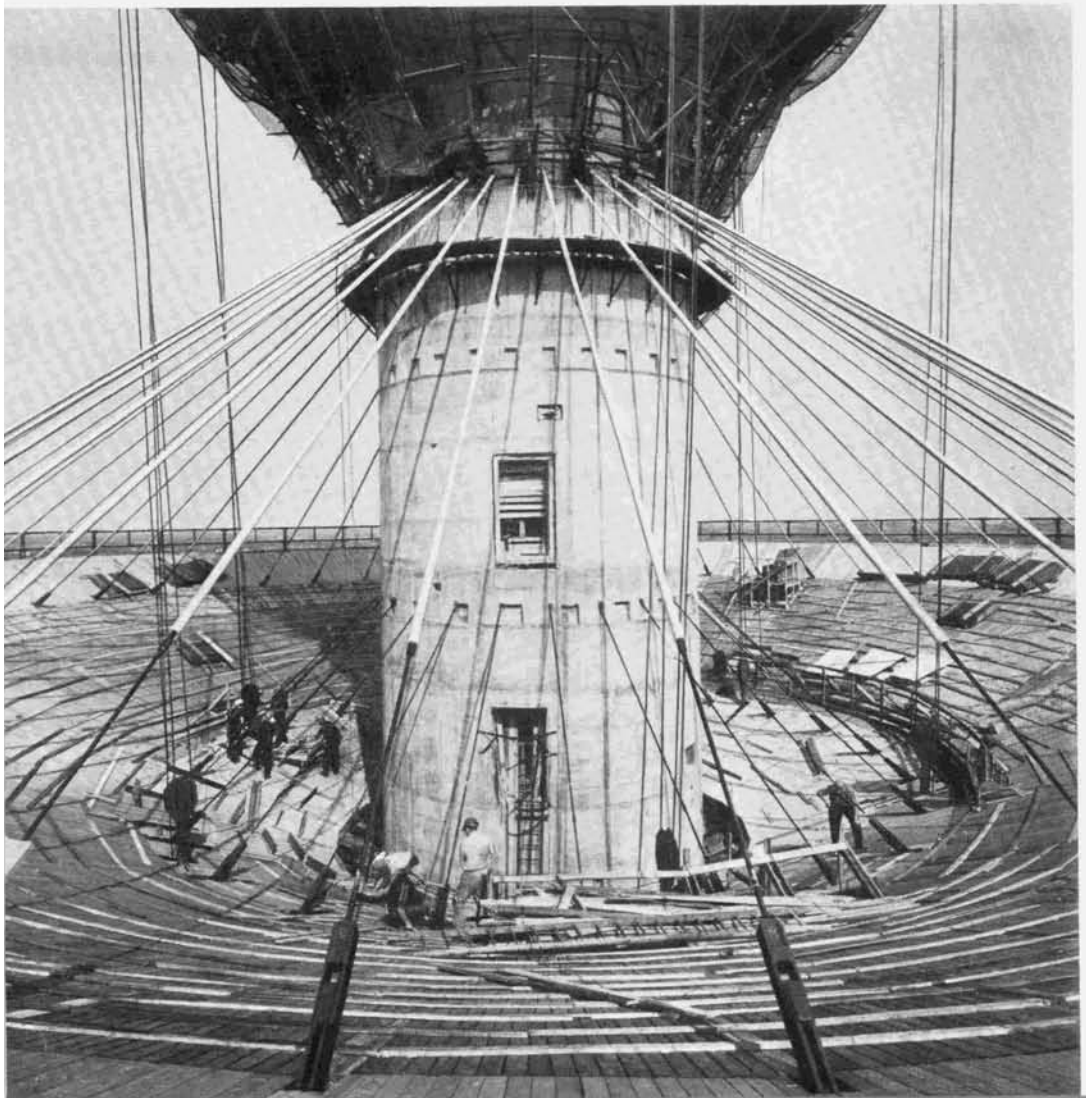
La escalera de emergencia es una simple construcción metálica fijada a la caja del ascensor y a los forjados intermedios.

Las cabezas de la torre

La cabeza de servicios tiene un diámetro exterior de 39,8 m y una planta, y la cabeza del restaurante, un diámetro exterior de 32,4 m y dos plantas.

Para la construcción de ambas cabezas se utilizaron vigas cajón de sección triangular, en anillo, coronadas por cubiertas troncocónicas. El anillo superior de la viga cajón se apoya en el interior por medio de soportes de acero. En la cabeza del restaurante, un forjado intermedio con un resalto de 30 cm recibe la plataforma giratoria.

Las placas troncocónicas inferiores de las cabezas presentan todas la misma inclinación, 24°; en el núcleo son de 40 cm de espesor, y en el perímetro, de 30 cm, y van armadas con armadura normal. Una unión rígida de dichas placas troncocónicas al núcleo exigiría una considerable armadura de unión y produciría grandes momentos perturbadores en el núcleo, obligando, como consecuencia, a reforzarlo. Esto hubiera resultado caro y, sobre todo, de realización dificultosa. Por eso se eligieron aquí uniones semiarticuladas, para las que, en el núcleo, únicamente hubo que practicar entrantes planos, de 3,5 cm de profundidad, que no alteraban sensiblemente el recubrimiento de hormigón.



Las placas cónicas superiores van apoyadas, asimismo, al núcleo en entrantes revestidos con chapas de acero contra esfuerzos cortantes. Debido a este apoyo horizontal móvil y articulado, se mantienen el núcleo y las placas libres de tensiones diferenciales ocasionadas por cambios de temperatura.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

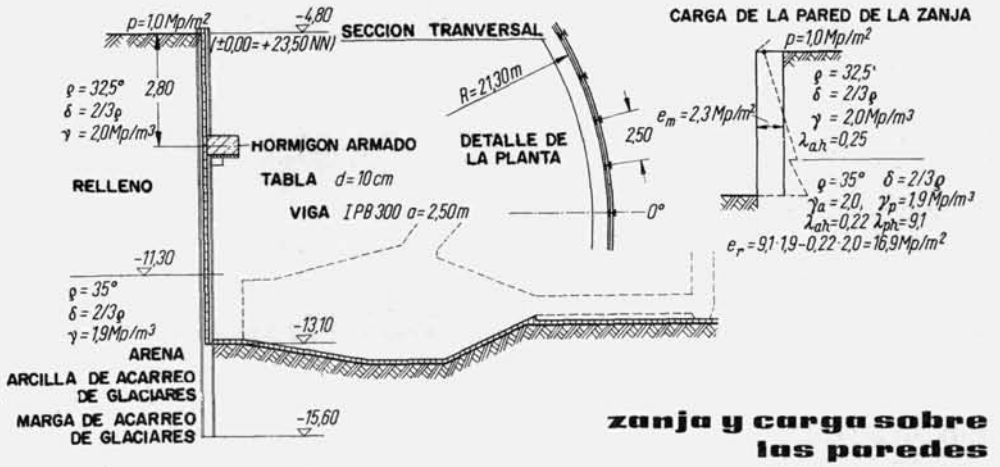
Los antepechos se prefabricaron con 8 cm de espesor de pared, en piezas de 1,5 m de longitud; las juntas verticales, de 3 mm de anchura, se rellenaron con resina sintética. La totalidad del anillo del antepecho se pretensó ligeramente en la dirección del anillo.

La impermeabilización de cubiertas y antepechos se realizó, después de minuciosos ensayos en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la firma Wayss & Freytag, con Icosit R 9130, de la firma Lechler Chemie Stuttgart, cuya materia base es polietileno clorosulfatado. Sobre la superficie de hormigón, tratada previamente con chorro de arena, se aplicó el recubrimiento en ocho capas de 0,3 mm de espesor cada una.

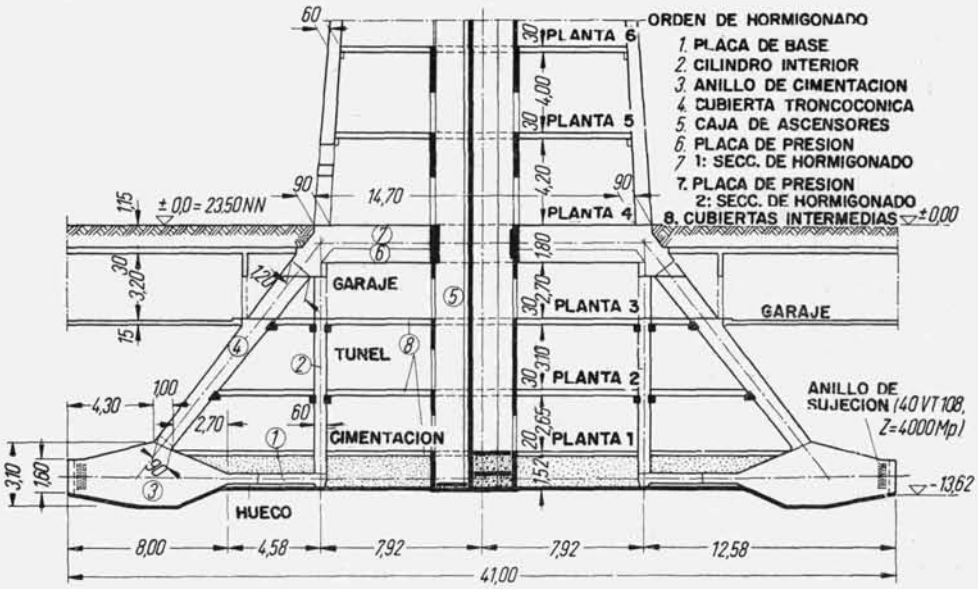
La cabeza del restaurante lleva, en su planta superior, un anillo giratorio de 27 m de diámetro exterior y 3,5 m de anchura. Con el sistema propuesto por F. Leonhardt se redujo la altura de la planta en unos 65 cm. En vez de las ruedas de acero corrientes, con cubiertas de goma dura, se eligieron cojinetes de deslizamiento de un metal especial, dispuestos en carriles circulares en forma de U llenos de aceite. Los detalles de esta solución fueron desarrollados por la firma Fried. Krupp, Maschinen y Stahlbau, Rheinhausen.

Las plataformas de las antenas

Los diámetros exteriores de las seis plataformas oscilan entre 22 y 16 m, con un diámetro del núcleo que varía entre 7,2 y 6 m. En su perímetro se colocarán antenas receptoras de gran superficie, de hasta 6 m de altura.

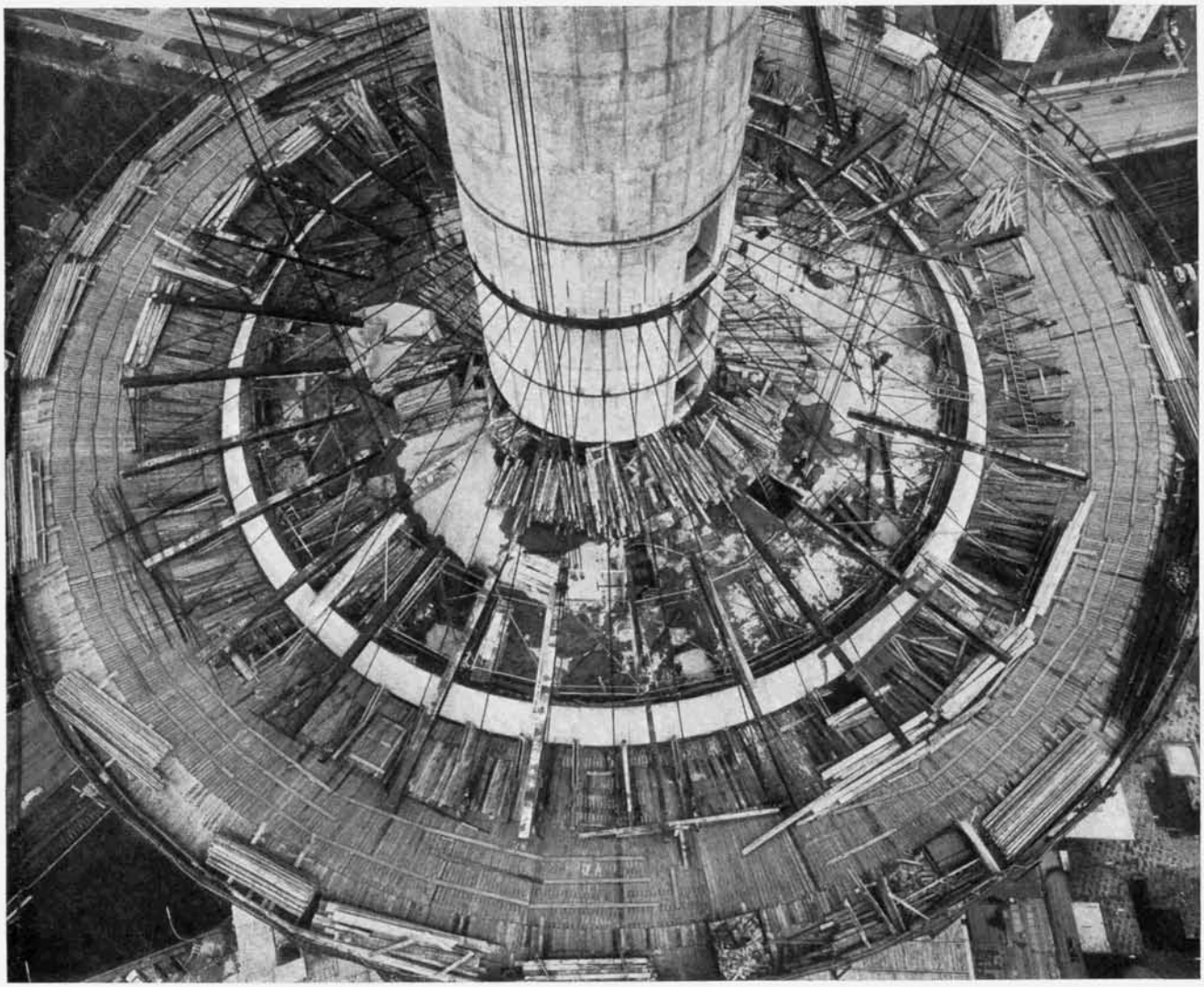


zanja y carga sobre las paredes



cimentación

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Para estas plataformas se desarrolló un nuevo tipo de construcción de placas cónicas planas, inclinadas 6°; con ellas pudieron reducirse, aproximadamente en un tercio, los gastos de construcción de plataformas de antenas de amplio voladizo con respecto a las placas circulares corrientes hasta la fecha.

La plataforma superior es de sección triangular. Está constituida por una placa troncocónica con una inclinación de 10° y una placa circular horizontal formando un anillo de viga cajón, disponiendo de un aparato para izar las antenas desde el suelo hasta ella. El proyecto de este aparato elevador fue extraordinariamente complicado, debido a lo mucho que sobresale la cabeza de servicios.

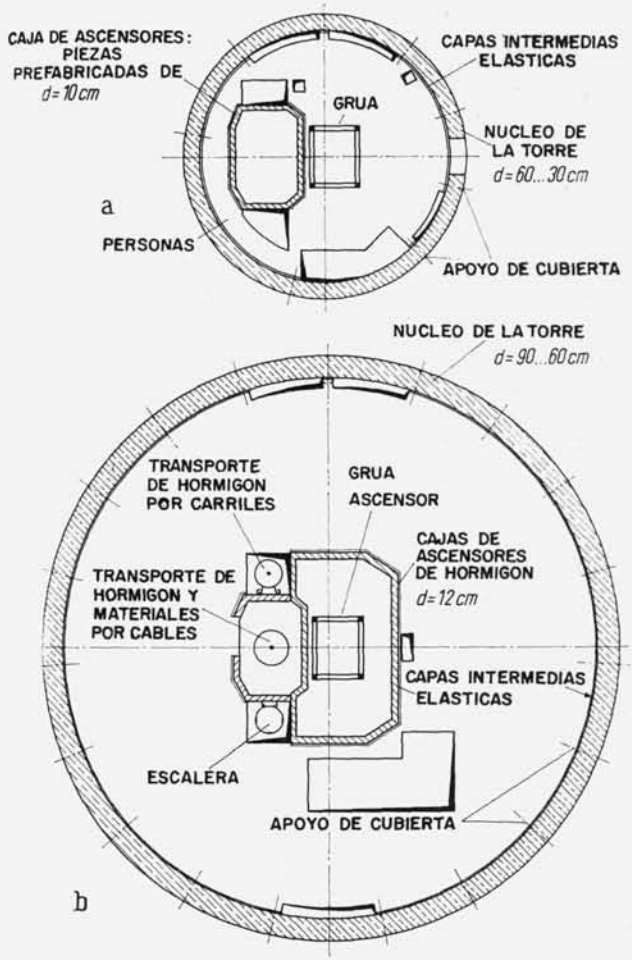
Como se exigían antenas de 1,5 t de peso y 20 m² de superficie de ataque al viento, que tenían que izarse con presiones del viento de hasta 10 kp/m² para colocarse en cualquier punto de las plataformas, se eligió una pluma horizontal que salía telescópicamente hasta 25 m del eje de la torre y que se desplazaba sobre carriles alrededor de ella. Mediante un torno montado en ella se tira por un lado de la antena con auxilio de un cable de sustentación; y por el otro, desde el suelo, se la mantiene con un cable de arriostramiento. Este último lleva un torno de contra-tracción, con acoplamiento de inducción, gracias al cual puede regularse la fuerza de tracción del cable, de 0 a 500 kp, según la fuerza del viento. El torno de contra-tracción se halla tan alejado del eje de la torre (70 m) que, bajo la potencia de viento indicada, nunca puede la antena tocar a dicha torre, evitando, como consecuencia, sobrecargar el aparato elevador. La velocidad de elevación es de 30 m/min. El aparato elevador se probó con 3,5 Mp de carga, y durante la obra sirvió para desmontar la grúa trepadora y montar los trozos del mástil de las antenas de hasta 2,5 t de peso.

El mástil de las antenas

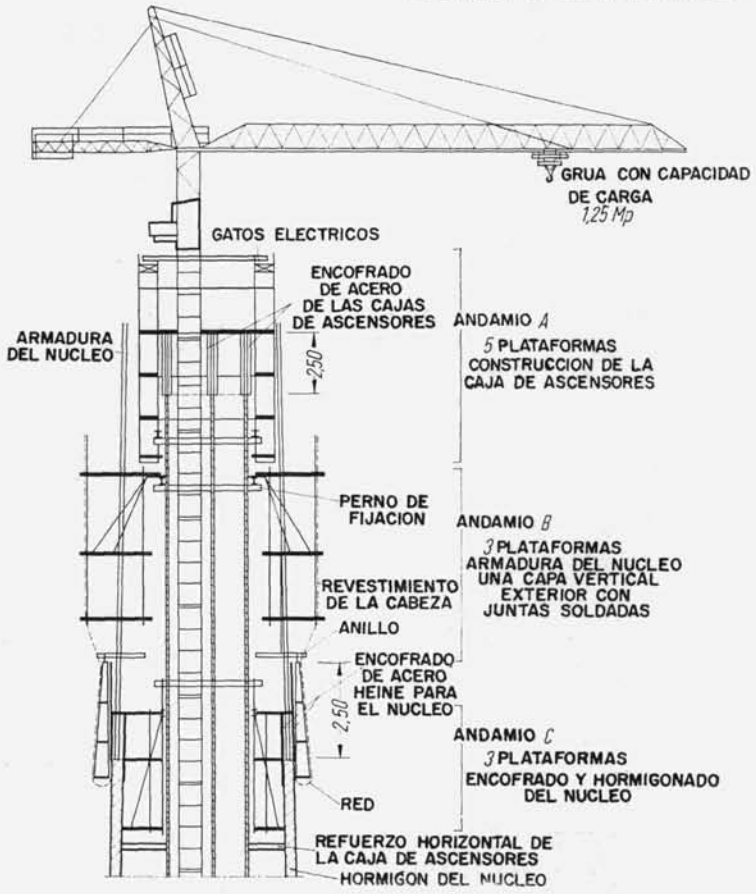
El remate superior del núcleo está constituido por una placa de hormigón armado, de 1,2 m de espesor, que soporta el mástil metálico de las antenas. A pesar de que para las formas opacas de la torre de

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

secciones transversales: **a** sobre 135 m
b debajo de 135 m.



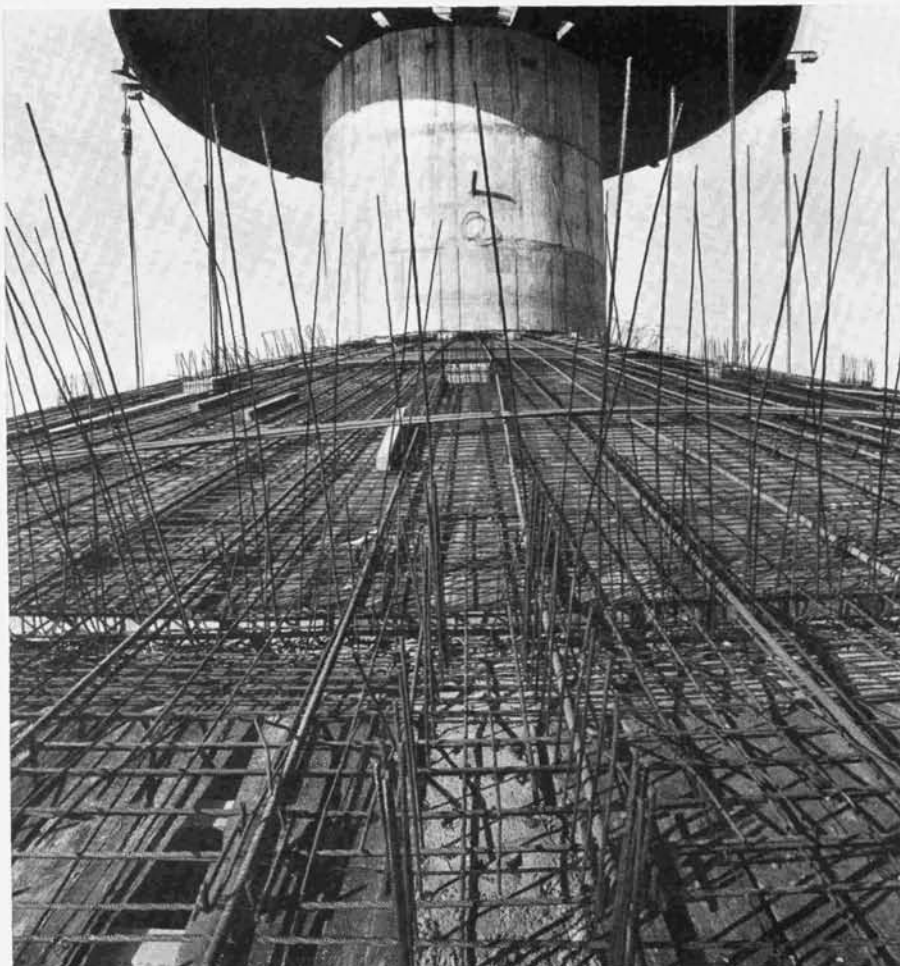
andamiajes hasta 135 metros



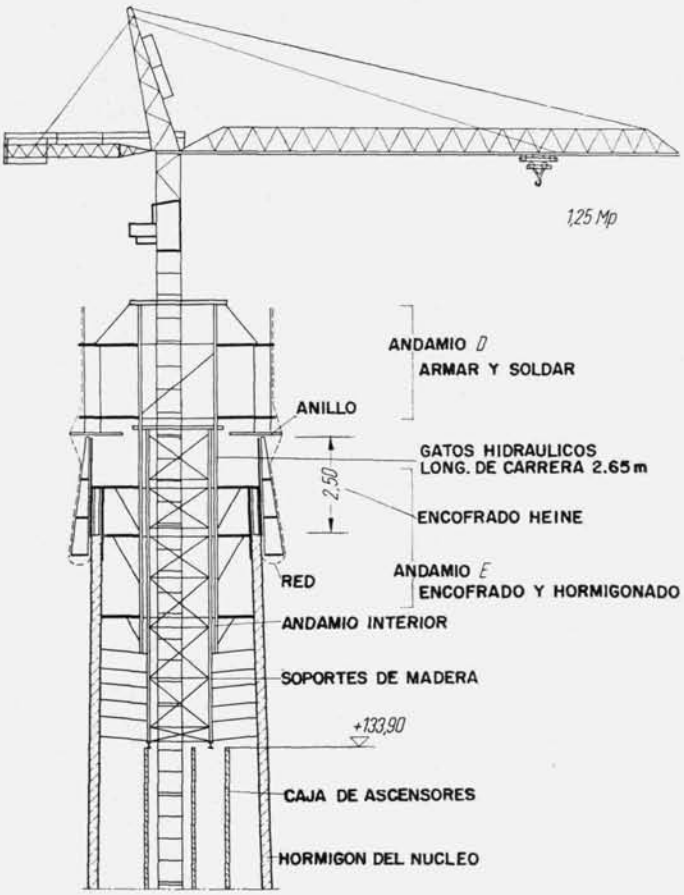
hormigón se hubiera adaptado mejor un tubo cerrado, se eligió un mástil de celosía de tubos, ya que desde éste se pueden montar y entretener más fácilmente las antenas fijadas al mismo.

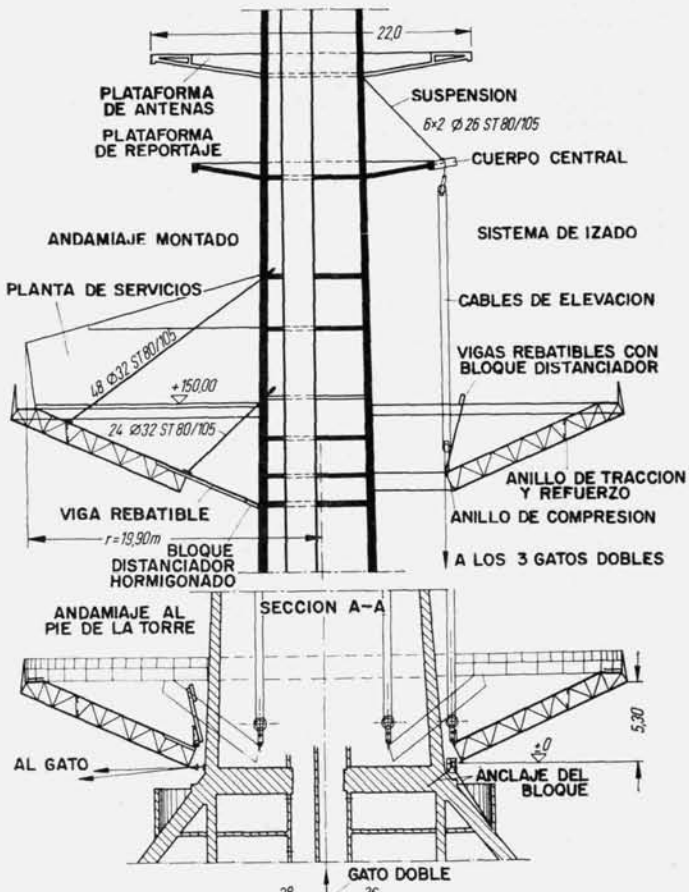
La altura del citado mástil de celosía es de 57,9 m, que se aumentará en otros 22,5 m con antenas cilíndricas autosustentantes. Su sección hexagonal presenta en la base un diámetro exterior de 3,5 m; los seis tubos verticales tienen un grueso de 343 mm, con un espesor de pared de 26 mm. Está reforzado con diagonales delgadas.

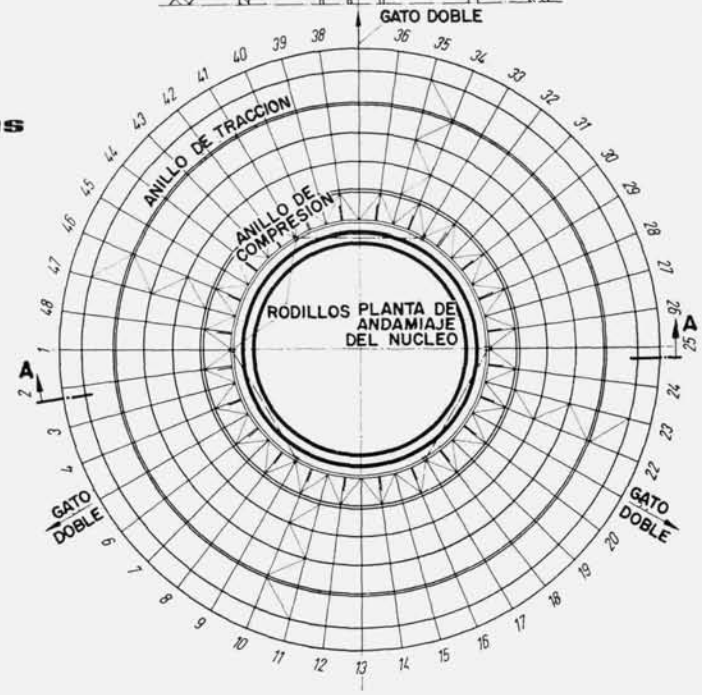
La fijación del mástil al núcleo se simplificó mucho soldando cada tubo vertical a una robusta placa de base, cuya superficie se halla dimensionada sobre la base de $p = 315$ kp/cm², con lo que se obtiene una placa de tamaño pequeño en comparación con el diámetro del tubo, eliminando las bridas de unión triangulares corrientes, cuyas soldaduras y forma son muy perjudiciales para la transmisión de esfuerzos, principalmente los que pro-



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es







andamiaje por encima de los 135 m y de las placas cónicas

vocan las oscilaciones. Esto es importante, porque tales mástiles oscilan muy frecuentemente como consecuencia de la acción del viento. El tubo queda sujeto con una varilla de anclaje de 100 mm ⌀ de St. 90 roscada.

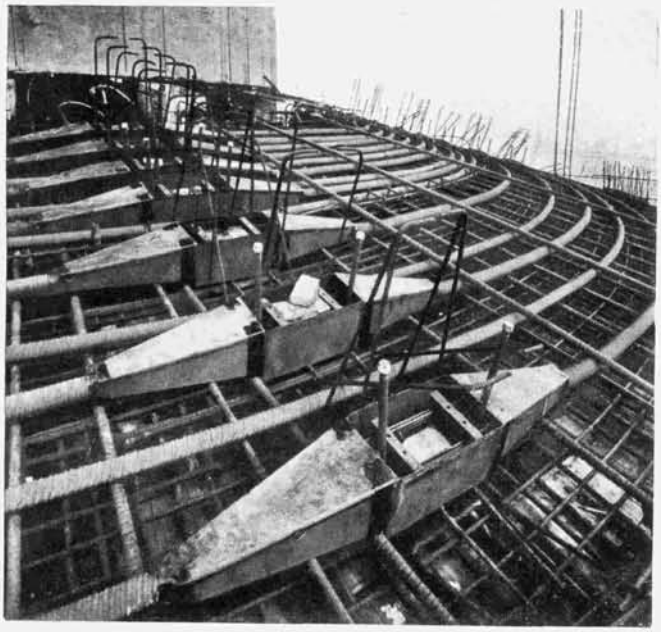
Cálculo estático

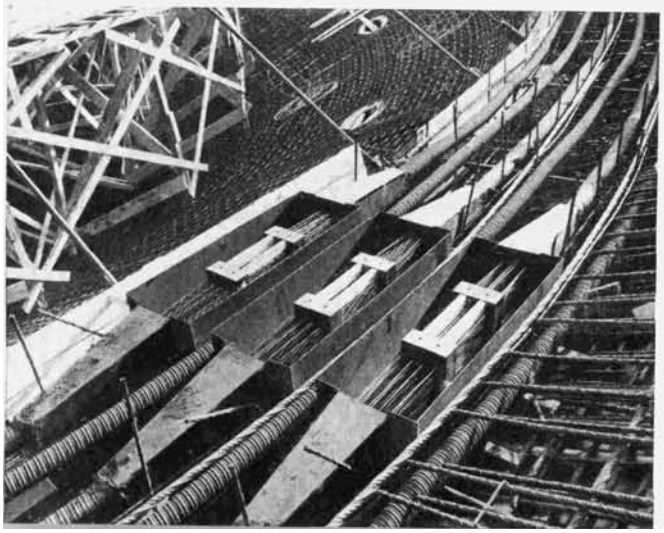
Esfuerzos de viento y ensayos en el túnel aerodinámico

Después de consultar al Servicio Meteorológico competente se aceptó como valor medio, calculado para toda la altura de la torre, una velocidad máxima del viento de $v = 44$ m/s, correspondiente a una presión de $q = 120$ kp/m². Como comparación, menciónese que el 16 de febrero de 1962 se midió en la catástrofe de la inundación de Hamburgo, a 70 m de altura sobre Quickborn, en Holstein, un valor punta de $v = 41$ m/s. Para tener en cuenta la acción dinámica del viento se dividió la presión en la relación 0,4 : 0,6, parte estática y parte dinámica. El tiempo de vibración propia de la torre se determinó con $T \approx 7$ s. Tomando como base las mediciones en la torre de Stuttgart se aceptó la disminución logarítmica de la atenuación a $d = 0{,}04$. Con estos datos se determinó el coeficiente dinámico $\varphi' = 2{,}26$, o bien la presión estática equivalente $q = 120\,(0{,}4 + 2{,}26 \times 0{,}6) = 210$ kp/m².

Se demostró además que las vibraciones transversales producidas por los remolinos, sobre todo con vientos de velocidades reducidas, no pueden producir flexiones mayores que las calculadas con cargas sustitu-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es





torias en la dirección del viento, de modo que éstas son decisivas para el dimensionado. Aunque es sabido que los sencillos sistemas de cálculo actuales de las vibraciones transversales no coinciden exactamente con el comportamiento aerodinámico real de este tipo de torres, en la de Hamburgo, dadas las numerosas instalaciones que dificultan el desprendimiento de remolinos, es seguro que no deben temerse vibraciones transversales serias.

Los coeficientes de resistencia del viento C_w de las diferentes secciones de la torre se determinaron mediante ensayos en el túnel aerodinámico. Para la zona de torre comprendida entre la parte inferior de la cabeza del restaurante y la punta del núcleo se confeccionó un modelo de madera a escala 1 : 100. Sobre las plataformas de las antenas se colocaron, en la posición más desfavorable, modelos de antenas reflectoras similares a las verdaderas. El resultado de estos ensayos está resumido en la tabla I. Como superficie de referencia F para determinar la resistencia del viento $W = C_w \cdot q \cdot F$ se tomó la superficie de proyección de la obra, sin las antenas. El aumento de los C_w en la zona de las plataformas, de 0,65 sin antenas a 1,5 con antenas, da, por lo tanto, directamente la aportación de las antenas a la resistencia del viento. En el $C_w = 0{,}71$ se observa la favorable forma aerodinámica de las cabezas, y en el muy bajo, $C_w = 0{,}65$, se aprecia la favorable configuración resistente de las plataformas.

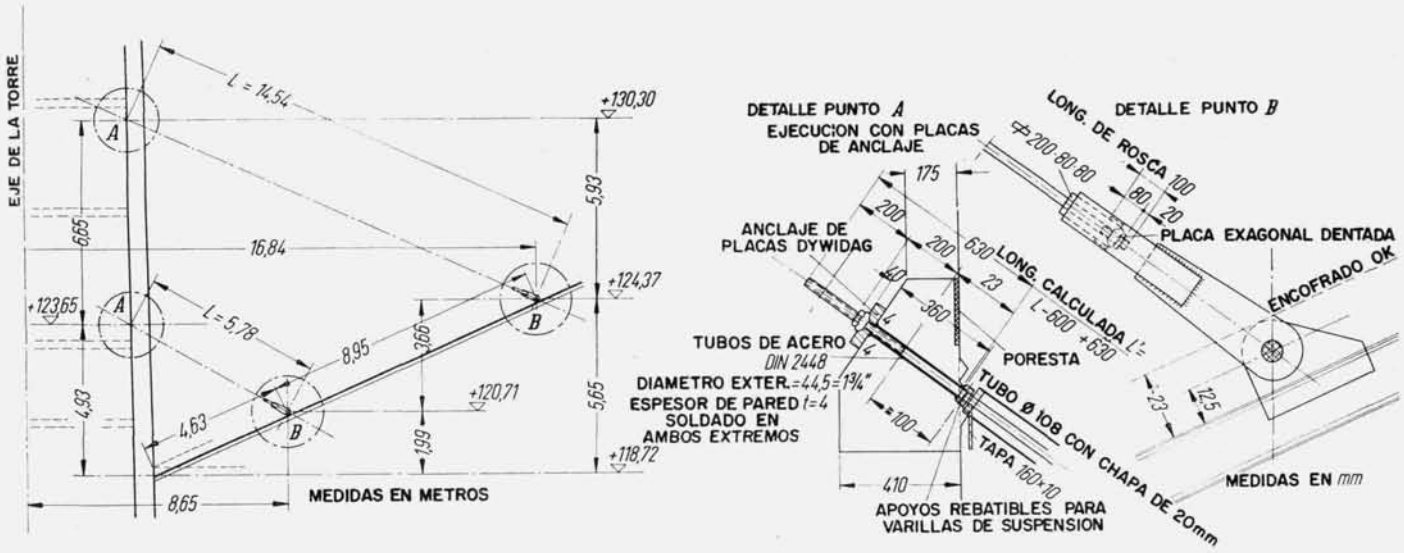
Los coeficientes del viento para el mástil hexagonal de celosía se examinaron a lo largo de prolongados ensayos en el túnel aerodinámico. El modelo, constituido por una sección del mástil con 1,04 m de diámetro exterior y 1,63 m de altura, correspondía a sus dimensiones en las diferentes secciones a escala 1 : 3,37; 1 : 2,45 y 1 : 1,47. Alternativamente fue equipada con todos los cables, antenas de dos campos, grupos dirigidos ante paredes reflectoras y cubiertas antihielo. El $C_w = 1{,}1$ (tabla I), determinado así para el mástil de Hamburgo y a aplicar a todas las secciones, se refiere nuevamente al diámetro exterior D del mástil sin antenas. La tabla II contiene un resumen simplificado de los resultados de las mediciones. Según normas de las leyes de similitud de la circulación, estos valores valen para la zona de circulación supercrítica con $\mathrm{Re} = v \cdot D/\nu \geqslant 3 \times 10^6$, d.h, es decir, para mástiles con diámetros exteriores de 1 m, con una velocidad del viento $v \geqslant 45$ m/s. Para mástiles y velocidades del viento menores pueden aumentar hasta un 20 % en la zona subcrítica.

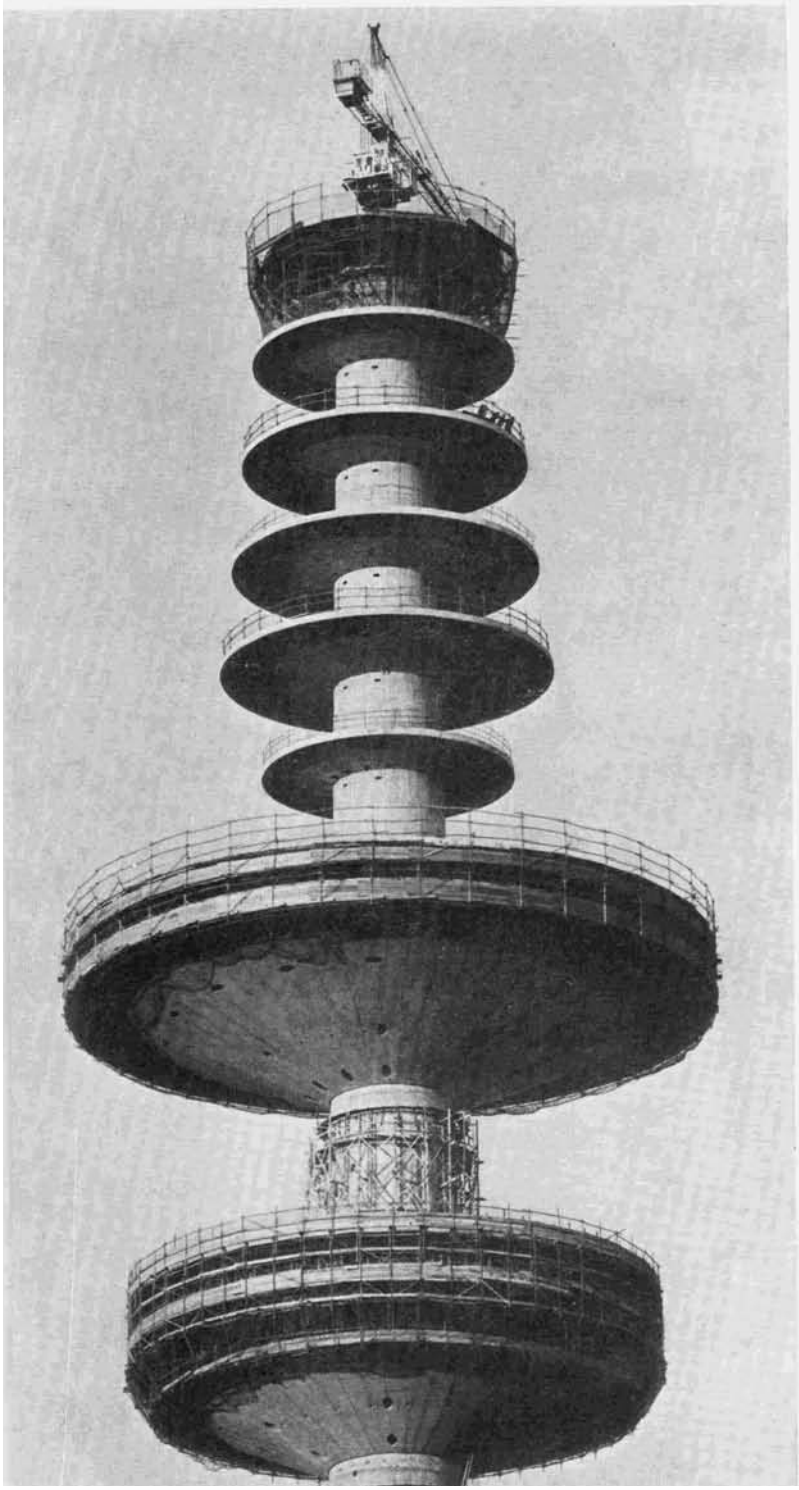
Cálculo y dimensionado del núcleo

Los momentos flectores máximos del núcleo producidos por el viento y determinados sobre las bases del apartado anterior aumentaron, en función del congelamiento de las antenas, aproximadamente un 9 %. Por supuesto, se incrementaron los momentos de flexión de carga móvil unilateral, que en la base alcanzan un 3,7 % de máximo solamente.

En la sección transversal crítica, a aproximadamente 80 m de altura, no se producen tensiones por tracción hasta que el viento ha alcanzado el 77 % de su velocidad máxima calculada (tabla III). En el momento

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es





detalle de las varillas de suspensión

de máximo viento, las tracciones son de aproximadamente 36 kp/cm², o sea, que se hallan todavía por debajo de la resistencia a la tracción de un B 450 endurecido bajo presión continua. Incluso algunas pocas grietas por flexión horizontales, que sólo afectan a una pequeña parte de la superficie circular, no producen una pérdida de rigidez a la presión tan grande como la que resulta en el estado II del cálculo. Secciones transversales circulares fuertemente armadas acusan, no obstante, una transición paulatina de las rigideces a la flexión del estado I al estado II.

En el dimensionado del núcleo se relacionaron entre sí, de tal modo, espesor de pared y armadura vertical, que:

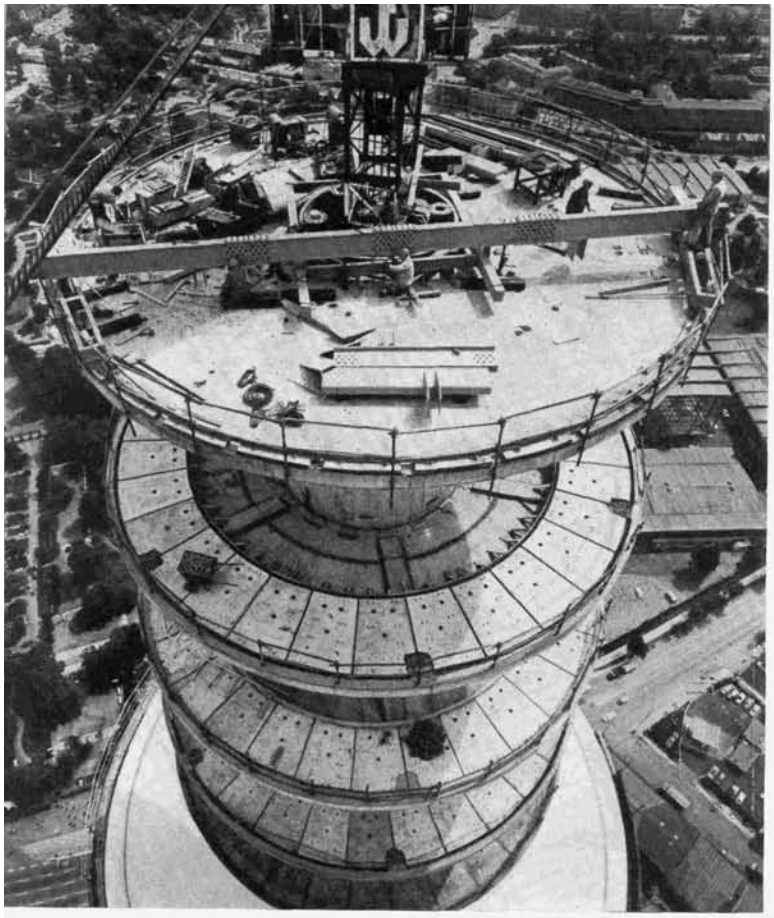
a) Las cargas de trabajo se pueden soportar con las respectivas tensiones. Las tensiones de compresión del hormigón resultaron normales para el grueso de pared necesario.

b) De acuerdo con el método de carga, se soportan 0,9 veces las fuerzas normales y 2,3 veces los momentos.

Con este factor de seguridad en los momentos de viento, había que tener en cuenta: un aumento inesperado de los esfuerzos del viento, errores en la determinación del esfuerzo cortante y una disminución de la

Estado de la obra poco antes de terminar los trabajos de hormigonado.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



resistencia. Bajo este aumento de la fuerza del viento previsto más allá de las cargas de trabajo calculadas, es posible el estado II con los correspondientes momentos de segundo orden. El coeficiente de seguridad, relativamente alto, con $v = 2{,}3$, ha de compensar este aumento de los momentos.

La proporción de armaduras aumenta desde aproximadamente 1,3 % en la base del núcleo hasta a 2,2 % a 80 m de altura, y disminuye, entonces, hasta la punta a 1,1 %.

Para contestar a la eterna cuestión de si hay que dimensionar la armadura para esfuerzo dinámico, se compararon bajo este esfuerzo las tensiones del acero en la zona de sección transversal crítica del núcleo, con $H = -80$ metros, con las tensiones admitidas para aceros corrugados para armaduras de hormigón.

Cálculo y dimensionado de la cimentación

La cimentación es una estructura constituida por una placa troncocónica, dos cilíndricas (núcleo y cilindro interior) y placas circulares (placa superior con abertura para ascensores, anillo de cimentación, placa de base).

Para el caso de cargas simétricas (peso propio, cargas móviles, sobrecargas de tierra, pretensado del anillo) se pueden hallar los esfuerzos cortantes del sistema básico, determinado estáticamente, por condiciones de equilibrio puras.

Para cargas antimétricas (viento, carga móvil unilateral), los esfuerzos cortantes en el sistema básico, determinado estáticamente, se pueden calcular, a partir de las condiciones de equilibrio, como puros esfuerzos cortantes de dilatación o de membrana.

El cálculo detallado de la cimentación se llevó a cabo con gran minuciosidad. La adecuada elección y disposición de las secciones transversales permitió que en las zonas de perturbaciones marginales se realizara un dimensionado muy ajustado, que no requirió grandes secciones de armadura, las cuales hubieran repercutido desfavorablemente en la ejecución de la obra.

Dimensionado de las cabezas de la torre

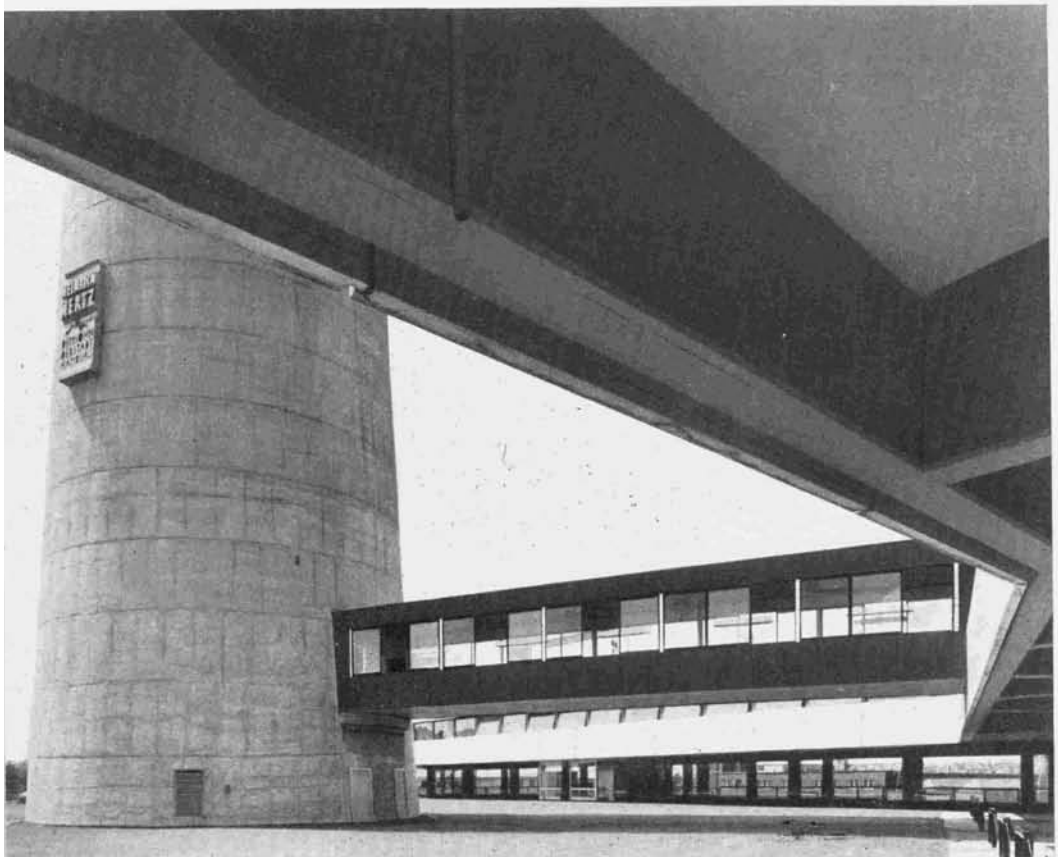
En esta parte de la obra hubieron de tenerse muy en cuenta las diferencias de temperatura exterior e interior, particularmente en invierno, época en que el intenso frío producido por las bajas temperaturas se acrecienta en función del viento. De igual forma se cuidó extraordinariamente de disponer una sección de armaduras que fuera capaz de soportar las cargas previstas y, a la vez, de evitar la aparición de fisuras peligrosas en el hormigón.

A pesar de estas dificultades y de las secciones grandes de armaduras que exigían —como se dijo antes— las diferencias de temperaturas, los minuciosos estudios realizados hicieron lógico el renunciar a protección calorífuga exterior en estas partes de la obra, desde el punto de vista de la economía y de los gastos de entretenimiento. Unicamente ha sido preciso analizar minuciosamente las influencias de la temperatura y dimensionar las armaduras con arreglo a las buenas normas de limitación de fisuras, con el fin de que más adelante no se produzcan desperfectos.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

detalles del cuerpo bajo

edificio administrativo



enlace del edificio administrativo con la torre

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Proyecto: Prof. Dipl. Ing. Fritz Trautwein, Hamburgo; Prof. Dr. Ing. Fritz Leonhardt, Stuttgart; Dipl. Ing. Rafael Behn, Hamburgo.

Colaborador: Bau-Ing. Heino Lattemann, Hamburgo.

Cálculo: Leonhardt y Andrä, Asociación de Oficinas de Ingenieros Asesores, Stuttgart.

Colaboradores: Dr. Ing. Jörg Schlaich, Dipl. Ing. Willi Kunzl, Dipl. Ing. Horst Falkner.

Construcción: Wayss & Freytag KG, Sucursal de Hamburgo.

La tour de télécommunication à Hambourg Allemagne

Projet: **Prof. F. Trautwein, Prof. F. Leonhardt** et **Dipl. Ing. R. Behn**

Cet article fait une description des caractéristiques du projet et de la construction de cet important ouvrage de génie et fournit des détails de son exécution et montage, accompagnés d'un bon nombre de plans et de photographies.

The Hamburg Telecommunication Tower Germany

Design: **Prof. F. Trautweint, Prof. F. Leonhardt** & **Dipl. Eng. R. Behn**

This article describes accurately and in detail the various aspects of the design and construction of this important engineering project. There are a number of photos and plans of the various constructional stages.

Fernmeldeturm in Hamburg - Deutschland

Entwurf: **Prof. F. Trautwein, Prof. F. Leonhardt** und **Dipl. Ing. R. Behn**

Dieser Artikel gibt eine präzise und detaillierte Beschreibung des Entwurfs sowie der baulichen Besonderheiten dieses bedeutenden Ingenieursbauwrks; anhand zahlreicher Pläne und Fotografien werden die Einzelheiten der Ausführung und Montage erläutert.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es