

## **nota**

La Asociación Española del Hormigón Pretensado desea preparar una publicación en la que se recojan todas las obras de hormigón pretensado construidas en España. Esta publicación será distribuida entre los participantes en el próximo V Congreso Internacional del Hormigón Pretensado, que habrá de celebrarse en París del 11 al 18 de junio de 1966.

Por este motivo nos permitimos rogar a todos nuestros lectores que si han realizado o colaborado en la realización de algún proyecto u obra de hormigón pretensado, tanto en España como en el extranjero, o simplemente si conocen algún dato sobre obras de esta clase construidas en nuestro país, se dirijan a:

Sr. D. Rafael Piñeiro,  
Secretario de la A. E. H. P.,  
Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento,  
Apartado 19.002, Costillares, Chamartín,  
MADRID (16),

enviando información lo más amplia posible sobre el particular.

Depósito Legal: M. 853-1958

---

CIDE.--221-61-63.—MADRID-4

**ASOCIACION ESPAÑOLA DEL HORMIGON PRETENSADO**

**h**ormigón y **a**cero  
últimas noticias de hormigón pretensado

n. **72**

julio - agosto - septiembre 1964

**i.e.t.c.c.**

**instituto Eduardo torroja**

DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

PATRONATO «JUAN DE LA CIERVA» DE INVESTIGACION TECNICA DEL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

**procedimientos**

# Barredo

de hormigón pretensado

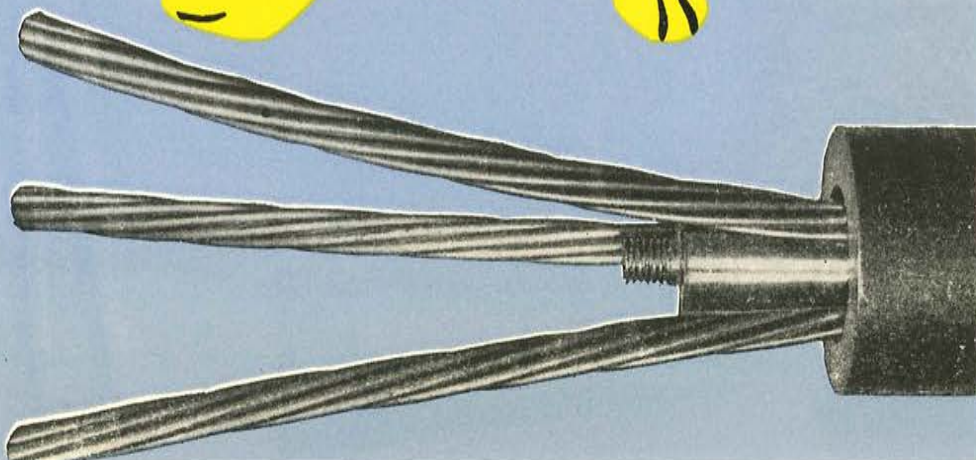


**antes el gato...**



**...ahora  
el  
tigre**

**Raimundo Fdez. Villaverde, 45  
Teléfono 2 33 03 00  
MADRID**



**asociación española  
del hormigón pretensado**

CUOTA ANUAL	ESPAÑA	EXTRANJ.
	Pesetas	Dólares
Socio adherido individual .....	150,00	3,00
Socio no adherido individual .....	300,00	6,00
Socios colectivos (aunque figuren como socios adheridos) .....	800,00	16,00

## **hormigón y acero n. 72**

**últimas noticias de hormigón pretensado**

### **índice**

	<u>Págs.</u>
457-0-32 Normas para la inspección del hormigón pretensado. Estados Unidos, 1960 (2. <sup>a</sup> parte). . .	5
457-0-33 Estudio de secciones de hormigón armado sometidas a flexocompresión esviada, por medio de un computador digital . . . .	26
Francisco Morán Cabré, Ingeniero de Caminos.	
591-1-8 El «Capp Towers Motor Hotel», edificio prefabricado de hormigón pretensado. . . .	43
Ross H. Bryan.	

# nota de la asociación española de hormigón pretensado

## intercambio de publicaciones

Dentro del programa de intercambios de publicaciones organizado por la F. I. P. entre las diversas Asociaciones Nacionales que la integran, hemos recibido, últimamente, las que a continuación se mencionan, en las cuales aparecen, entre otros, los trabajos que en la presente nota se detallan, relacionados con la técnica del hormigón pretensado.

Para mayor comodidad de nuestros lectores, los títulos de todos los artículos se dan traducidos al español.

Publicaciones enviadas por el SECRETARIO GENERAL DE LA F. I. P.

Libro: El puente sobre el lago de Maracaibo en Venezuela.

Publicaciones enviadas por el «Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto».

Revista: «IMCYC», vol. 2, núm. 9, julio 1964.

1. «Algunos desarrollos recientes en las técnicas de modelos estructurales», por M. Rocha.
2. «Computación electrónica de los esfuerzos de membrana en paraboloides hiperbólicos», por Julio E. Damy.
3. «Normas A. S. T. M. para cemento y concreto».

Publicaciones enviadas por el «Eidgenössische materialprüfungs und versuchsanstalt für industrie, bauwesen und gewerbe» de Dübendorf:

Folleto: «Ensayo sobre el puente Glatt en Opfikon», por V. Depauw.

Publicaciones enviadas por el «Belgische Groepering voor de voorspanning».

Folleto: «Ensayo en modelo reducido de una cubierta colgante pretensada».

Publicaciones enviadas por la Asociación Rusa de Hormigón Pretensado:

Revista: «Hormigón y hormigón armado». Junio, 1964.

4. «Desarrollo de la teoría del hormigón armado en la U. R. S. S.», por A. A. Gvozdev.
5. «Problemas de la prefabricación de elementos de hormigón pretensado», por E. G. Ratts.

Publicaciones enviadas por la «ENCI-CEMIJ N. V.» de Amsterdam:

Revista: «Cement», agosto 1964.

6. «Puentes de hormigón pretensado construidos por voladizos sucesivos», por G. Wontzoff.
7. «Historia y desarrollo de los pavimentos de hormigón en América», por C. van de Fliert.

Revista: «Cement», septiembre 1964.

8. «Influencia del cemento en la estabilidad del hormigón», por M. Venuat.
9. «Breve discusión sobre las tribunas del hipódromo de Duindigt», por L. G. M. Brekelmans.

Publicaciones enviadas por el «Prestressed Concrete Institute», de Estados Unidos:

Revista: «P. C. I. Journal», abril 1964.

10. «Estudio sobre la relajación de tensión en las armaduras pretensas», por D. D. Magura.
11. «Aceros para hormigón pretensado», por W. R. Anderson.

Revista: «PCI Journal», agosto, 1964.

12. «Estudio sobre los efectos dinámicos en las estructuras de hormigón pretensado», por K. S. Zavriev.
13. «Pretensado circular: Observaciones sobre las pérdidas por fricción», por N. D. Nathan.
14. «Placas y láminas pretensadas de elementos prefabricados», por Z. A. Zielinski.

Publicaciones enviadas por la «Cement and concrete association», de Inglaterra:

Folleto: C. A. C. A. Library. Translation.

«Normas holandesas para estructuras de hormigón pretensado».

## Estados Unidos - 1960

# normas para la inspección del hormigón pretensado

### 2.º parte

En general, todas las propiedades del hormigón están relacionadas con la resistencia a la compresión; y los ingenieros en sus cálculos tienen en cuenta e imponen ciertas condiciones a algunas de ellas, pero, corrientemente, especifican sólo la resistencia a compresión como método de control de las restantes propiedades.

Los fabricantes de hormigón pretensado prefabricado son responsables del cumplimiento de tales condiciones.

El empleo de un hormigón de alta calidad, es imprescindible en la prefabricación; el control de dicha calidad, además de suministrarnos datos referentes a las propiedades físicas del material, puede reportarnos considerables beneficios de tipo económico.

El aprovechamiento máximo de los materiales que lo integran, sólo se consigue mediante un riguroso control de: dosificación, mezclado, transporte, colocación y curado.

Para obtener un hormigón de alta calidad se deberán tener presentes y controlar los siguientes factores:

1. Relación agua/cemento.
2. Calidad de los materiales: arena, grava, cemento, agua, adiciones.
3. Almacenamiento y manejo de los materiales.
4. Dosificación y mezclado de dichos materiales.
5. Puesta en obra del hormigón.
6. Curado del hormigón.
7. Métodos de ensayos, y toma y conservación de las muestras.

## HORMIGÓN

### relación agua-cemento

1. El hormigón es una mezcla de arena, grava, cemento, agua y, frecuentemente, aire ocluido; los áridos actúan como material de relleno, y su trabazón se consigue con la pasta de cemento.

Como la mayor parte de dichos áridos tienen una resistencia superior a la de la pasta, no mejorarán de un modo apreciable la calidad del hormigón; sin embargo, cuando se utilizan áridos blandos o poco resistentes, entonces sí que disminuirá esa calidad.

- La resistencia del hormigón depende, fundamentalmente, de la calidad de la pasta; entendiéndose por pasta el compuesto resultante de la combinación química de agua y cemento.

La calidad de la pasta depende de la relación agua/cemento; en general, al aumentar dicha relación disminuye la resistencia.

La relación agua/cemento que da lugar a la máxima resistencia es, aproximadamente, 1:3 (una parte de agua por tres partes de cemento).

- Si bien la resistencia de un hormigón es una de sus características más importantes, deben considerarse también otros factores tales como: docilidad, facilidad de manipulación, durabilidad y coste.

Una mezcla seca, por ejemplo, dará lugar a un hormigón de alta resistencia y pequeña retracción y, por tanto, más económico en lo que respecta al coste de los materiales; sin embargo, debido a que las dificultades de manipulación y colocación son mayores, se suelen contrarrestar dichas ventajas.

Los equipos de manipulación y colocación corrientemente empleados en la producción de piezas prefabricadas pretensadas permiten la utilización de mezclas secas en condiciones económicamente ventajosas.

- La figura 4 nos muestra la variación de la resistencia en función de la relación agua/cemento.

Es importante recalcar que la resistencia depende de la relación agua/cemento, mientras que la docilidad depende del contenido de agua.

La docilidad de una muestra se puede incrementar añadiendo agua, pero hay que añadir asimismo el cemento necesario si se pretende que la resistencia permanezca inalterada.

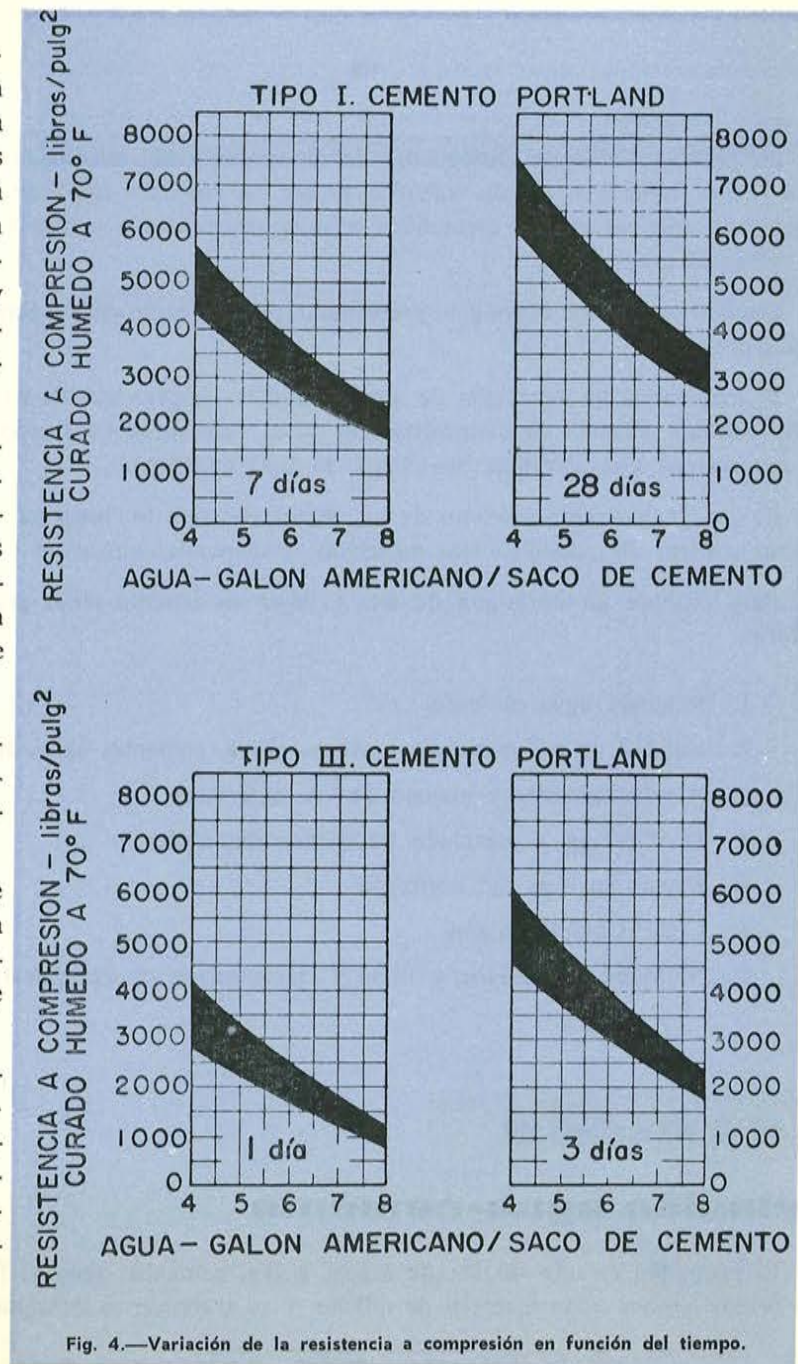


Fig. 4.—Variación de la resistencia a compresión en función del tiempo.

## áridos

1. Los áridos actúan como material de relleno para reducir el coste del hormigón.

Deben ser químicamente inertes; y su resistencia, igual o mayor que la del hormigón.

2. Los áridos lisos o resbaladizos, tales como el cuarzo y el pedernal, resultan inadecuados para su empleo en el hormigón, ya que las superficies lisas no se adhieren bien al mortero.

Como este tipo de materiales no puede normalmente eliminarse totalmente en la práctica, se tendrá especial cuidado de que su proporción se mantenga lo más baja posible.

3. Los áridos deben utilizarse limpios y libres de materias extrañas, tales como hierbas y lodo adherido, y sus tamaños deben tener una gradación adecuada.

Una correcta granulometría determina el que los áridos ocupen un mayor espacio—dentro de un volumen dado—y, por tanto, que la cantidad de pasta necesaria sea menor, sin que por ello queden afectadas las condiciones de resistencia o de docilidad.

La limpieza de los áridos es, pues, necesaria para conseguir una buena adherencia con la pasta.

4. Es recomendable que la segregación sea mínima, y en la práctica se consigue reducirla en lo posible teniendo cuidado de que el almacenamiento de los distintos materiales sea el conveniente y mediante la adecuada manipulación de los mismos.

En el manual de la Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures", se describen diversos métodos relativos al caso.

La segregación se puede también controlar volviendo a cribar los áridos en la planta de dosificación.

5. Todos los áridos tienen una cierta humedad; y como el agua constituye un factor importante en la resistencia del hormigón—relación agua/cemento—, será necesario efectuar las correcciones oportunas considerando dicho grado de humedad.

Si el árido está seco, una parte del agua de la mezcla se introducirá en sus poros y, por tanto, no reaccionará químicamente con el cemento, ni tendrá ninguna participación en la docilidad del hormigón.

Si el árido tiene un exceso de humedad, este exceso se sumará al agua de la mezcla.

En cualquiera de los casos será necesario el efectuar las correcciones pertinentes, al objeto de mantener la resistencia y la docilidad del hormigón dentro de los límites previstos.

6. El peso del hormigón puede reducirse con el empleo de áridos ligeros, naturales o artificiales.

Durante muchos años se han utilizado, casi siempre, sacrificando la resistencia u otras propiedades del hormigón. Sin embargo, recientemente se ha conseguido preparar áridos ligeros, cuyas características los hacen aptos para su utilización en el hormigón empleado en estructuras y que tienen un amplio campo de aplicación, principalmente en la manufactura de piezas prefabricadas; es previsible un incremento en el uso de estos áridos ligeros.

7. Las propiedades de los áridos ligeros varían notablemente de unos a otros; y no es posible conocer la calidad de los mismos sólo con los datos: marca, tipo de material o proceso de fabricación.

En general, para el hormigón son más convenientes los áridos que en la capa superficial presenten una mayor consistencia.

8. La absorción de agua por los áridos ligeros es superior a la de la grava y arena; por lo que en los hormigones fabricados con aquéllos todavía es más importante el proceder a efectuar las correcciones debidas a su humedad.

## **cemento**

1. Existen cinco tipos de cemento:

- a. Tipo I: Cemento normal.
- b. Tipo II: Variante del anterior.
- c. Tipo III: Cemento de alta resistencia inicial.
- d. Tipo IV: Cemento de bajo calor de hidratación.
- e. Tipo V: Cemento Portland resistente a los sulfatos.

Los tipos IV y V son cementos especiales.

Al cemento se le puede añadir un agente aireante; en tal caso, se añade una "A" al número del tipo; por ejemplo, se escribirá: I-A, II-A, ...

2. Las propiedades del cemento varían con el tipo de molienda; incluso es posible apreciar variaciones en el producto obtenido en distintos días de los mismos molinos; lo que naturalmente deberá tenerse en cuenta, si el hormigón con él preparado va a ser utilizado como elemento resistente:

A causa de tales variaciones, es necesario, por tanto, mantener un control frecuente por medio de ensayos.

3. Cualquier tipo de cemento ha de cumplir las estipulaciones mínimas exigidas por las normas ASTM, debiéndose llevar a efecto los ensayos por ellas prescritas para realizar las mezclas; estos ensayos serán de gran utilidad para fijar la dosificación de cemento necesario para alcanzar una resistencia determinada.
4. El cemento se deberá conservar seco y exento de terrones.

## **agua**

1. El agua deberá ser limpia y estar exenta de sustancias perjudiciales. Como norma general el agua potable es buena para utilizarla en la confección del hormigón; la presencia de sal o azúcar la perjudica, así como la de un elevado contenido en hierro.

## determinación de la composición de las mezclas

1. La determinación de la composición de las mezclas no puede realizarse con ecuaciones y reglas; es, a la vez, un arte y una ciencia que exige experiencia y conocimiento de los materiales que entran en la composición.

2. La relación agua/cemento ha de ser la precisa para conseguir la resistencia requerida.

La consistencia y el tamaño máximo del árido se determinan de acuerdo con el uso a que va a ser destinado el hormigón.

3. Consideremos la mezcla separada en dos partes: 1.ª el agua y el cemento, y 2.ª la grava y la arena.

Para la 1.ª es necesario determinar la proporción de cemento y agua: conociendo la resistencia que debe alcanzar el hormigón, la relación agua/cemento se puede establecer a partir de unas curvas similares a las de la figura 4.

Para la 2.ª hay que hallar la proporción de grava y arena. La relación arena/grava más económica se obtiene cuando la cantidad de arena es estrictamente la necesaria para rellenar los huecos que quedan entre la grava; esta relación recibe el nombre de "óptima" y da lugar al máximo peso por unidad de volumen.

Con esta condición se determina la relación arena/grava; dicha relación óptima decrece al aumentar el tamaño máximo de la grava.

4. Una vez determinadas las relaciones agua/cemento y arena/grava, se añade al conjunto arena/grava cantidades de agua y cemento en la relación fijada, hasta conseguir la consistencia deseada.

5. El mortero, que se compone de arena, cemento y agua, actúa a modo de "lubricante" de la grava; este lubricante determina la docilidad de la mezcla.

Si la cantidad de mortero empleada es la estrictamente necesaria para llenar los huecos existentes entre la grava, la mezcla será económica, pero no habrá "lubricación".

Para obtener una buena docilidad, la grava debe "lubrificarse" con exceso de mortero, y la grava y arena, con exceso de pasta.

Resulta más económico, en el mortero, aumentar la cantidad de arena que la cantidad de pasta. Al llegar a este punto, la determinación de la composición de la mezcla se convierte en un arte, pues es imposible establecer reglas y ecuaciones para determinar las cantidades de arena y pasta a fin de obtener una docilidad adecuada, una facilidad de colocación y cualidades para un acabado correcto.

6. Para eliminar la aspereza, la cantidad de arena se deberá aumentar en un 10 % sobre su relación óptima; este aumento deberá ser menor cuando operemos con hormigones de menor consistencia.

7. Se pueden obtener como punto de partida unas primeras aproximaciones consultando el Manual de la Portland Cement Association "Design and Control of Concrete Mixtures" ("Determinación y control de mezclas de hormigón"); pero dichas aproximaciones han de corregirse, si queremos que el hormigón ofrezca las propiedades deseadas.

El Instituto Americano recomienda una serie de procedimientos standard para la determinación de las mezclas de hormigón, fundamentadas en las normas ACI standard 613-54 (áridos, arena y grava) y ACI standard 613A-59 (áridos ligeros).

Con objeto de facilitar el trabajo de corrección de las mezclas se dan a continuación algunas reglas prácticas:

- a) Por cada pulgada de descenso (diferencia entre la altura del molde y la altura del eje vertical de la muestra, después del ensayo) disminuir el contenido de agua en un 3 por 100.
- b) Por cada 1 % de aumento o disminución del aire ocluido, disminuir o aumentar el 1 % de arena.
- c) Por cada 1 % de aumento o disminución de arena, aumentar o disminuir el contenido de agua en el 1 por 100.

9. La resistencia del hormigón es función de la relación agua/cemento.

La docilidad del hormigón depende, a su vez, del contenido de agua, es decir, de la relación entre el peso del agua y el peso de la mezcla total, T.

Vemos, pues, que las dos relaciones importantes a tener en cuenta son a/c (agua/cemento) y a/T (agua/peso total), las cuales nos servirán como eficaces instrumentos para la determinación y control de las mezclas de hormigón, una vez conocidos adecuadamente los materiales que intervienen en ellas.

10. En principio, el fabricante es responsable de la calidad del hormigón, aunque el proyectista o usuario puedan exigir de ordinario que la mezcla se ajuste a ciertas normas; sin embargo, tales normas dejan siempre una relativa libertad para la realización de las mezclas, y el fabricante sigue siendo el responsable de la calidad del hormigón.

Pero si los usuarios imponen más condiciones: determinada granulometría, contenido de cemento, etc., en tales casos deben hacerse ellos responsables de la calidad, ya que al fabricante apenas le queda libertad para la realización de la mezcla.

## **dosificación**

1. La docilidad de las mezclas depende del contenido de agua, y puede controlarse por medio de la prueba de consistencia; sin embargo, cuando la consistencia es muy baja o nula, este tipo de control es inadecuado.

Los dos factores más importantes que hay que tener en cuenta al controlar la dosificación son:

- a) a/c (agua/cemento).
- b) a/T (agua/peso total).

2. El cemento y el agua han de pesarse con exactitud; los áridos no necesitan tanta precisión.

En función de la humedad de estos últimos se harán las oportunas correcciones en la dosificación, las cuales deberán efectuarse con la mayor precisión posible—lo mismo que las pesadas de agua—en el caso de hormigones de consistencia baja.

3. Otro factor importante que hay que tener en cuenta es la temperatura de los materiales durante la mezcla: una temperatura de 70° F es la ideal, siendo admisibles variaciones de 20° F por encima o por debajo de ese valor.

La temperatura se puede mantener sensiblemente constante durante la operación de mezclado, calentando o enfriando los materiales, especialmente el agua; en cualquier caso, la temperatura no debe sobrepasar nunca los 165° F.

Si fuese necesario calentar los áridos, en general será conveniente humedecerlos previamente para evitar pérdidas de consistencia.

4. En tiempo caluroso es posible regular la temperatura colocando los áridos y hormigoneras a la sombra, regando los primeros o bien aislando las conducciones y depósitos de agua; incluso se puede añadir hielo, lo cual es una práctica poco común.

## **mezclado**

1. El objeto de la mezcla es combinar íntimamente los materiales, pero cuidando que la segregación sea mínima.
2. El tiempo de mezclado es un factor importante, si bien no es posible dar reglas generales en este sentido. El tiempo “óptimo” depende del tipo de hormigonera; su determinación se lleva a cabo por medio de ensayos, y una vez hallado es necesario atenerse estrictamente a él.
3. La carga y descarga de la hormigonera depende del tipo de máquina, y de los materiales empleados.

## **resistencia del hormigón a lo largo del tiempo**

1. El valor de la resistencia máxima del hormigón es función de la relación agua/cemento y se alcanza cuando la reacción química entre el cemento y el agua ha terminado totalmente.

Como dicha reacción es muy lenta, es necesario evitar la evaporación del agua. Este es el objeto del curado del hormigón. Es preciso, además, tener presente que una vez evaporada el agua de la pasta, es muy difícil volver a introducirla de nuevo.

2. La resistencia del hormigón va aumentando progresivamente al mismo tiempo que avanza la reacción química; dicho aumento es muy rápido, sobre todo al principio.

Un hormigón del tipo I, curado convenientemente, alcanza el 45 % de su resistencia al cabo de un día, 60 % a los tres días, 70 % a los siete días, 90 % a los veintiocho y 95 % al año; a partir de este plazo el incremento de resistencia puede continuar, muy lentamente, casi indefinidamente.

En la figura 4 aparecen comparadas las resistencias del hormigón a los siete y veintiocho días.

3. El incremento de resistencia que experimenta un hormigón del tipo III es más rápido—al comienzo de fraguado—que el de uno del tipo I; sin embargo, a los veintiocho días las resistencias de ambos son prácticamente iguales.
4. El aumento más o menos rápido de la resistencia de un hormigón, y el valor de su resistencia máxima, dependen de la relación agua/cemento, del tipo de cemento empleado, temperatura y eficiencia del curado.

## **retracción y deformaciones lentas del hormigón**

1. Retracción es la disminución de volumen que sufre el hormigón debido a la pérdida de agua, y depende de la cantidad de pasta que contenga y de la relación agua/cemento. El aire ocluido no afecta a la retracción.
2. Las deformaciones lentas, debidas a las cargas que actúan sobre la estructura, son fenómenos similares al de la fluencia de un material viscoso sometido a una cierta carga. Dichas deformaciones dependen de diversas variables—cuya influencia todavía no ha sido determinada con exactitud—y son, en cierto modo, proporcionales a las tensiones a que está sometido el hormigón.
3. Tanto la retracción como las deformaciones lentas tienen una especial importancia en las piezas pretensadas, y los proyectistas han de tenerlas en cuenta en sus cálculos, ya que si bien se pueden disminuir dichas deformaciones, mediante el empleo de hormigones de alta calidad, sin embargo no es posible suprimirlas por completo.

## **adiciones**

1. Una adición es un material distinto de cemento, grava, arena y agua, que se incorpora al hormigón con objeto de modificar algunas de las propiedades de la mezcla o del hormigón endurecido.
2. Las adiciones normalmente utilizadas en piezas pretensadas son:
  - a) Agentes aireantes.
  - b) Fluidificantes.
  - c) Agentes que evitan la evaporación del agua.
3. Nunca se deberá usar el cloruro cálcico como adición en la fabricación de piezas pretensadas.
4. La utilización de las adiciones ha de controlarse cuidadosamente, ya que si su uso no es correcto pueden ser perjudiciales; también es posible que no constituya precisamente la solución más económica al problema específico que se trata de resolver.

# ENSAYOS DEL HORMIGÓN

## introducción

1. Los ensayos del hormigón—tanto fresco como endurecido—tienen por objeto:
  - a) Determinar las propiedades de la mezcla en estado plástico.
  - b) Determinar las propiedades del hormigón endurecido.
  - c) Controlar la uniformidad del hormigón.
  - d) Controlar la calidad de los materiales.
2. Es indispensable disponer de un personal adecuado para realizarlos; por otra parte, es de la mayor importancia el llevar un control frecuente de las distintas operaciones de fabricación del hormigón por medio de ensayos.

El control de calidad del hormigón se puede realizar por medio de una serie de procedimientos—ensayos—y la precisión obtenida depende de una serie de factores. Por lo expuesto se recomienda seguir paso a paso las normas ASTM, excepto en lo que se refiere al vibrado del hormigón, cuestión que se discutirá más adelante.

## fabricación de probetas cilíndricas

1. Los ensayos de compresión realizados sobre las probetas del hormigón con el que han sido fabricadas las piezas son especialmente importantes, ya que nos sirven para determinar el tiempo de destesado, y para rechazar o depreciar las piezas cuya resistencia a compresión—dada por el ensayo—sea menor de la exigida.

Por tanto, es necesario cuidar la fabricación y conservación de probetas para obtener resultados precisos.

2. En las probetas ordinarias, de 6 y 12 pulgadas, la dispersión obtenida en los ensayos no será mayor de 1/16 pulgadas y 1/4 de pulgada, respectivamente, y se tendrá en cuenta la relación entre la longitud de la probeta y su diámetro.

Los moldes cilíndricos deberán ser estancos. Aunque los moldes de papel tienen unas características aceptables, deberán cumplir ciertas condiciones de rigidez, y no son recomendables para el curado con vapor; los moldes estrechos deben proibirse.

3. Las muestras han de ser realmente representativas de la mezcla, y para conseguirlo deberán tomarse de la parte central de la cubeta o de la canaleta.

Se tomará una cantidad de la mezcla sensiblemente igual al doble de la necesaria para la fabricación de las probetas, debiendo mezclarse a mano, antes de la confección de las mismas. Es necesario proteger las muestras del sol y del viento.

De acuerdo con las normas ASTM, la pasta deberá colocarse en los moldes después de haber sido cogida antes de quince minutos.

4. Las normas en uso no permiten que se vibren las probetas; sin embargo, algunos técnicos opinan que es un buen procedimiento, en las bancadas en que se utilice la vibración de las piezas de hormigón.
3. La colocación de la pasta en los moldes cilíndricos debe realizarse en el mismo lugar donde van a ser almacenadas, al menos durante las primeras veinticuatro horas; no siendo conveniente tocarlas desde un plazo de media hora después de manufacturadas hasta las veinticuatro horas, o hasta que estén listas para el ensayo.

## curado de las probetas

1. Los ensayos mediante probetas tienen un doble objeto: por una parte, las probetas ordinarias se utilizan para controlar la calidad, uniformidad y resistencia a los veintiocho días del hormigón, y por otra, las probetas-testigo, extraídas de piezas ya fraguadas, sirven para determinar su resistencia antes de proceder al destesado.
2. El curado de las probetas ordinarias se debe realizar de acuerdo con las normas ASTM.
3. El segundo tipo de probetas—probetas-testigo—se extraen de la pieza, una vez terminado el período de curado, siendo conveniente elegir un lugar de la misma—para proceder a realizar la extracción—que haya tenido unas condiciones medias de curado.

## resistencia de las probetas

1. Según las últimas normas relativas al control del hormigón, se admite que una probeta de cada diez ensayadas dé una resistencia menor que la exigida; esta cuestión se fundamenta en ciertas consideraciones sencillas relativas a la curva de frecuencia y a la distribución de los máximos y mínimos (véase fig. 5).

Supongamos que dos fábricas producen hormigón de resistencia media 4.500 psi (316 kg/cm<sup>2</sup>) y que la resistencia del hormigón de la primera fábrica oscila entre 1.500 y 7.500 psi (105 y 527 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que la de la segunda fábrica fluctúa entre 3.800 y 5.200 psi (267 y 365 kg/cm<sup>2</sup>).

Si tenemos en cuenta solamente la resistencia media, ambas fábricas son satisfactorias; sin embargo, si la resistencia exigida por el cálculo es de 4.000 psi (281 kg/cm<sup>2</sup>), las 1.500 psi (105 kg/cm<sup>2</sup>) son del todo punto inadmisibles aunque existan probetas de 7.500 psi (527 kg/cm<sup>2</sup>).

La resistencia media del hormigón de la primera fábrica debería ser de 6.000 psi (422 kg/cm<sup>2</sup>) para que sólo el 10 % de los ensayos dieran una resistencia inferior a 4.000 psi (281 kg/cm<sup>2</sup>); en cambio, la segunda fábrica puede mantener una resistencia media de 4.500 psi (316 kg/cm<sup>2</sup>), y no obstante cumplir que sólo el 10 % de las probetas den resistencias inferiores a la exigida.

2. Un recrecimiento (sobrecapa) inadecuado de la probeta es a menudo causa de error en los ensayos.

A continuación se detallan algunos de los métodos corrientemente utilizados para realizar las capas extremas de la probeta:

- a) Superficie de tierra.
- b) Capas de cemento puro.
- c) Capas de yeso mate [admisible hasta 5.000 psi (351 kg/cm<sup>2</sup>)].
- d) Capas de compuestos de azufre [admisible hasta 8.000 psi (562 kg/cm<sup>2</sup>)].

El procedimiento más usado es el de las capas de compuestos básicos del azufre, que deben calentarse hasta la temperatura apropiada, recomendada por el fabricante; pero hay que tener presente que si se sobrepasa excesivamente, pueden destruirse las cualidades resistentes del material ensayado.

Los extremos de la probeta cilíndrica deberán estar limpios y secos; y si son excesivamente lisos, se les cincelará ligeramente con un escoplo para asegurar una buena adherencia entre la capa de cubierta y el hormigón.

Dichas capas conviene enfriarlas una media hora antes del ensayo, además han de ser lo más delgadas posibles, y no deben utilizarse más de una vez.

3. Las máquinas empleadas para realizar los ensayos deben calibrarse periódicamente, mantenerse correctamente, conservarse limpias, no sobrecargarse en los ensayos, y pueden ser manuales o totalmente automáticas.

El grado de precisión exigido a las máquinas de laboratorio—en las que el máximo error admisible es de 1 %—es superior al de las máquinas utilizadas a pie de obra—en el que el valor admisible es de un 2 por 100—.

4. El centrado de la probeta en la máquina debe ser lo más perfecto posible.

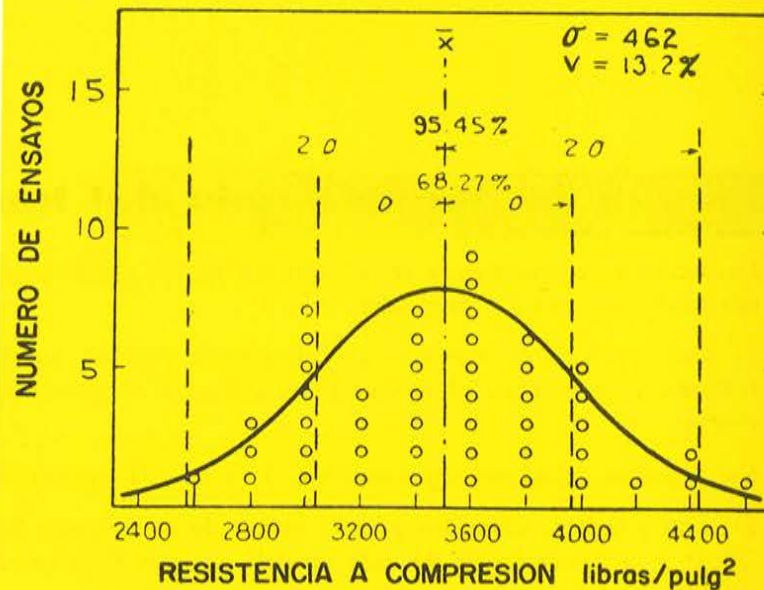
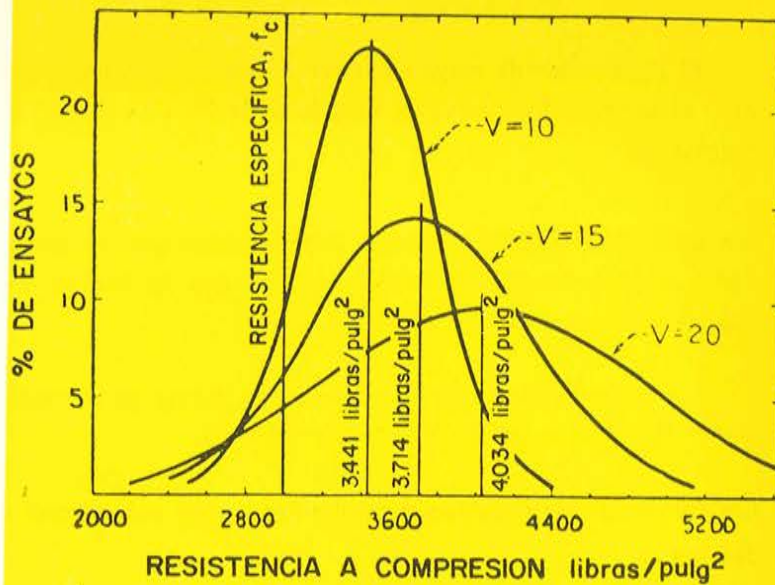


Fig. 5

El incremento de carga suele ser el correspondiente a un avance de 0,05 de pulgada por minuto si se trata de prensas de tornillo y de 20 a 50 psi (14 a 35 kg/cm<sup>2</sup>) por segundo en prensas hidráulicas.

5. Las probetas cilíndricas húmedas rompen antes que las secas, y las sometidas a temperaturas elevadas rompen también antes. Los ensayos han de llevarse a cabo, pues, en unas condiciones adecuadas de temperatura y humedad.

Las probetas extraídas directamente de piezas ya fabricadas deben ensayarse en unas condiciones similares a las de la pieza en cuestión.

6. Los valores de las resistencias resultantes suelen redondearse de forma que la cifra de las unidades sea un cero.

## ensayos de consistencia del hormigón

1. Los ensayos de consistencia se realizan con objeto de determinar y controlar la docilidad y el contenido de agua del hormigón.

No es posible considerarlos científicamente precisos, puesto que en ellos influyen numerosos factores, especialmente el humano; sin embargo, adecuadamente realizados, constituyen un buen control.

2. Las muestras deben ser representativas de la colada en cuestión.
3. El cono y la base utilizados para el ensayo de consistencia han de estar húmedos, pero no mojados; y la compactación de cada tongada en la probeta se realizará dando 25 golpes con la varilla apisonadora.

El molde—cono—se sacará levantándole con cuidado, en dirección vertical, lo más rápidamente posible.

No es necesario medir las alturas máximas o mínimas, sino sólo la media.

4. El ensayo de bola (Kelly) proporciona resultados similares al ensayo con el cono y es más fácil de realizar, y se puede efectuar en una cubeta cualquiera.

Las lecturas, en pulgadas, en la bola de Kelly, nos dan valores aproximadamente mitad de los correspondientes al ensayo de la prueba de asiento; es decir, una lectura de 2 pulgadas en la bola Kelly equivale a una de 4 pulgadas en la de asiento.

5. Por medio de los ensayos anteriores no es posible medir, de manera satisfactoria, el escurrimiento de un hormigón con un índice de consistencia bajo o nulo.

En estos casos se utiliza, con éxito, la mesa de sacudidas; pero hasta que se normalice este ensayo, deben ponerse de acuerdo el usuario y el fabricante sobre la forma de realizarlo para evitar posibles discusiones.

## **ensayos para la determinación del contenido de aire**

1. Las muestras han de ser representativas (no se debe utilizar el hormigón procedente del ensayo de consistencia).
2. Es necesario sacar del hormigón el aire existente no ocluido que pudiera enmascarar los resultados.

Para ello se pueden seguir tres métodos:

- a) Proceder a una adecuada colocación y compactación del hormigón por medio de una varilla pisonadora.
  - b) Golpear la parte exterior del recipiente con una maza recubierta de cuero.
  - c) Por adición de agua.
3. En general, la cantidad de aire ocluido oscila entre el 3 y el 7 %; valores inferiores al 3 % no representan ninguna ventaja respecto a la durabilidad, y valores superiores al 7 %, además de no producir un incremento en dicha durabilidad, determinan que la resistencia del hormigón disminuye al aumentar la cantidad de aire ocluido.

En casos especiales, el proyectista podrá exigir que el hormigón contenga un tanto por ciento de aire superior o inferior a los límites anteriormente mencionados.

## **martillo de impacto**

1. La aplicación de este tipo de ensayo, es particularmente importante en el hormigón prefabricado.

Los resultados obtenidos dependen del tipo de árido, de la humedad, y de la edad del hormigón, y no se deben realizar, por tanto, como sustitutivos de los ensayos de compresión.

2. Este ensayo, puede ser un instrumento muy útil para determinar, aproximadamente, la resistencia del hormigón y la uniformidad de dicha resistencia.

Un martillo, adecuadamente calibrado, puede servir para determinar la resistencia en el momento del destesado, lo que ofrece un particular interés cuando se trate de probetas extraídas de piezas que se encuentran en malas condiciones, o usadas.

## **informes de los ensayos**

1. Estos informes deben contener todos los datos del ensayo que se consideren pertinentes; asimismo deben constatar—es importante—cualquier otro factor o circunstancia de tipo especial.

En principio, esta información puede parecer excesiva o innecesaria, pero es posible que pasado algún tiempo, sea realmente útil e importante.

2. Estos informes deben archivarlos durante el mayor período de tiempo posible, al menos hasta los cinco años.

# COLOCACION Y CURADO DEL HORMIGON

## tolerancias

1. Este tema es causa frecuente de discusiones entre el fabricante y el usuario; dichas discordancias nacen generalmente: de que lo que el fabricante considera como "tolerancias razonables", desde el punto de vista del usuario, no son del todo "razonables".
2. Por tanto es recomendable establecer un acuerdo entre ambos antes de dar comienzo a la fabricación del hormigón; el proyectista debe estar familiarizado con las posibilidades del fabricante; y si, en algunos casos especiales, las tolerancias han de ser muy pequeñas, deben consignarse, de modo específico, en los planos o en el Pliego de Condiciones.
3. La determinación de las tolerancias deben llevarse a cabo entre el proyectista y el fabricante, y no ser fijadas independientemente por uno u otro.

## encofrados

1. Es necesaria una mayor precisión que la normal—en lo que se refiere a dimensiones—, en la preparación de los encofrados para la fabricación de algunos tipos de piezas prefabricadas, cuando se quiere lograr su adecuado acoplamiento a las piezas colindantes.

En estos casos, el proyectista debe especificar las tolerancias máximas, y los constructores no suelen poner dificultades, en este sentido, cuando dichas tolerancias son razonables.

El proyectista debe dar su conformidad en cada caso particular, y revisar los detalles de los encofrados, antes de proceder a la ejecución de las piezas.

2. Es posible que se produzcan ligeras variaciones de las dimensiones de las piezas cuando los encofrados estén ya llenos de hormigón, ya que los tabiques divisorios son especialmente susceptibles de experimentar cualquier movimiento.

El peso del hormigón, los trabajadores, o el equipo utilizador en las distintas operaciones y manipulaciones pueden causar desperfectos o imperfecciones en los encofrados, por lo que es recomendable que el área de maniobra sea lo suficientemente amplia.

Una vez producidos desperfectos, imperfecciones, alabeos, etc., en los moldes, es impropio forzarlos, para volverlos a su posición correcta, una vez que, por cualquiera de las causas anteriores, hayan adquirido unas características geométricas diferentes de las primitivas.

Las juntas deben ser estancas para evitar fugas y filtraciones, existiendo una serie de materiales que pueden servir perfectamente para el sellado de dichas juntas.

4. Los encofrados han de estar limpios y ligeramente engrasados antes de su utilización, y en el caso de que existan residuos adheridos a los mismos se procederá a eliminarlos; para ello se expondrán los encofrados, una vez limpios y engrasados, durante un día al sol, o bien se frotrará la parte afectada con parafina y keroseno.

Es muy importante trabajar con buenos encofrados, aunque suponga un mayor desembolso inicial, ya que resulta más barato que reparar posteriormente la superficie de hormigón.

Se dice que los tacos de madera utilizados para mantener las armaduras en su posición correcta son satisfactorios, si se pueden ir quitando a medida que va avanzando el hormigonado.

5. Los espaciadores de madera son buenos, siempre que se tomen las precauciones necesarias para retirarlos a medida que progresa el hormigonado.



Comprobación del espaciamiento vertical de los cables.

## **posición del acero en las piezas pretensadas**

1. Las plantillas que se colocan en los extremos de la bancada aseguran, normalmente, la posición correcta del acero de pretensado.
2. La tolerancia admisible respecto a la posición correcta en sentido vertical suele ser el 2 % del canto de la pieza, a no ser que el proyectista especifique otra distinta.
3. La tolerancia admisible en sentido horizontal, se determina a partir de los datos obtenidos en el cálculo de la pieza; en los casos corrientes, únicamente interesa en relación con el alabeo lateral o con el recubrimiento.
4. La posición de los puntos angulares en el cable puede variar, dentro de unos límites relativamente amplios, sin que sea perjudicial para la pieza.

Es misión del proyectista fijar la tolerancia admisible en tal sentido, si bien es indispensable que esté en consonancia con las posibilidades y condiciones de la bancada.

5. Es asimismo misión del proyectista fijar todas las tolerancias relativas a la posición del acero, en las piezas pretensadas.
6. Debe controlarse el tamaño y número de los alambres empleados.

## armaduras ordinarias

1. Las tolerancias admisibles en la posición de las armaduras ordinarias, se determinan normalmente en función de su misión resistente.

2. A veces, la posición de los estribos difiere en varias pulgadas de la teóricamente correcta en las piezas de gran canto, pero ello no afecta al comportamiento normal de la pieza.

En cambio, en las piezas de poco canto, la tolerancia en la separación de estribos ha de ser menor.

Estas tolerancias serán fijadas por el proyectista.

3. Si el objeto de la armadura es absorber el esfuerzo de flexión, la tolerancia en sentido vertical debe ser del 2 por 100.

En el caso de que la armadura esté tendida en línea recta desde un extremo al otro de la pieza, la tolerancia debe ser de  $\pm 1$  pulgada.

Para las barras levantadas, la tolerancia oscila entre  $+ 0$  y  $- 1/2$  pulgada; y para los estribos y armaduras de enlace, entre  $\pm 1/2$  pulgada.

4. Se colocará el suficiente número de espaciadores, con el fin de que las armaduras mantengan sus posiciones durante el hormigonado.

5. En el caso de que sea necesario efectuar algún empalme, se debe contar con la dirección o aprobación del proyectista.



Comprobación del hormigón armado.

## anclajes, ganchos y herrajes

1. Las tolerancias admisibles dependerán, en cada caso, del objeto de las mismas; en el caso de que dichas tolerancias sean pequeñas, deberán consignarse en los planos.

2. La colocación de los bulones de enclaje deberá realizarse con la máxima precisión.
3. Los conductos interiores, etc., deben colocarse de forma que no afecten a la resistencia de la pieza.
4. Los dispositivos de anclaje se colocarán de tal manera que no dificulten o impidan la operación de hormigonado, ni afecten a la armadura principal.
5. Los ganchos de madera pueden producir fisuras en el hormigón, por lo que es preferible utilizar los fabricados con poliestireno.
6. La situación de los ganchos elevadores, en piezas de poca importancia, no requiere gran precisión. Sin embargo, en el caso de que, por cualquier circunstancia, sea preciso lograr una gran precisión, deberá consignarse en los planos.
7. Deberán tomarse las oportunas medidas y precauciones, para que los ganchos y herrajes permanezcan bien sujetos en su posición.

## **hormigonado**

1. El transporte, colocación y vibrado del hormigón deben realizarse de forma que tanto la segregación como la pérdida de consistencia sean mínimas.

El transporte no requiere, por lo general, una consistencia del hormigón tan húmeda como la necesaria para su colocación; y debe realizarse lo más rápido posible.

2. Las pérdidas de consistencia, son debidas normalmente a alguna o algunas de las siguientes causas: tiempo insuficiente de mezclado, temperatura excesiva durante la mezcla, evaporación del agua, o un batido excesivo durante el transporte.

En tiempo seco y ventoso, es recomendable, e incluso puede llegar a ser necesario, cubrir la cubeta o recipiente con arpillera humedecida, al objeto de impedir pérdidas de consistencia.

3. En la colocación del hormigón juegan un papel importante la consistencia del mismo y el tiempo transcurrido entre la operación del mezclado y de colocación, ya que si éste es demasiado grande la mezcla se hará más densa y no consolidará adecuadamente.

El valor límite de la consistencia, es decir, aquel valor por encima del cual el hormigón no se puede consolidar, depende de la forma en que se haya de llevar a cabo su colocación; corrientemente, un incremento anormal y rápido de dicha consistencia suele ser ocasionado por algunas de las siguientes causas: por una evaporación excesiva de agua, absorción del agua por los áridos, una temperatura elevada de los distintos complementos, algún acelerador desconocido, o por las características del cemento.

Debe rechazarse todo hormigón cuya consistencia sea excesiva; y está prohibido el proceder a un nuevo mezclado con adición de agua.

4. El hormigón se debe colocar en capas—tongadas—de altura no superior a 1 ó 2 pies.

En el caso de que se utilicen encofrados estrechos y altos, la consistencia deberá aumentarse a medida que el hormigonado se va acercando al extremo superior de la pieza (el incremento de agua mantiene la calidad y durabilidad y hace mínima la decoloración).

5. La velocidad del hormigonado juega un papel importante, y hay que tenerla presente a fin de evitar que se formen juntas—por discontinuidad—entre dos tongadas sucesivas; la operación de hormigonado no debe efectuarse tan rápidamente que no permita una compactación adecuada.

## **vibración**

1. La compactación del hormigón debe llevarse a cabo por procedimientos que no produzcan una segregación apreciable.

Una vibración excesiva da lugar a la concentración de los áridos en la parte inferior y a un desplazamiento de la pasta hacia la superficie de la pieza; asimismo puede ser causa de la formación de bolsas de agua debajo de las armaduras, que disminuyan la adherencia de éstas con el hormigón. Y una vibración menor de la necesaria, da lugar a una compactación inadecuada.

2. La vibración es correcta, cuando la superficie de la pieza presenta un aspecto “vítreo” (consúltese el Manual de la Portland Cement Association “Vibración”, páginas 6 y 7).
3. La vibración del hormigón presenta un amplio campo para nuevas investigaciones, ya que los conocimientos actuales respecto a las dos variables—frecuencia y energía—son insuficientes.

El mejor vibrador, para cada caso específico, será aquél sancionado por la experiencia.

4. Los vibradores de inmersión son muy útiles para los trabajos normales, siempre que su forma de empleo sea sencilla; la calidad del trabajo depende entonces de la habilidad de los operarios que los manejen.

Los vibradores se deben introducir y manipular siempre en posición vertical, lenta y continuamente; no deben trasladarse horizontalmente a lo largo del hormigón, y debe evitarse su contacto con las armaduras y los encofrados, especialmente con los de madera, pues los deterioran fácilmente.

5. La compactación del hormigón se realiza de un modo más sencillo y adecuado, empleando vibradores externos, cuando se trata de una producción industrializada de piezas; será entonces necesario la elección cuidadosa de vibradores y encofrados, para que, en su momento, pueda lograrse una compactación uniforme.

En las plantas de pretensado, es muy corriente que la compactación obtenida no sea uniforme; por ello, actualmente, para conseguir dicha uniformidad, en la mayor parte de las plantas, se aplica un sistema de vibración mixto: vibración interna y externa.

6. En el caso de que la superficie de las piezas presentase un acabado defectuoso, deberá procederse a efectuar las correcciones oportunas en las diferentes fases de fabricación, variando el procedimiento de vibrado, el número de tongadas, la composición de la mezcla o la granulometría de los áridos.
7. No es aconsejable el empleo de un equipo de vibración cuyo mantenimiento y conservación no haya sido el adecuado, ya que puede originar problemas.
8. Las juntas originadas por la falta de continuidad en la operación de colocación del hormigón, no se permiten, normalmente, en las piezas pretensadas.

El hormigón que, por su distancia al vibrador, no ha quedado compactado, se debe reemplazar y vibrar de nuevo.

Si se para—o suspende—el hormigonado, cuando los encofrados están parcialmente llenos, el hormigón deberá ser cuidadosamente observado y controlado, para que, si fuera necesario, pueda ser preparada adecuadamente la junta, antes de que se produzca el fraguado total.

## curado de hormigones

1. La resistencia del hormigón aumenta, de un modo más rápido, en los ambientes sometidos a altas temperaturas, y saturados de humedad.
2. La mayoría de las plantas de pretensado utilizan vapor—a baja presión—para lograr un fraguado rápido del hormigón.

La eficiencia de dichas plantas y, consecuentemente, la economía que se deriva de la reducción del plazo necesario para la utilización de las piezas pretensadas fabricadas, depende de la velocidad con que se lleve a cabo, en las mismas, el curado del hormigón.

3. El proceso de curado debe ser bien planeado y cuidadosamente controlado.

El ciclo ideal a seguir dependerá del número de piezas que haya que fabricar, de las propiedades del cemento a emplear, del tipo de pretensado y de la temperatura ambiente durante el hormigonado.

Sin embargo, es recomendable que dicho ciclo se aproxime al siguiente:

a) Después de colocado y vibrado, debe hacerse posible que el hormigón tome su forma inicial antes de aplicar el vapor, ya que, de no hacerlo así, una temperatura elevada puede ocasionar pérdidas en su resistencia.

No obstante, si la temperatura ambiente es inferior a 50° F, podrá aplicársele el vapor suficiente para mantener el hormigón a una temperatura próxima a la que tenía durante la operación de colocación.

El tiempo de retardo depende del tipo de cemento utilizado, y de la temperatura máxima que se deba alcanzar en el hormigón; es recomendable—como orientación—un tiempo de unas 4 horas; si dicho plazo excediese de diez horas, el curado a vapor podría ser inútil.

b) El máximo gradiente térmico aceptable es aproximadamente de 45° F/hora.

Si se utilizan cables curvos serán necesarias, al menos, 4 ó 5 horas para alcanzar la temperatura máxima de curado; en determinados casos se podrá permitir un tiempo menor para evitar la fisuración.

c) La máxima temperatura de curado, que es recomendable para las piezas de gran canto con cables curvos, es la de 140° F; y para las piezas de poco canto, o piezas con cables rectos, es la de 165° F; el operar a temperaturas inferiores a la máxima, ofrece la ventaja de poder realizar con mayor facilidad el control.

El tiempo de curado será el necesario para alcanzar, en probeta, la resistencia suficiente para proceder al destesado.

d) Existen pocos datos referentes a la influencia del enfriamiento más o menos rápido de las piezas, después del curado al vapor.

El enfriado lento no da lugar a una disminución de la resistencia, ni tampoco se tienen datos de deterioros producidos por un enfriamiento rápido.

Una serie de medidas de la temperatura realizadas en el interior de piezas anchas han demostrado que el hormigón se enfría lentamente, aunque dichas piezas se expongan en una atmósfera fría, inmediatamente después de dar por terminada la operación de curado al vapor.

4. Es necesario impedir que se produzcan grandes variaciones en la temperatura del vapor.

Por ello, los termógrafos se utilizan frecuentemente para llevar un control adecuado de tales variaciones; sin embargo, las temperaturas deben ser comprobadas periódicamente por medio de termómetros manuales.

Es recomendable llevar un registro de temperaturas.

5. Para proceder a un rápido curado por calor del hormigón es muy útil la utilización del agua caliente.

Las mismas precauciones expuestas para proceder a la cura por vapor son aplicables al curado por agua caliente.

Debe procurarse que el agua no penetre en el hormigón; una suspensión de limo puede ser muy útil a este respecto.

## precauciones especiales

1. La presión del vapor será lo más uniforme posible en todos los puntos del hormigón de las piezas, o de las probetas.
2. Las probetas deberán estar sometidas a una temperatura media.
3. Al empezar una nueva serie de fabricación de piezas se debe hacer un estudio de temperaturas, y ensayar diferentes temperaturas y ciclos para establecer cuáles de ellas son las más convenientes.

Estas normas son la traducción literal de la publicación INS-109-60 «Inspection of Prestressed Concrete», de Prestressed Concrete Institute, de Chicago (U. S. A.), aparecida en noviembre de 1960. Sus autores son Jack R. Janney (1.ª parte) y Richard C. Elstner (2.ª parte). Agradecemos al P. C. I. la autorización concedida a la A. E. H. P. para su traducción al castellano y su publicación en esta Revista.

### RELACION AGUA/CEMENTO CONSTANTE

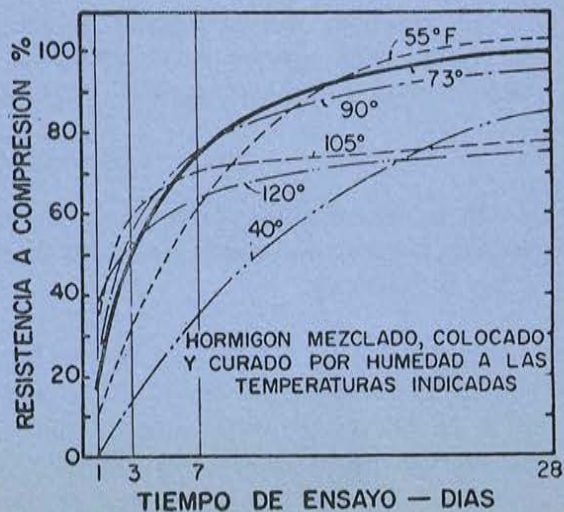
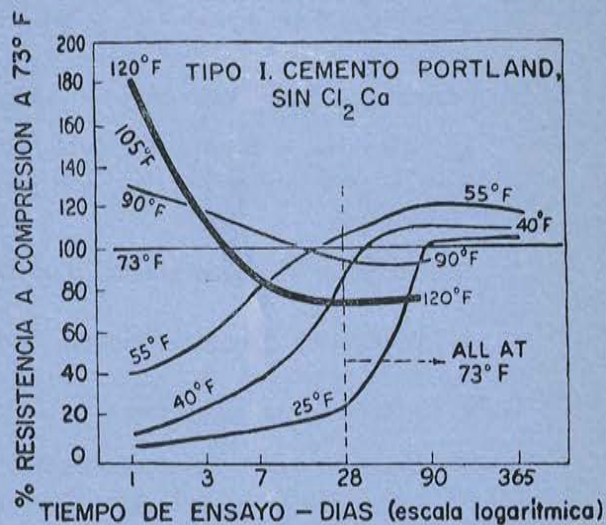


Fig. 6.—Efecto del curado por calor, en la resistencia.

## **circular n.º 68 de la F. I. P.**

### **V Congreso de la F. I. P.**

**París, 11 - 18 junio, 1966**

Para información de los diversos Grupos Nacionales, a continuación se indican los primeros detalles sobre el programa propuesto para el V Congreso de la F. I. P.:

SABADO 11 DE JUNIO:

**Inscripción.**

DOMINGO 12 DE JUNIO:

**Sesión de apertura.**

LUNES 13 DE JUNIO:

**Mañana: I Sesión técnica.**

**Tarde: II Sesión técnica.**

MARTES 14 DE JUNIO:

**Mañana: II Sesión técnica.**

**Tarde: Excursiones turísticas.**

MIÉRCOLES 15 DE JUNIO:

**Visitas técnicas.**

JUEVES 16 DE JUNIO:

**Mañana: III Sesión técnica.**

**Tarde: IV Sesión técnica.**

VIERNES 17 DE JUNIO:

**Mañana: V Sesión técnica.**

**Tarde: VI Sesión técnica.**

SABADO 18 DE JUNIO:

**Mañana: Sesión de clausura.**

**Noche: Banquete.**

Se está organizando un programa especial de visitas y excursiones turísticas, para las damas, durante el Congreso.

Para la semana siguiente al Congreso se prepara una serie de visitas más amplias; los cuatro primeros días (domingo a miércoles) se dedicarán a visitas técnicas y paseos turísticos, y para el resto de la semana los participantes podrán elegir entre una visita turística a Córcega y visitas a las grandes presas de los Alpes.

A continuación se indican algunos detalles complementarios sobre los temas de las distintas Sesiones técnicas:

#### **SESIONES TECNICAS**

**Sesión I:** Se dedicará a hacer una revisión de los diferentes trabajos de investigación que actualmente se están desarrollando en relación con el hormigón pretensado. Se tiene previsto limitar el número de conferenciantes a dos o tres eminentes especialistas de la investigación, cada uno de los cuales informará, resumidamente, acerca de los trabajos que se realizan dentro de su campo particular de actividades.

**Sesiones II y III:** Se dedicarán a informar sobre los trabajos realizados por las distintas Comisiones de la F. I. P. y los Comités especializados. Se espera que cada uno de ellos pueda presentar un informe sobre su propia actuación; estos informes serán sometidos a libre discusión entre los participantes.

**Sesiones IV a VI:** Se dedicarán a la descripción de las estructuras más destacadas terminadas a partir de la celebración del IV Congreso de la F. I. P. Se solicitará de los distintos Grupos Nacionales designen los ponentes que habrán de informar sobre las construcciones realizadas en sus respectivos países.

# estudio de secciones de hormigón armado sometidas a flexocompresión esviada, por medio de un computador digital

Francisco Morán Cabré, Ingeniero de Caminos

## introducción

Este trabajo forma parte de un programa de estudios emprendido en el Instituto Eduardo Torroja, conjuntamente por las Secciones de Teoría del Hormigón, de Cálculo Electrónico y de Ensayos, para la investigación del comportamiento elastoplástico de secciones de hormigón armado sometidas a flexocompresión esviada. Se pretende llenar el hueco existente en las normas actuales (entre ellas, la propia H. A. 61 del Instituto) en este tema poco conocido, ofreciendo al proyectista una serie de ábacos que abarquen las secciones que se le presentan con mayor frecuencia, o bien unas fórmulas de dimensionamiento lo suficientemente sencillas que los sustituyan; respaldados, tanto los unos como las otras, por los imprescindibles ensayos.

Dentro de este marco se estudia aquí un método general de análisis numérico del problema (admitiendo leyes cualesquiera de tensión-deformación para los materiales) especialmente adecuado para la elaboración de ábacos. El método exige el empleo del cálculo electrónico, por lo que se ha preparado un programa que se describe detalladamente. Se presentan, por último, como ilustración, dos de los ábacos obtenidos, a falta todavía de contrastación experimental, así como unos ejemplos numéricos que aclaran su empleo.

## 1. planteamiento general del problema

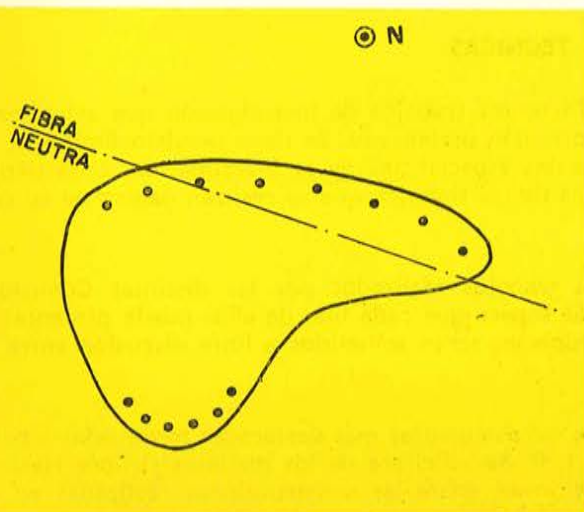


Fig. 1

El problema de la comprobación de una sección de hormigón armado sometida a una fuerza axial excéntrica, es el de la obtención de las tensiones normales en todos los puntos del hormigón y del acero cuya resultante debe ser la fuerza dada. Es necesario imponer algunas condiciones que limiten la indeterminación del problema, y entre ellas parecen lógicas las siguientes:

a) Una deformación que venga definida en cada punto de la sección en función de unos parámetros, que dependan de la magnitud y posición de  $N$ . Para simplificar la discusión nos referiremos, como es normal, a una ley del tipo  $\epsilon = k \cdot d$ , siendo  $d$  la distancia a una recta de deformación nula o fibra neutra (deformación

plana); pero asimismo podrían admitirse leyes más generales de deformación cilíndrica o de fibra neutra curva (deformación función de la posición del punto en la sección).

b) Unas leyes definidas de tensión-deformación para el acero y para el hormigón. Estas leyes no es necesario que sean rectas (Hooke), birrectilíneas o parabólicas; en general, deberán ser los diagramas reales de los materiales en flexocompresión, y pueden variar en distintos puntos de la sección. Podemos admitir también que el hormigón a tracción está fisurado, y por tanto que no trabaja, a partir de una cierta deformación.

Admitidas estas hipótesis, la resolución del problema queda reducida a la determinación de los parámetros mencionados. En el caso de deformación plana, tales parámetros podrían ser dos que nos fijaran la posición de la fibra neutra y un tercero que nos diera la deformación en un punto, fuera de ella; o bien, las deformaciones en tres puntos no alineados, ya que, conocidos éstos, en virtud de a) conocemos la deformación en todos los puntos y en virtud de b) conocemos también las tensiones. Estas tensiones han de tener como resultante la fuerza de partida, lo que nos da tres condiciones de equilibrio, con lo que parece que el problema está, en general, determinado (de acuerdo con la intuición mecánica que nos dice que su solución debe ser única), si el número de parámetros independientes es tres.

Sin embargo, en el caso general de leyes de tensiones—deformaciones no analíticas y de secciones de forma cualquiera, estas condiciones no pueden expresarse por medio de ecuaciones en los parámetros escogidos, y aun en el caso de admitir leyes lineales y secciones rectangulares, resultan ecuaciones demasiado complicadas—desde luego no lineales—para permitir la resolución directa del sistema, y es necesario abordar una resolución iterativa, por lo general engorrosa.

Una alternativa a la resolución numérica del problema planteado, aplicable incluso en los casos más complejos, se encuentra en la construcción de un esquema analógico que represente el fenómeno. En esta línea se encuentra el llamado “esquema de los émbolos” (1).

## **2. método propuesto de estudio numérico sistemático de la sección**

La resolución numérica iterativa exigirá:

— Un criterio más o menos ingenioso que permitiera la obtención rápida de unos valores iniciales de los parámetros, suficientemente aproximados.

— Un criterio de corrección aplicable a esos valores aproximados iniciales, para conseguir que, una vez obtenida, a partir de los mencionados valores, la distribución de tensiones y su resultante (la cual, en general, no coincidirá en magnitud y posición con la de partida), la resultante obtenida a partir de los valores corregidos de los parámetros se aproxime, en posición y magnitud, a la de partida. Este criterio de corrección se aplicaría entonces iterativamente, hasta lograr una aproximación aceptable.

Se comprende que para ajustar los tres parámetros, el número de tanteos necesario ha de ser forzosamente elevado, aun cuando dispusiéramos de buenos criterios de aproximación inicial y de corrección. Ello nos induce a pensar en la posibilidad de un tanteo sistemático de la sección que podría realizarse en la forma siguiente:

---

(1) Ver J. NADAL, «Esquema analógico aplicable a secciones de hormigón armado», Informes de la Construcción 158, marzo 1964.

— Variar en primer lugar, y con intervalos regulares, la deformación en un punto fijo,  $\varepsilon_0$ .

— Para cada  $\bar{\varepsilon}_0$  fija, variar metódicamente los parámetros que fijen la posición de la fibra neutra; por ejemplo, la deformación en otro punto,  $\varepsilon_1$ , y el ángulo  $\alpha$  con una recta dada. Obtendríamos así, para cada pareja de valores de estos parámetros, una resultante, definida en magnitud y posición, con lo que tendríamos valores particulares de una función  $N = N(x, y)$  que hace corresponder a cada punto del plano, definido por sus dos coordenadas  $(x, y)$ , el valor que ha de tener la fuerza supuesta situada en él para producir la deformación  $\varepsilon_0$ . Si variamos los parámetros de forma que los puntos  $(x, y)$  en que tenemos definida  $N$  cubran con cierta regularidad una región del plano, podremos interpolar, con buena aproximación entre ellos, las curvas de nivel de la superficie que representa dicha función (1). Obtenido este diagrama, es inmediato hallar, dado un punto cualquiera en dicha región, la  $N$  correspondiente, y en particular  $\bar{N}$ , que corresponde a la posición  $(\bar{x}, \bar{y})$  de la fuerza de partida. Análogamente hallaríamos los valores  $\bar{\varepsilon}_1$  y  $\bar{\alpha}$  para  $(\bar{x}, \bar{y})$ .

Tenemos, en definitiva, una serie de valores  $\bar{\varepsilon}_0$  y los correspondientes  $\bar{\varepsilon}_1$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{N}$ . Interpolando a la inversa, podemos hallar  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$  y  $\alpha$  para la  $N$  dada, con lo que el problema queda resuelto.

Es evidente que el número de tanteos a realizar será, en general, mayor que el necesario para una resolución iterativa; sin embargo, el método tiene la ventaja de una mayor sencillez y generalidad, y la de permitir el estudio completo de la sección, puesto que, una vez hechos los diagramas, puede interpolarse sin variación para otros valores de  $N$ ,  $x$ ,  $y$ . Permite también este método visualizar claramente y analizar en detalle el comportamiento de la sección.

El método resulta, por otra parte, especialmente adecuado para su programación para el cálculo electrónico, por sus características de planteamiento simple y general y por su gran volumen de operaciones.

### 3. aplicación al estudio de secciones rectangulares de hormigón armado

En lo que sigue se describe, como aplicación de lo anterior, un programa para el cálculo electrónico de secciones rectangulares de hormigón armado. El programa está escrito en ALGOL, lenguaje moderno que tiene grandes ventajas para técnicos y científicos no especializados en programación, por ser más humano, comprensible y universal, y permitir la ejecución de programas rápidamente y sin errores (2). Mediante pequeñas modificaciones en la entrada y salida, el programa puede ser ejecutado en cualquier computador de mediana capacidad que tenga traductor de ALGOL. Originalmente ha sido escrito para un computador NCR ELLIOTT 803 B.

(1) Para ello es útil variar el ángulo  $\alpha$ , y para cada ángulo  $\bar{\alpha}_0$  fijo mover la fibra neutra paralelamente a sí misma variando  $\varepsilon_1$ ; con ello, los puntos  $(x, y)$  obtenidos están prácticamente alineados para secciones normales, y parece lógico interpolar entre ellos los puntos correspondientes a valores redondos de  $N$  de las distintas curvas de nivel.

(2) Una iniciación práctica al ALGOL puede adquirirse en: WOOLDRIDGE-RACLIFFE, «An Introduction to Algol Programming, English Universities Press», 1963.

```

FLEXION ESVIADA IC'
BEGIN INTEGER N,M,P,Q,R,NANG' REAL GH,GA' READ N,M,P,R,Q,GH,GA,NANG'
  BEGIN INTEGER I1,I,J,K' REAL A,B,C,EPS,AA,CC,F,FN,MX,MY,X1,X2,Y1,Y2,B1,H1,RAD,S,F1,EPSA,EPBS,I1,I11'
  ARRAY X,Y(1:N),DEFH,TENH(1:M),DEFA,TENA(1:P),AN,AMX,AMY(1:Q),NENT,XF,YF(1:R),XXF,YYF(1:NANG,1:R),ANG(1:NANG)'
5 SWITCH SS=S1,S3'

  REAL PROCEDURE INTERP(TABLAX,TABLAY,N,DATOX)' VALUE N,DATOX' INTEGER N' REAL DATOX' c ARRAY TABLAX,TABLAY'
  BEGIN INTEGER I,J' J:=1'
  FOR I:=2 STEP 1 UNTIL N-1 DO BEGIN IF TABLAX(I) LESSEQ DATOX THEN J:=I END'
  INTERP:=TABLAY(J)+(DATOX-TABLAX(J))*(TABLAY(J+1)-TABLAY(J))/(TABLAX(J+1)-TABLAX(J))'
10 END'

  PROCEDURE INTERC(DATOX,RESY,TABLAX,TABLAY,N,M)' VALUE N,M' INTEGER N,M' ARRAY DATOX,RESY,TABLAX,TABLAY'
  BEGIN INTEGER I'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL N DO RESY(I):=INTERP(TABLAX,TABLAY,M,DATOX(I))'
  END'

15 PROCEDURE TRIH(B,H,EPS,X,Y,X1,Y1,MAS)' VALUE B,H,EPS,X,Y,X1,Y1' REAL B,H,EPS,X,Y,X1,Y1' BOOLEAN MAS'
  BEGIN FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 10 DO
  BEGIN F:=B*H|1000*(95-10*(1-1))*INTERP(DEFH,TENH,M,(10*(1-1)+5)*EPS|100)'
  IF NOT MAS THEN F:=-F'
  FN:=FN+F'
20 MX:=MX+F|2*(X1-X)*(95-10*(1-1))|100+F*X'
  MY:=MY+F|2*(Y1-Y)*(95-10*(1-1))|100+F*Y'
  END'
  END'

  PROCEDURE FUERZA'
25 BEGIN C:=-EPS|EPBS' AA:=TAN(ANG(I1))' CC:=-AA*X(1)|(1+C)+Y(1)|(1+C)'
  X1:=CC|AA' Y1:=CC' X2:=-CC-B|AA' Y2:=AA*A+CC'
  FN:=MX:=MY:=0'
  B1:=SQRT(X1*X1+Y1*Y1)' H1:=X1*Y1|B1' TRIH(B1,H1,EPBS,0,0,X1,Y1,TRUE)'
  IF X1 GR A THEN TRIH(B1*Y2|Y1,H1*Y2|Y1,EPBS*Y2|Y1,A,0,X1,Y2,FALSE)'
30 IF Y1 GR B THEN TRIH(B1*X2|X1,H1*X2|X1,EPBS*X2|X1,0,B,X2,Y1,FALSE)'
  IF X2 GR A AND Y2 GR B THEN TRIH(B1*(X2-A)|X1,H1*(X2-A)|X1,EPBS*(X2-A)|X1,A,B,X2,Y2,TRUE)'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL N DO
  BEGIN F:=IF AA*X(1)-Y(1)+CC GR 0 THEN INTERP(DEFA,TENA,P,EPBS*(AA*X(1)-Y(1)+CC)|CC)*S
  ELSE -INTERP(DEFA,TENA,P,-EPBS*(AA*X(1)-Y(1)+CC)|CC)*S'
35 FN:=FN+F' MX:=MX+F*X(I)' MY:=MY+F*Y(I)'
  END'
  END'

  RAD:=3.1416|180'
40 FOR I:=1 STEP 1 UNTIL M DO BEGIN READ DEFH(I),TENH(I)' TENH(I):=TENH(I)|GH END'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL P DO BEGIN READ DEFA(I),TENA(I)' TENA(I):=TENA(I)|GA END'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL R DO READ NENT(I)'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL NANG DO BEGIN READ ANG(I)' ANG(I):=-ANG(I)*RAD END'
  S1: READ A,B,F1,S,EPBS' FOR I:=1 STEP 1 UNTIL N DO READ X(I),Y(I)'
  S3: PRINT ££L6?£S26?B=?,SAMELINE,FREEPOINT(2),A,££L7£S26?B=?,B,££L7£S23??,DIGITS(2),N,£ 0 ?,ALIGNED(2,1),I1,££L2??'
45 K:=0' EPSA:=-250'
  FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL NANG DO
  BEGIN SWITCH SSS:=S2' K:=K+1'
  FOR EPS:=EPSA STEP 10 UNTIL .85*EPBS DO BEGIN FUERZA' EPSA:=EPS' IF FN GR 0 THEN GOTO S2 END'
  S2: J:=0' I1:=(.85*EPBS-EPSA)*.4|(Q-1)' I11:=3*11|(Q-2)' I1:=11-111'
50 FOR EPS:=EPSA STEP 11 UNTIL .85*EPBS DO
  BEGIN FUERZA' J:=J+1' I1:=11+111'
  AN(J):=FN' AMX(J):=-MX|FN+.5*A' AMY(J):=-MY|FN+.5*B'
  END'
  INTERC(NENT,XF,AN,AMX,R,Q)' INTERC(NENT,YF,AN,AMY,R,Q)'
55 FOR I:=1 STEP 1 UNTIL R DO BEGIN XXF(K,I):=XF(I)' YYF(K,I):=YF(I)' END'
  END'
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL R DO
  BEGIN PRINT ££L??,FREEPOINT(3),NENT(I),££S2??'
  FOR J:=1 STEP 1 UNTIL NANG DO PRINT SAMELINE,FREEPOINT(3),XXF(J,I),££S??' PRINT ££L?£S7??'
60 FOR J:=1 STEP 1 UNTIL NANG DO PRINT SAMELINE,FREEPOINT(3),YYF(J,I),££S??'
  END'
  IF BUFFER(1,£*) THEN GOTO S1'
  IF BUFFER(1,£+?) AND EPBS LESS 55.1 THEN BEGIN EPBS:=EPBS+5' GOTO S3' END'
  STOP
65 END
END'

```

Fotocopia del programa

### **3. 1. hipótesis admitidas y limitaciones del programa**

- Sección rectangular.
- Número y posición de armaduras arbitrarios. El tipo de acero no cambia dentro de la misma sección, así como tampoco el diámetro de las barras.
- Ley de deformaciones plana.
- Leyes cualesquiera de tensión-deformación para el hormigón y el acero, pero constantes en la sección. En la práctica, el programa opera con leyes poligonales de tantos lados como se quiera. Para deformaciones de tracción se supone nula la tensión en el hormigón, y la del acero se toma igual, salvo en signo, a la correspondiente a la misma deformación supuesta de compresión.
- El programa no es válido para posiciones de la fibra neutra paralelas a los ejes coordenados; y para posiciones muy próximas es menos aproximado.
- El programa presupone que una de las cuatro esquinas de la sección es la más comprimida, con lo que sólo permite estudiar un cuadrante. Entrando en él cambiando los ejes coordenados, se puede, sin embargo, estudiar todo el plano (ábaco núm. 1).

### **3. 2. datos del programa**

- Tabla de valores tensión-deformación del hormigón (fig. 6).
- Idem del acero (fig. 7).
- Valores de  $N$  para los que se desean las curvas de nivel. Estos valores han de ser positivos (compresión).
- Valores del ángulo  $\alpha$  que forma la fibra neutra con el lado de la sección paralelo al eje X. Para cada valor distinto de  $\bar{\alpha}$  obtendremos un punto de cada curva de nivel.
- Número de posiciones de la fibra neutra a estudiar para cada  $\bar{\alpha}$ , y entre los que se interpolarán los puntos de las curvas de nivel. Aumentando este número, así como el de valores de  $\alpha$ , obtendremos una mayor precisión en el dibujo de las curvas.
- Dimensiones de la sección.
- Número, diámetro, sección y coordenadas de las armaduras.
- Deformación inicial del hormigón en la esquina más comprimida.

### **3. 3. resultados**

Son, para cada valor redondo de  $N$  prefijado, tantos puntos de la curva de nivel correspondiente como ángulos distintos se fijaron. Estos puntos vienen establecidos por sus coordenadas, referidas al centro de la sección.

El programa da, pues, los datos suficientes para el dibujo de las curvas de nivel de la superficie  $N = N(x, y)$  correspondiente a la  $\epsilon_0$  inicial. Posteriormente el programa hace, si se desea,

$\varepsilon_0 = \varepsilon_0 + 5 \times 10^{-4}$  y calcula análogamente el diagrama para el nuevo  $\bar{\varepsilon}_0$ , y así sucesivamente hasta llegar a  $\varepsilon_0 = 55 \times 10^{-4}$ , que se ha tomado arbitrariamente como cota superior de la máxima deformación del hormigón en agotamiento (1).

Aunque el programa da los puntos de cada curva de nivel que corresponden a los ángulos  $\bar{\alpha}$  prefijados, no permite fijar en cada caso la posición de la fibra neutra, pues no da el valor del parámetro  $\bar{\varepsilon}_1$  (en este caso, la deformación en la armadura más traccionada). Sería inmediata una adaptación del programa para dar como resultado este valor que interviene en el cálculo.

Si se desea, después de terminar el estudio de una sección, el programa puede iniciar automáticamente el de otra en la que cambien las dimensiones y las armaduras.

### 3. 4. variables que intervienen (líneas 2 a 5 del programa)

$N$  = número de armaduras de acero.

$M$  = número de vértices de la poligonal que define la función tensión-deformación del hormigón.

$P$  = ídem del acero.

$R$  = número de curvas de nivel (valores redondos de la resultante) a calcular.

$Q$  = número de puntos a hallar para cada  $\bar{\alpha}$  para interpolar entre ellos las curvas anteriores.

$NANG$  = número de ángulos  $\bar{\alpha}$  = número de puntos a obtener de cada curva.

$GH$  = coeficiente por el que se desea dividir los valores de las tensiones en la curva tensión-deformación del hormigón (si no se desea alterar, basta hacer  $GH = 1$ ).

$GA$  = ídem del acero.

$H, I, J, K$  = variables enteras auxiliares.

$A, B$  = dimensiones de la sección (en  $m$ ) paralelamente a los ejes  $x$  e  $y$ .

$EPSB$  = deformación del hormigón en la esquina más comprimida (origen de coordenadas), en  $10^{-4}$

$EPS$  = deformación del acero en la armadura más alejada de  $O$ . En tracción  $EPS < 0$ .

$EPSA$  = variable auxiliar que toma el valor de  $EPS$ .

$$C = -\frac{EPS}{EPSB} \left. \begin{array}{l} \\ AA = \text{tang } \alpha. \end{array} \right\} \text{ parámetros que fijan la posición de la f. n.}$$

$CC$  = variable auxiliar para el cálculo de  $X1, Y1, X2, Y2$ .

$X1, Y1, X2, Y2$  = coordenadas variables de los cuatro puntos en que la f. n. corta a los lados de la sección (ver fig. 4).

$B1, H1$  = hipotenusa y altura del triángulo, que forma la f. n. con los ejes coordenados.

(1) El valor establecido por el C. E. B. para deformación en agotamiento del hormigón en flexión recta, de  $35 \times 10^{-4}$ , podría resultar insuficiente para la flexión esviada.

$RAD = \frac{\pi}{180}$  constante numérica para el paso de grados a radianes.

$F$  = término de una sumatoria para obtener la fuerza axil.

$FN$  = valores sucesivos de dicha sumatoria.

$MX$  = valores de la sumatoria del momento de dicha fuerza con respecto al eje  $y$ .

$MY$  = valores respecto al eje  $x$ .

$S$  = sección de una armadura, en  $m^2$ .

$FI$  = diámetro de una armadura, en  $mm$ .

$I1, I11$  = variables enteras auxiliares.

$X, Y$  = matrices columnas que contienen las coordenadas de las  $N$  armaduras.

$DEFH, TENH$  = matrices que contienen las coordenadas de los vértices de la poligonal que representa la curva tensión-deformación del hormigón. Las deformaciones están en  $10^{-4}$  y las tensiones en  $t/m^2$ .

$DEFA, TENA$  = matrices del acero.

$AN, AMX, AMY$  = matrices columnas auxiliares donde se almacenan los  $Q$  resultados de  $FN, MX, MY$ , para un  $\bar{\alpha}$  y  $Q$  valores distintos de  $EPS$ . Los resultados de  $MX, MY$  se transforman previamente en excentricidades referidas al centro de la sección.

$NENT$  = matriz columna que contiene los  $R$  valores redondos de la resultante correspondiente a las curvas de nivel pedidas.

$XF, YF$  = matrices columna con las coordenadas respecto al centro de la sección de los puntos de las  $R$  curvas de nivel correspondientes a un  $\bar{\alpha}$ , obtenidos interpolando en  $AN, AMX, AMY$ .

$XXF, YF$  = matrices de  $NANG$  filas y  $R$  columnas donde se almacenan los resultados de  $XF, YF$  para los diferentes  $\bar{\alpha}$ .

$ANG$  = matriz columna con los  $NANG$  valores de  $\alpha$ .

$S1, S2, S3$  = puntos de referencia del programa.

### 3. 5. procedimientos usados en el programa

#### 3. 51. procedimiento INTERP (líneas 6 a 10)

Es un procedimiento standard usado para interpolar linealmente en una función  $y = f(x)$  definida mediante una serie de  $N$  puntos cuyas coordenadas vienen dadas por las matrices columna  $TABLAX, TABLAY$ , para un valor cualquiera de la  $x$ ,  $DATOX$  (fig. 2).

Se requiere que los valores de  $TABLAX$  estén ordenados de menor a mayor. Si  $DATOX$  cae fuera del intervalo  $TABLAX(1)-TABLAX(N)$ , se extrapola en el intervalo inicial o final, no emitiéndose ninguna indicación de alarma.

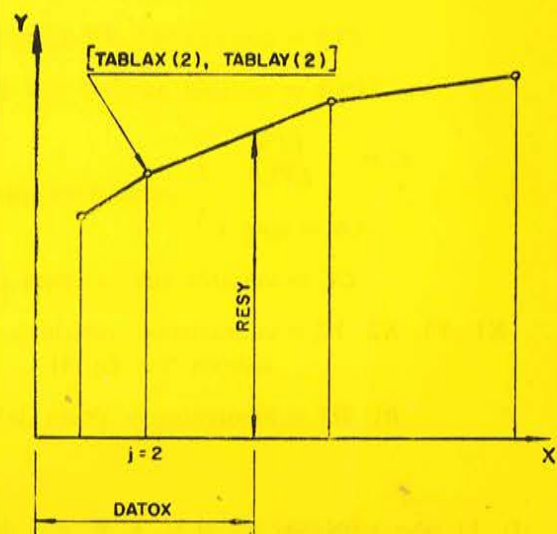


Fig. 2

$I, J$  son variables enteras locales auxiliares.  $J$  toma el valor del subíndice correspondiente al valor de  $TABLAX$  inmediatamente inferior a  $DATOX$ , hallado el cual se interpola linealmente entre  $[TABLAX (J), TABLAY (J)]$  y  $[TABLAX (J + 1), TABLAY (J + 1)]$ .  $I$  sirve para el cálculo de  $J$ .

### 3. 52. procedimiento INTERC (líneas 11 a 14)

Es una generalización del anterior para interpolar sucesivamente los elementos de una matriz columna de  $N$  elementos  $DATOX$ , obteniendo la matriz correspondiente  $RESY$ . Usa como procedimiento auxiliar el anterior.

$I$  es otra variable local auxiliar entera que toma sucesivamente los valores de 1 a  $N$ .

### 3. 53. procedimiento TRIH (líneas 15 a 23)

Este procedimiento suma o resta a  $FN, MX, MY$ , la resultante de las tensiones en una sección triangular de hormigón, y los momentos de dicha resultante con respecto al origen de coordenadas, respectivamente.

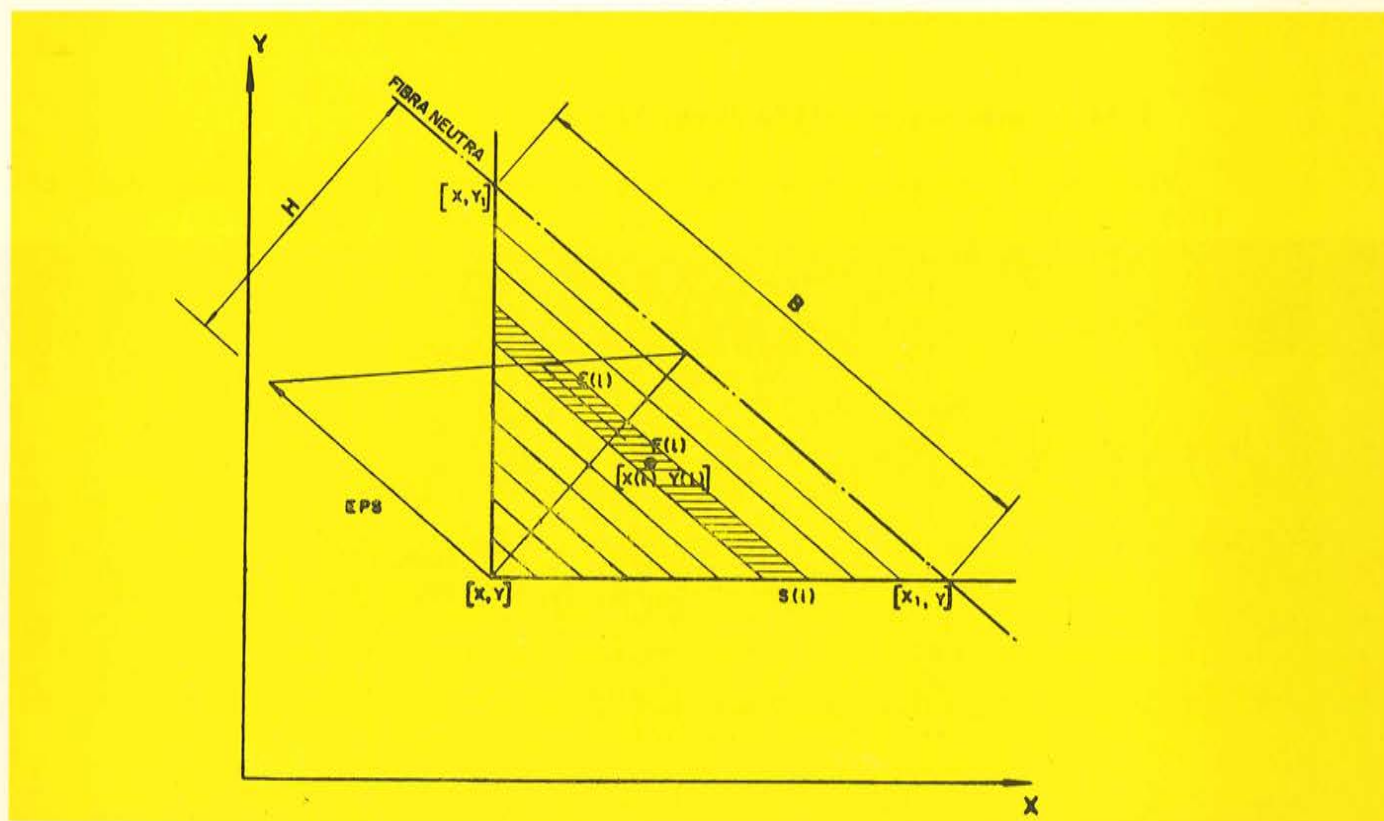


Fig. 3

Se supone que un lado del triángulo de hormigón coincide con la f. n., y que los otros dos son paralelos a los ejes coordenados (fig. 3).

Son parámetros de entrada:

—  $B, H, X, Y, X1, Y1$ , como se ven en la figura 3.

—  $EPS$ , deformación máxima del hormigón en el triángulo.

—  $MAS$ , variable booleana. Si  $MAS = VERDADERO$ , el procedimiento suma, y si  $MAS = FALSO$ , resta.

El procedimiento consiste en dividir el triángulo en diez trapecios en los que se supone  $\epsilon = \epsilon(i) =$  cte., y sumar los elementos de  $FN$ ,  $MX$ ,  $MY$  para todos ellos con arreglo a las fórmulas:

$$FN = \sum_1^{10} F(i), \quad MX = \sum_1^{10} F(i) \cdot X(i), \quad MY = \sum_1^{10} F(i) \cdot Y(i),$$

$$F(i) = \pm S(i) \cdot \sigma[\epsilon(i)]$$

$$\text{con } \begin{cases} S(i) = B(i) \frac{H}{10} = \frac{H}{1000} \cdot B \cdot [95 - 10(i-1)], \\ \epsilon(i) = \frac{EPS}{100} [5 + 10(i-1)], \quad \sigma[\epsilon(i)] = \text{INTERP} [DEFH, TENH, M, \epsilon(i)], \end{cases}$$

$$X(i) = \frac{X1 - X}{2} \cdot \frac{95 - 10(i-1)}{100} + X,$$

$$Y(i) = \frac{Y1 - Y}{2} \cdot \frac{95 - 10(i-1)}{100} + Y.$$

### 3. 54. procedimiento FUERZA (líneas 24 a 37)

Este procedimiento constituye el núcleo principal del programa. Su papel es el de, dados  $EPS$ ,  $EPSB$ ,  $\alpha(i)$ , hallar  $FN$ ,  $MX$ ,  $MY$  totales de la sección de hormigón y armaduras.

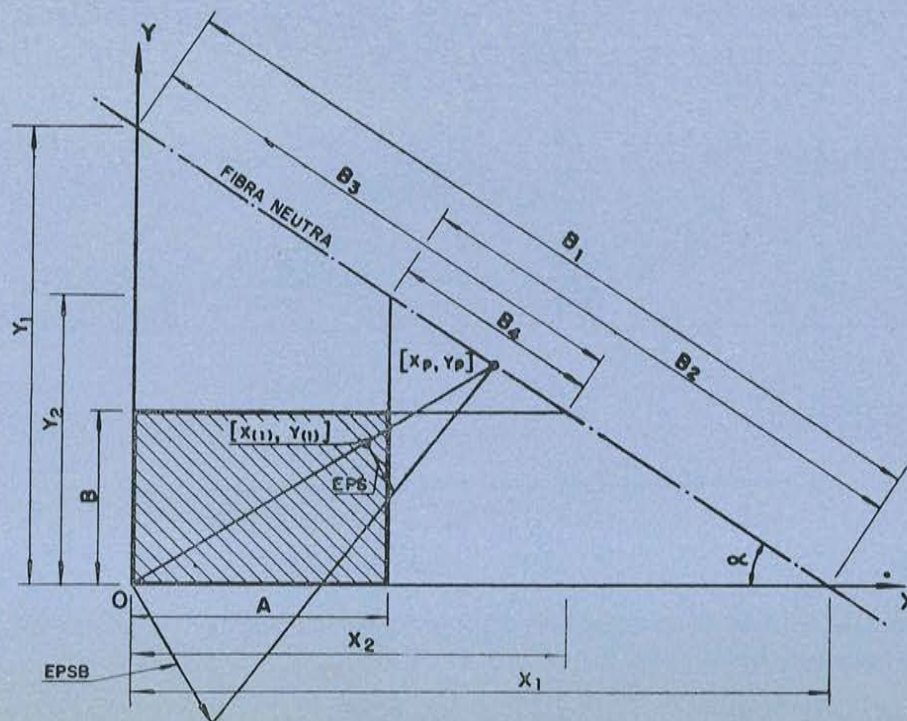


Fig. 4

Se hallan primero las coordenadas de los puntos de intersección de la f. n. con los lados de la sección (fig. 4):

$$C = -\frac{EPS}{EPSB}, \quad AA = tg[\alpha(i)],$$

$$X_p = -\frac{X(1)}{1+C}, \quad Y_p = \frac{Y(1)}{1+C}, \quad CC = -AA \cdot X_p + Y_p,$$

$$X1 = -\frac{CC}{AA}, \quad Y1 = CC, \quad X2 = -\frac{(CC-B)}{AA}, \quad Y2 = AA \cdot A + CC.$$

Para hallar la resultante de las tensiones del hormigón se observa que, en el caso más complicado, el de la figura 4, puede obtenerse sumando y restando triángulos, unos de cuyos lados es la f. n. y los otros son paralelos a los ejes.

$$t1: B1 = \sqrt{X1^2 + Y1^2}, \quad H1 = \frac{X1 \cdot Y1}{B1}, \quad EPS = EPSB \quad \text{positivo}$$

$$\text{si } X1 > a, \quad t2: B2 = B1 \frac{Y2}{Y1}, \quad H2 = H1 \frac{Y2}{Y1}, \quad ESP = EPSB \frac{Y2}{Y1} \quad \text{negativo}$$

$$\text{si } Y1 > b, \quad t3: B3 = B1 \frac{X2}{X1}, \quad H3 = H1 \frac{X2}{X1}, \quad EPS = EPSB \frac{X2}{X1} \quad \text{negativo}$$

$$\text{si } (X2 > A) \text{ y } (Y2 > B), \quad t4: B4 = B1 \frac{X2-A}{X1}, \quad H4 = H1 \frac{X2-A}{X1}, \quad EPS = EPSB \frac{X2-A}{X1} \quad \text{positivo}$$

Ponemos primero a 0 las variables FN, MX, MY, y usamos luego sucesivamente el procedimiento TRIH con estos parámetros, en los casos en que sea necesario.

Para sumar los términos correspondientes a cada una de las armaduras, hemos de tener en cuenta que será positivo (compresión) o negativo (tracción), según que (fig. 5):

$$d(i) = AA \cdot X(i) - Y(i) + CC \geq 0$$

$$\text{y que } \epsilon(i) = \frac{EPSB}{CC} \cdot d(i)$$

$$F(i) = \sigma(i) \cdot S = S \cdot \text{INTERP} [\text{DEFA}, \text{TENA}, P, \epsilon(i)]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} FN = FN + F(i) \\ MX = MX + F \cdot X(i) \\ MY = MY + F \cdot Y(i) \end{array} \right.$$

### 3. 6. cuerpo del programa (líneas 38 al final)

La lectura de datos se realiza mediante las instrucciones de las líneas 39 a 43.

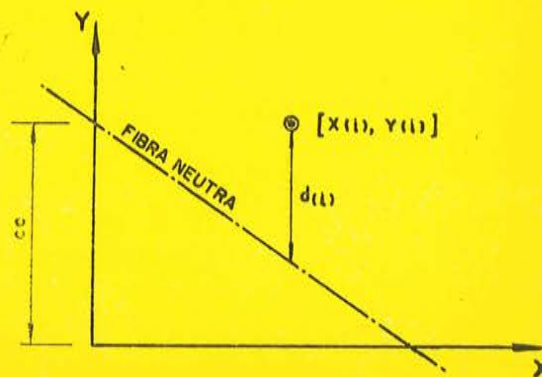
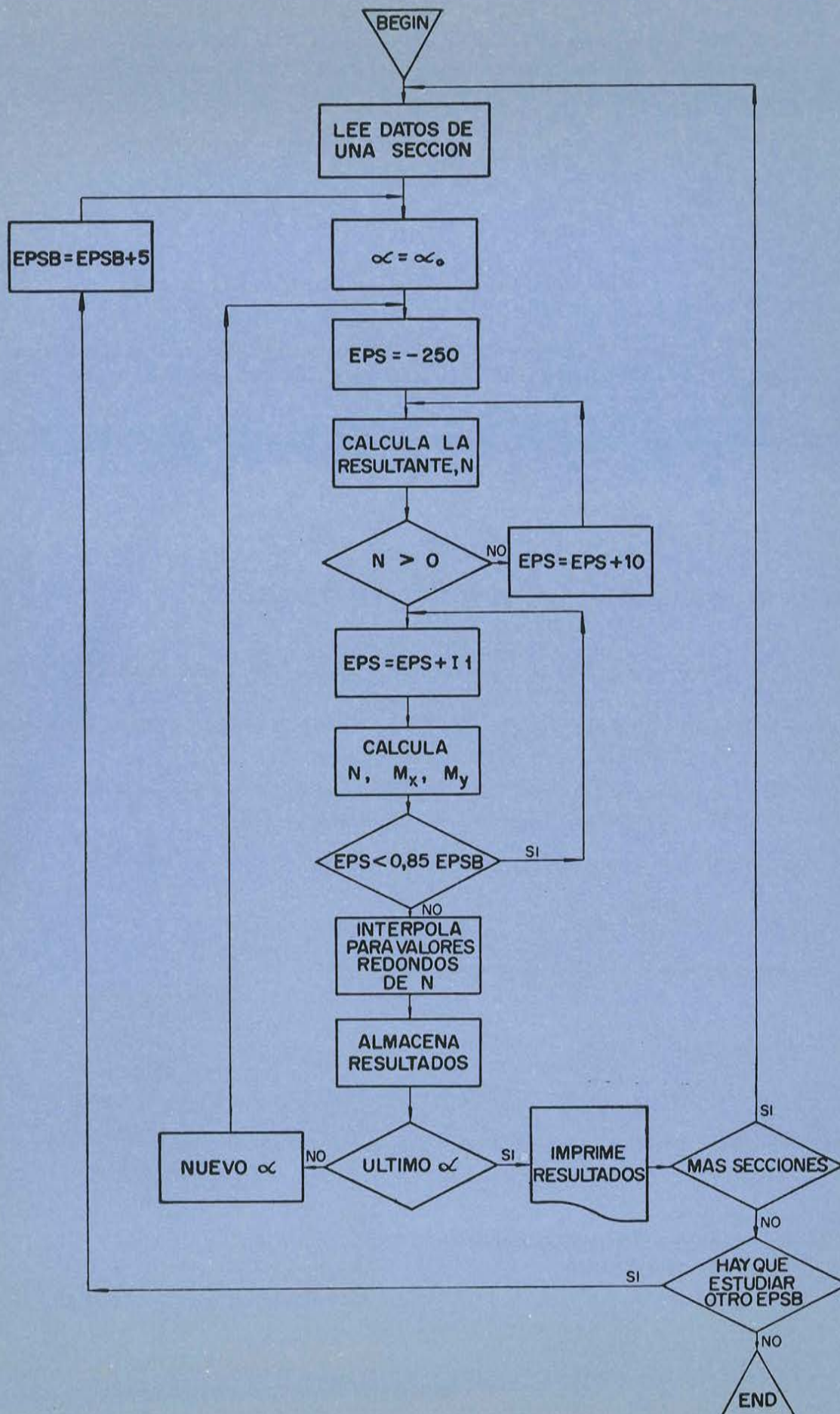


Figura 5



ORGANIGRAMA

Seguidamente se imprime un encabezamiento con los datos de la sección.

A continuación se comienza a trabajar con el primer ángulo  $\bar{\alpha}$  (y luego, análogamente, con cada uno de los otros). El ciclo comprende las líneas 46 a 56.

La deformación de la armadura más traccionada,  $EPS$ , se va aumentando desde  $-250 \times 10^{-4}$ , en incrementos de  $10 \times 10^{-4}$ , hasta conseguir que la resultante de las tensiones,  $FN$ , sea de compresión. (No interesan los casos de tracción esviada.)

A partir de la primera  $EPS$  que dé  $FN > 0$ , que llamamos  $EPSA$ , vamos a tomar  $Q$  valores de  $EPS$  distintos para obtener  $Q$  puntos, llegando a una  $EPS$  máxima igual a  $0,85 \times EPSB$ , con lo que estaremos ya cerca de la compresión axial (para valores superiores, la f. n. se aleja mucho y el programa pierde aproximación). Los incrementos de  $EPS$  no van a ser, sin embargo, constantes, pues se ha observado que al principio, cuando nos encontramos cerca de la flexión pura, la posición de la resultante varía muy rápidamente, y al quedar los puntos muy distanciados la interpolación entre ellos da lugar a errores apreciables. Por ello los incrementos  $I1$  siguen una progresión aritmética. El inicial

es  $(I1)_0 = \frac{0,85 \times EPSB - EPSA}{2,5 \times (Q - 2)}$  y la razón  $I11 = \frac{3 \cdot (I1)_0}{Q - 2}$ ; con ello el último será:

$$(I1)_t = (I1)_0 + (Q - 2) I11 = 4(I1)_0;$$

esto es, el cuádruplo del primero, y su suma  $S = \frac{Q - 2}{2} [(I1)_0 + 4(I1)_0] = 0,85 \times EPSB - EPSA$ , con lo que efectivamente llegamos a  $0,85 \times EPSB$ .

Calculados  $FN$ ,  $MX$ ,  $MY$  mediante el procedimiento FUERZA, al almacenarlos en las matrices  $AN$ ,  $AMX$ ,  $AMY$  transformemos los dos últimos en excentricidades referidas al centro de la sección mediante:

$$AMX = -\frac{MX}{FN} + \frac{A}{2} \quad AMY = -\frac{MY}{FN} + \frac{B}{2}$$

Mediante INTERC obtenemos los valores de las excentricidades correspondientes a valores redondos de la resultante, que almacenemos en las matrices  $XF$ ,  $YF$ , de donde acto seguido las transferimos a las matrices  $XXF$ ,  $YYF$  con objeto de poder imprimirlos por curvas de nivel al final del programa, en lugar de obtener los valores de distintas curvas correspondientes a un mismo  $\bar{\alpha}$ .

La salida final de resultados se realiza en las instrucciones de las líneas 57 a 61.

Si detrás del último número leído en la cinta de datos figura un asterisco, el programa vuelve a la referencia S1, leyendo datos de una nueva sección y pasando a calcularla sin modificar el  $EPSB$ .

Por el contrario, si lo que existe es un signo +, el programa aumenta  $EPSB$  en  $5 \times 10^{-4}$  y vuelve a la referencia S3, continuando así hasta llegar a  $EPSB = 55$ . Entonces, lo mismo que en el caso de no haber ni + ni \*, el programa se acaba.

## 4. ejemplos numéricos

4.1. Supongamos que una sección cuyas características geométricas son las de la sección del ábaco 1 y cuyos materiales tienen los diagramas minorados de las figuras 6 y 7, se encuentra sometida a los siguientes esfuerzos:

	$N = 10,30 \text{ t}$
Carga permanente ...	$M_x = 0,92 \text{ m. t}$
	$M_y = 0,48 \text{ m. t}$
	$N = 8,64 \text{ t}$
Sobrecarga ... ..	$M_x = 2,20 \text{ m. t}$
	$M_y = 1,80 \text{ m. t}$

Será necesario hacer dos comprobaciones:

A) (C.P. + S.C.) 1,4.

$$\underline{N} = 27,20 \text{ t}$$

$$\underline{M_x} = 4,37 \text{ m. t}$$

$$\underline{M_y} = 3,19 \text{ m. t}$$

$$e_x = 0,161 \text{ m}$$

$$e_y = 0,117 \text{ m}$$

Entrando en el ábaco 1 con estos valores de las excentricidades obtenemos, suponiendo que el agotamiento se produce para  $\varepsilon_b = 35 \times 10^{-4}$  y sin considerar el pandeo de la pieza:  $N_{35} \approx 30 \text{ t}$ . Por tanto, vale.

B) C.P. + S.C.  $\times$  1,4.

$$\underline{N} = 22,4 \text{ t}$$

$$\underline{M_x} = 4,00 \text{ m. t}$$

$$\underline{M_y} = 3,00 \text{ m. t}$$

$$e_x = 0,179 \text{ m}$$

$$e_y = 0,134 \text{ m}$$

Para los que:  $N_{35} \approx 27 \text{ t}$ . Por consiguiente, vale también.

4.2. Sea una sección cuyas características geométricas son las de la sección del ábaco 2, y cuyos diagramas reales de tensión-deformación en flexocompresión son los de las figuras 6 y 7. Esta sección ha sido dimensionada para soportar los esfuerzos  $N = 20 \text{ t}$ ,  $M_x = 5,82 \text{ m. t}$ .

A) Suponiendo  $e_x = e_o = CTE = 0,291 \text{ m}$ ,  $e_y = 0$ , ¿cuál será el valor de la carga que produce el agotamiento, admitiendo que éste se verifica para  $\varepsilon_b = 35 \times 10^{-4}$ ?

En el ábaco 2 vemos que para  $e_x = 0,291$ ,  $e_y = 0$ ,  $N_{35} \approx 36 \text{ t}$ .

B) Manteniendo  $N = 20 \text{ t}$ ,  $M_x = 5,82 \text{ m. t}$ , ¿qué  $M_y$  puede soportar la sección?

Cortando la curva de nivel de cota  $N = 20$  con la línea  $e_x = 0,281$  obtenemos  $e_y \approx 0,115$ ; luego  $(M_y)_{35} = 20 \times 0,115 = 2,30 \text{ m. t}$ .

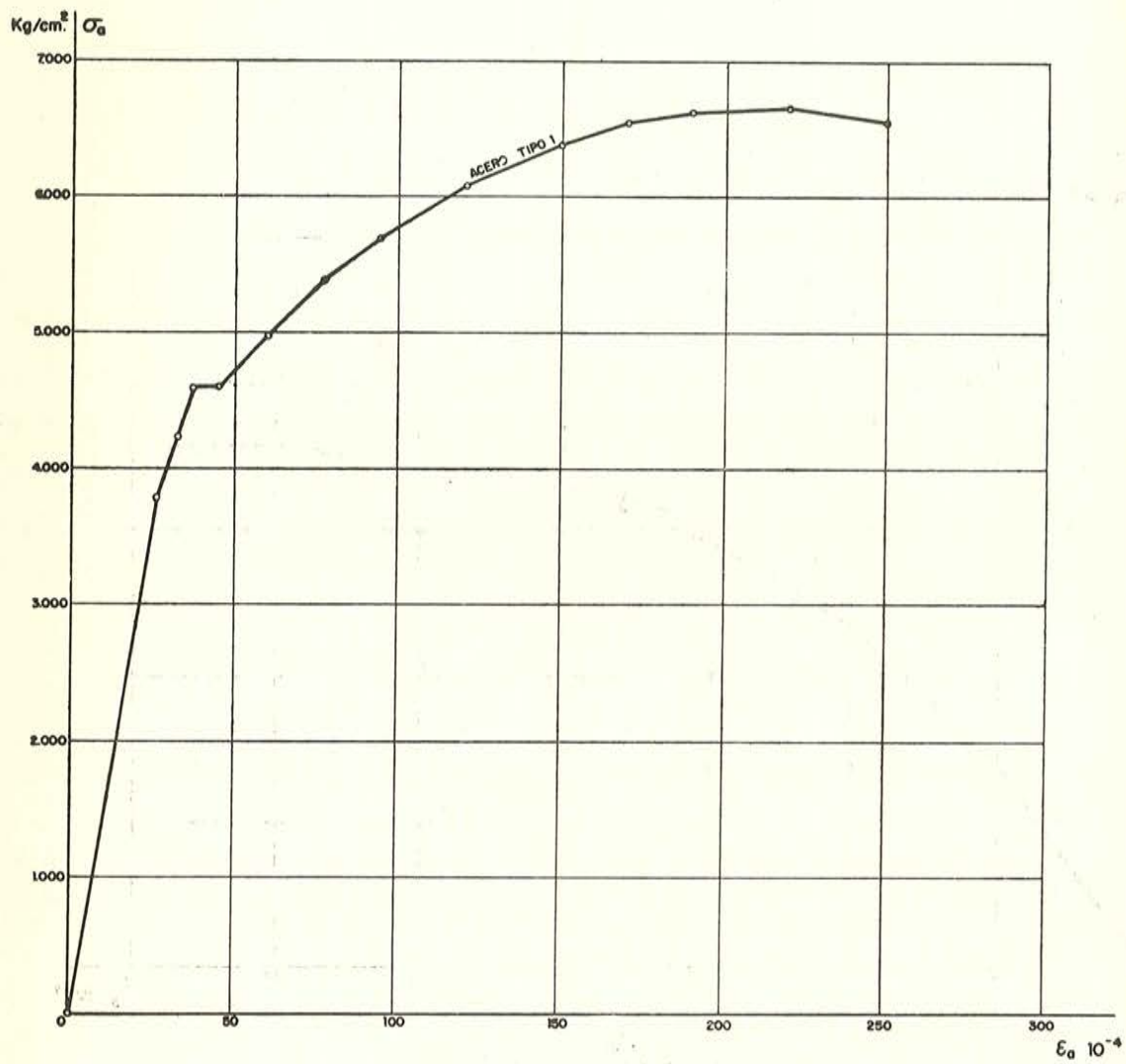


Fig. 7  
Diagrama tensión-deformación del acero

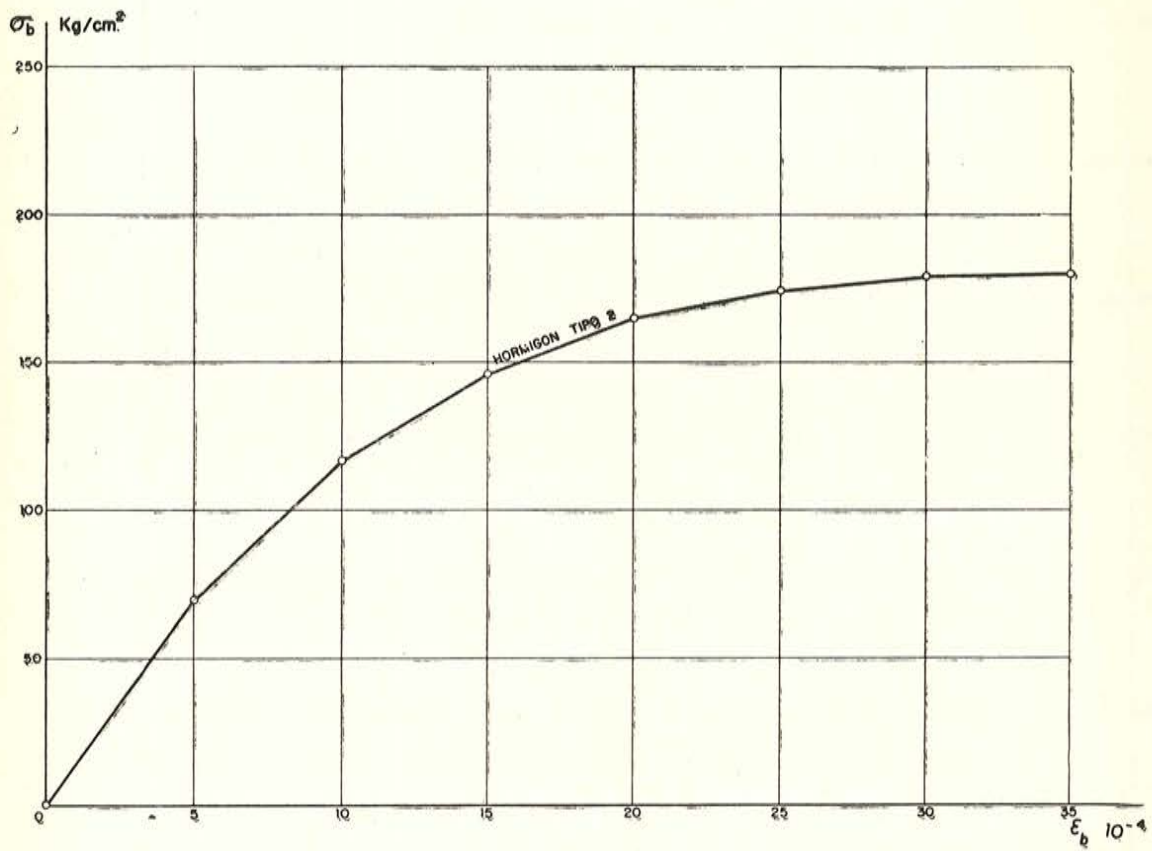
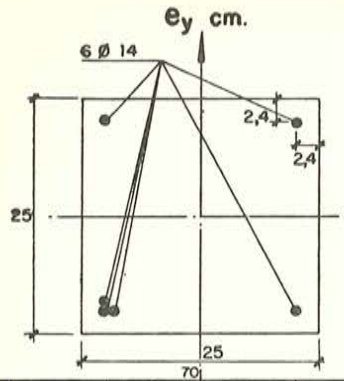


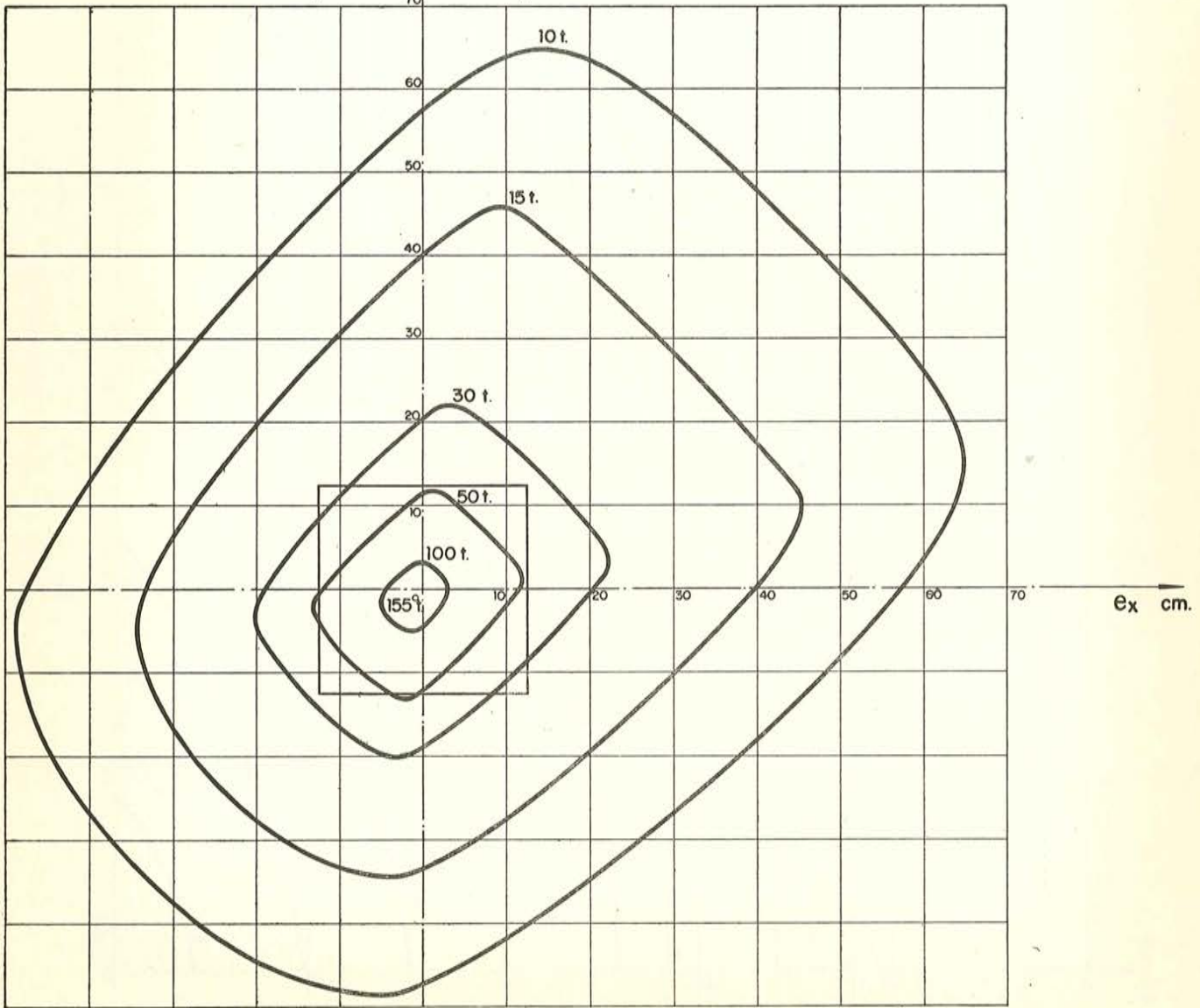
Fig. 6  
Diagrama tensión-deformación del hormigón



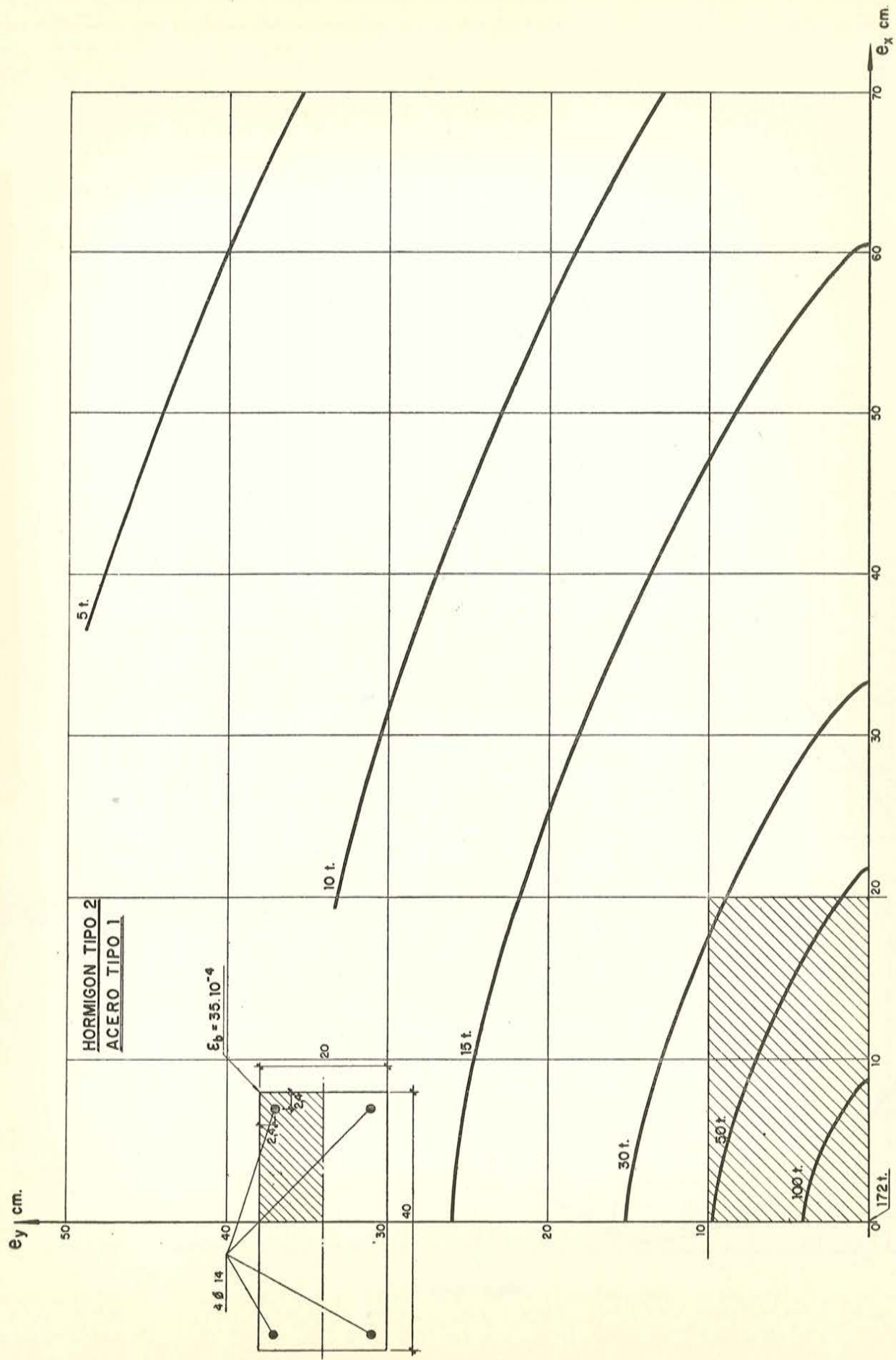
HORMIGON TIPO 2

ACERO TIPO 1

$$\epsilon_b = 35 \cdot 10^{-4}$$



Abaco número 1



Abaco número 2

## el «capp towers motor hotel», edificio prefabricado de hormigón pretensado

**Ross H. Bryan** (consulting engineer)

(Tomado de «L'industria italiana del cemento», núm. 7, julio 1964)

*Se manifiesta en los Estados Unidos una continua evolución de los métodos constructivos: a las construcciones en madera y metálicas han venido a añadirse las de hormigón armado y las estructuras mixtas metálicas y de hormigón armado. El edificio descrito en este artículo constituye un ejemplo muy interesante de estructura construida a base de elementos prefabricados de hormigón pretensado; debe tenerse en cuenta que en los Estados Unidos el hormigón pretensado ha sido uno de los factores que más han influido en el desarrollo de la prefabricación.*

\* \* \*

El edificio torre de 15 plantas "Capp Towers Motor Hotel", construido en Minneapolis (Minnesota), de estructura prefabricada, única en su género, presentó una insólita diversidad de problemas que hicieron sumamente compleja la elaboración del proyecto.

La solución, mediante elementos prefabricados de hormigón pretensado, se eligió entre cinco casos posibles: tres en acero y dos en hormigón. Esta elección vino fijada por motivos económicos y por exigencias del proyecto.

La construcción se desarrolla alrededor de un núcleo central, en forma de torre, para las habitaciones del hotel; en la planta 14 hay un restaurante con cúpula geodésica y una piscina; la planta 15 se ha reservado para maquinaria.

En las dos primeras plantas de la torre se ha previsto un garaje con rampa helicoidal de acceso. En el sótano hay una sala de maquinaria, una serie de locales para depósitos y almacenes, bolera, sala de reuniones y congresos y la rampa de acceso.

Ya en la cimentación de la torre se empezaron a plantear complejos problemas constructivos. Efectivamente, a causa del tipo de terreno, arcilla arenosa blanda, fue necesario recurrir a la cimentación por cajones que se fueron hincando en el terreno hasta alcanzar un banco rocoso. La excavación se hizo a mano, apuntalando con madera y hormigonando después.

Parte de la excavación se tuvo que realizar junto a edificios cimentados superficialmente, por lo que fue necesario, para asegurar su cimentación, efectuar trabajos similares a los indicados para la torre.

Los edificios adyacentes tenían muros de carga continuos que apoyaban sobre cimientos de ladrillo, insuficientes para soportar las cargas puntuales actuando a sensible distancia unas de otras. Por tal razón las obras de cimentación profunda de dichos edificios se ejecutaron también mediante cajones espaciados 0,90-1,20 m unos de otros, colocándolos, mediante excavación manual, bajo los cimientos existentes, hasta alcanzar un terreno con la suficiente resistencia, y rellenándolos con hormigón.

Otro problema que hubo que solucionar, debido a la pequeña resistencia del terreno, fue el siguiente: con objeto de reducir al mínimo las dimensiones de los soportes de la torre se consideró que las cajas de las escaleras y ascensores resistían como ménsulas de hormigón, empotradas en su base, con la necesaria rigidez para soportar las acciones horizontales debidas al viento; pero, dada la escasa resistencia del terreno y la excesiva profundidad del estrato rocoso, el proporcionar el suficiente empotramiento en la base a dichas ménsulas constituía un serio problema. Sin embargo, al calcular la acción horizontal del viento se vio que no se originaban tracciones en la base de la torre, por lo que se decidió absorber el momento de empotramiento, de las cajas de ascensores y escaleras, por un sistema de vigas, a nivel del terreno, que se extiende hasta los soportes, obteniéndose así el suficiente anclaje (fig. 20).

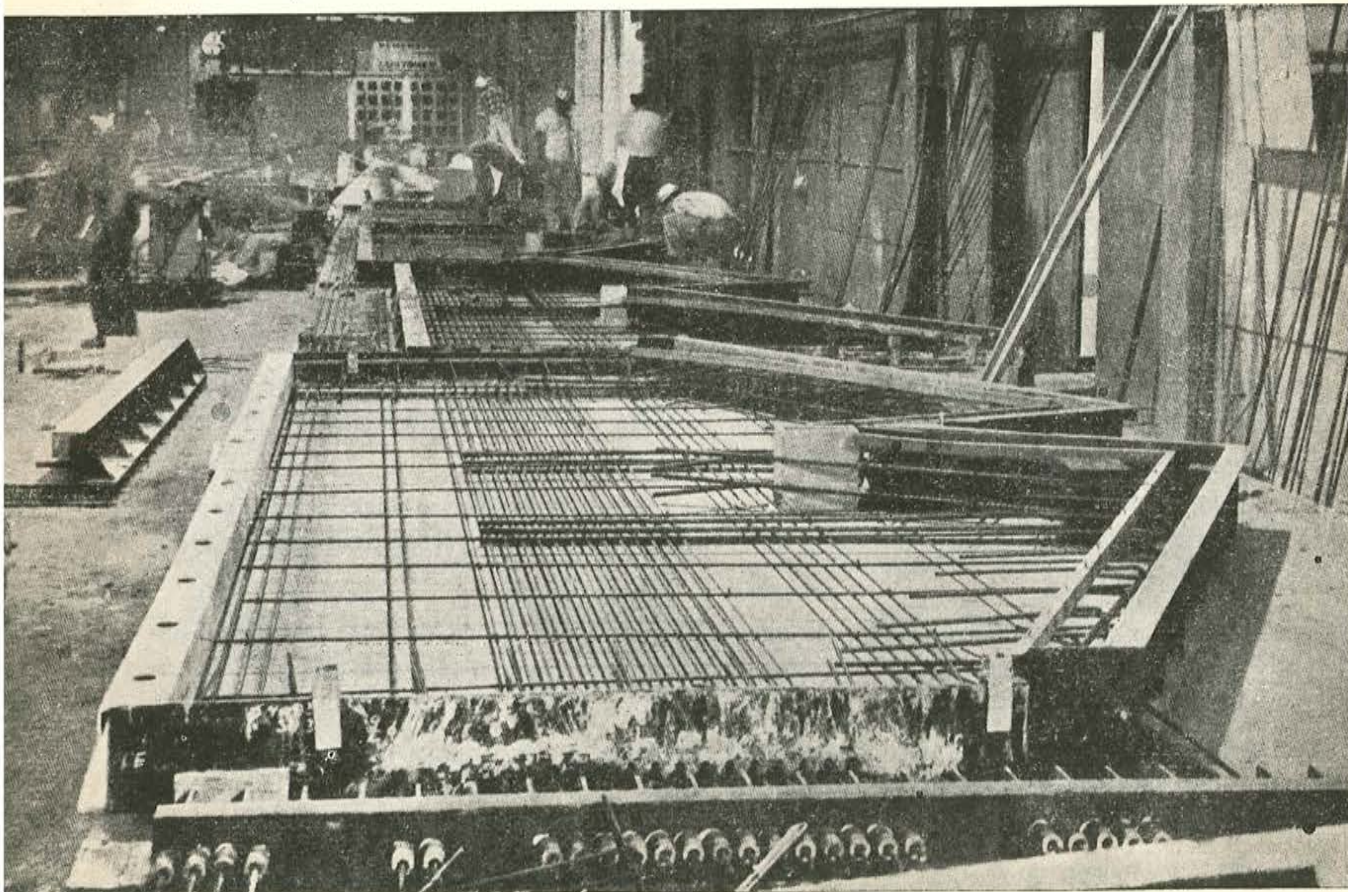
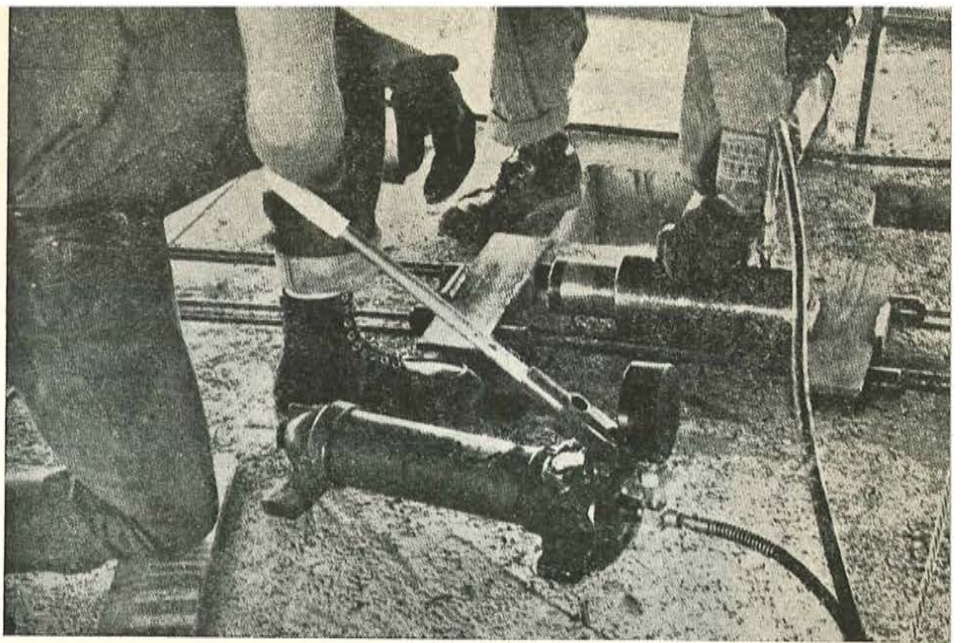


Fig. 1.—Construcción de las losas de los forjados en voladizo. Se han distanciado convenientemente los cables de pretensado para absorber mejor la excentricidad de las cargas.

Fig. 2.—Gato de pretensado.



La estructura prefabricada de la primera y segunda planta se complicó debido a la rampa en espiral que facilita el acceso de los automóviles a los locales dedicados a aparcamiento.

La rampa está constituida por elementos prefabricados de hormigón pretensado en "T", y "TT", que se apoyan en vigas, también prefabricadas, de canto suficiente para servir de antepecho y barreira de seguridad de la rampa (fig. 12).

El canto de estas vigas era en algunos casos tan grande que la longitud de los soportes entre los

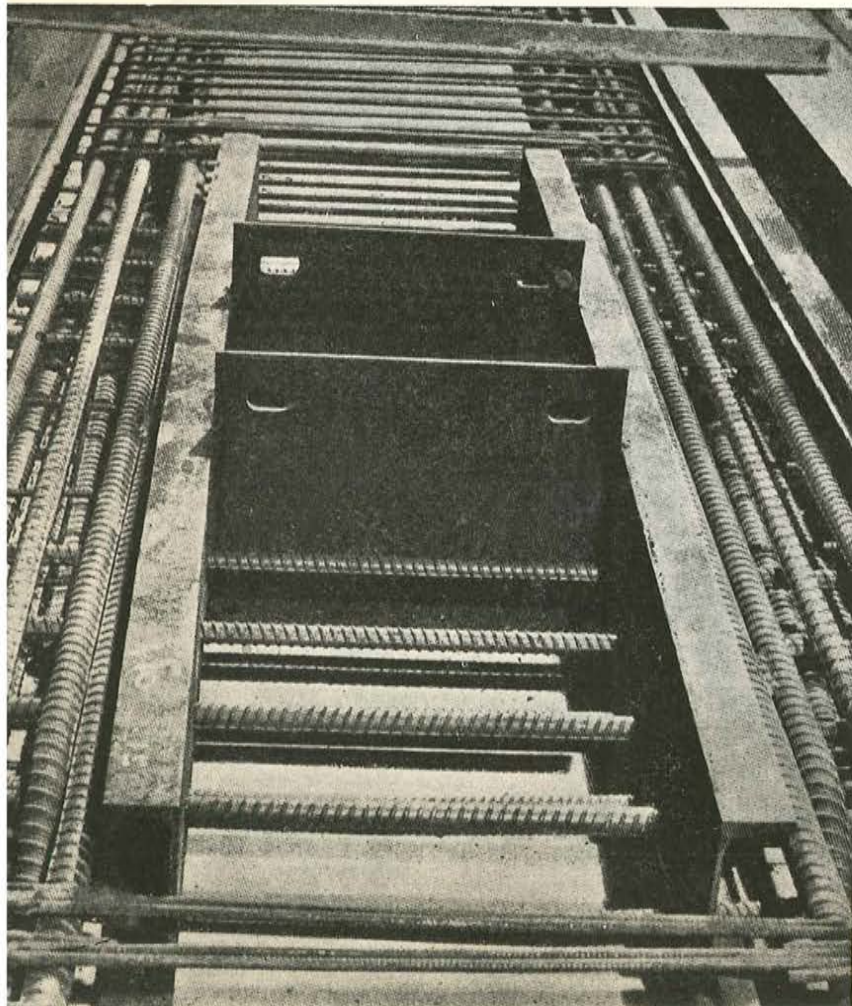


Fig. 3.—Armadura de una de las vigas prefabricadas de arriostamiento, dentro del encofrado y antes de hormigonar.

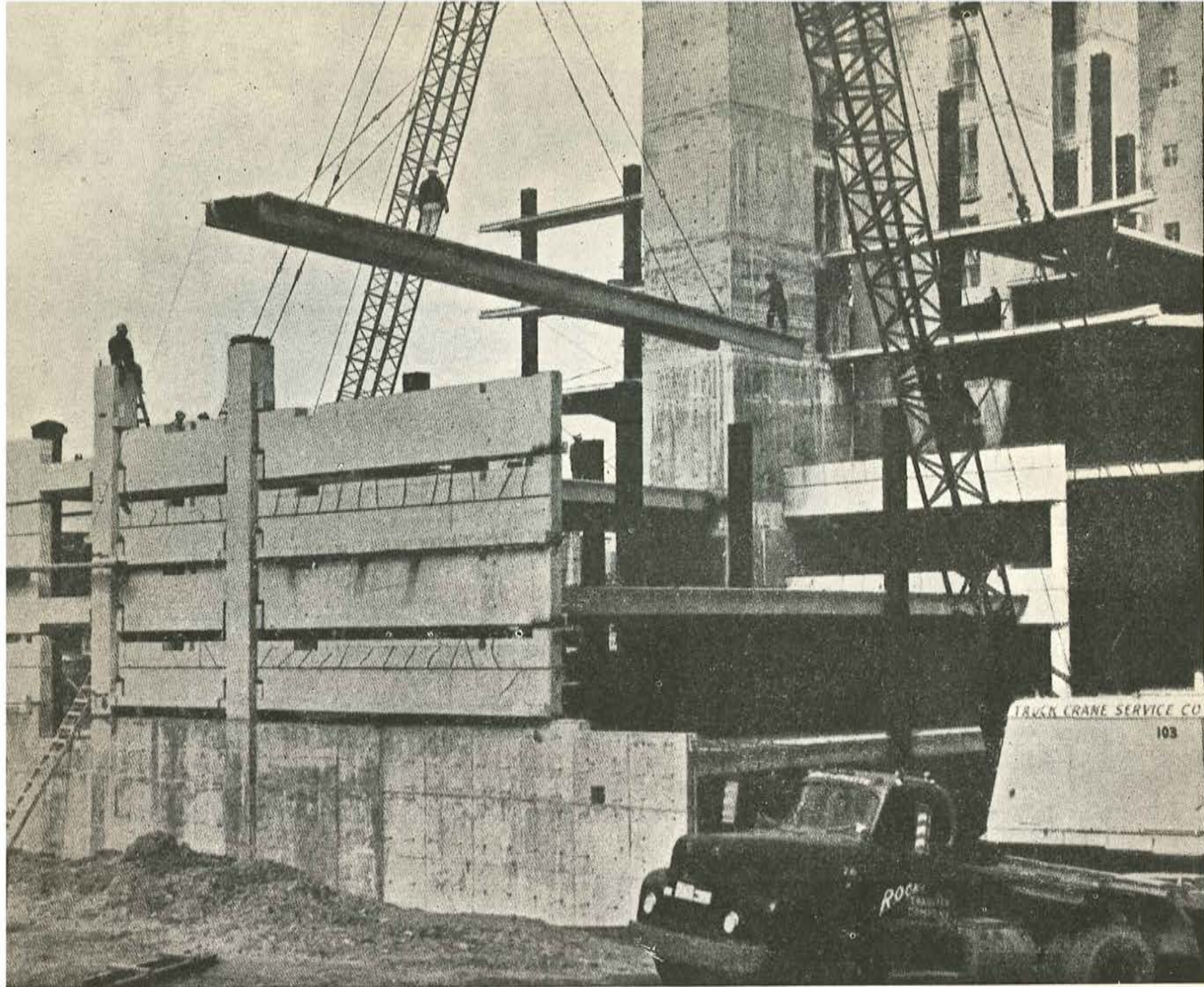


Fig. 4.—Colocación de una de las losas del forjado.

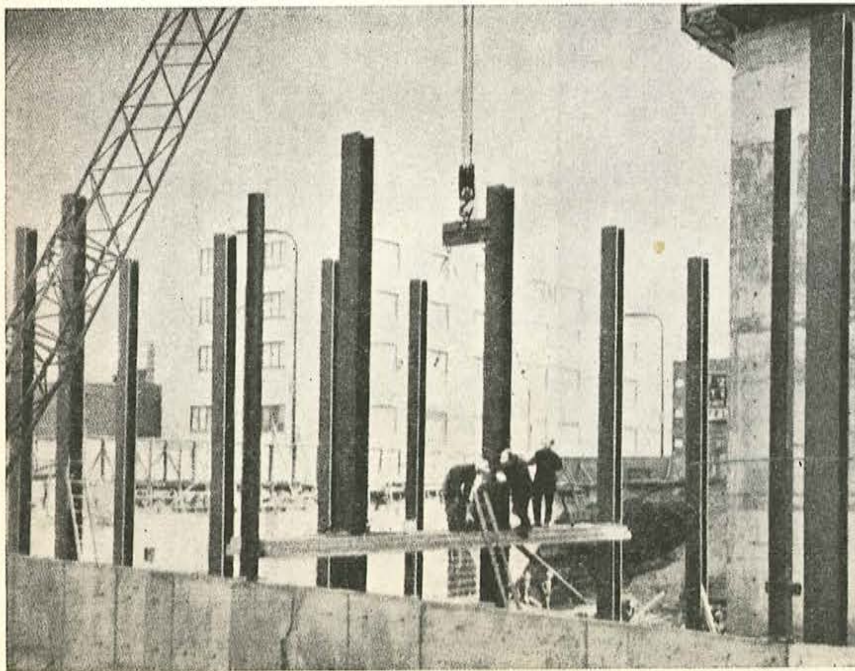
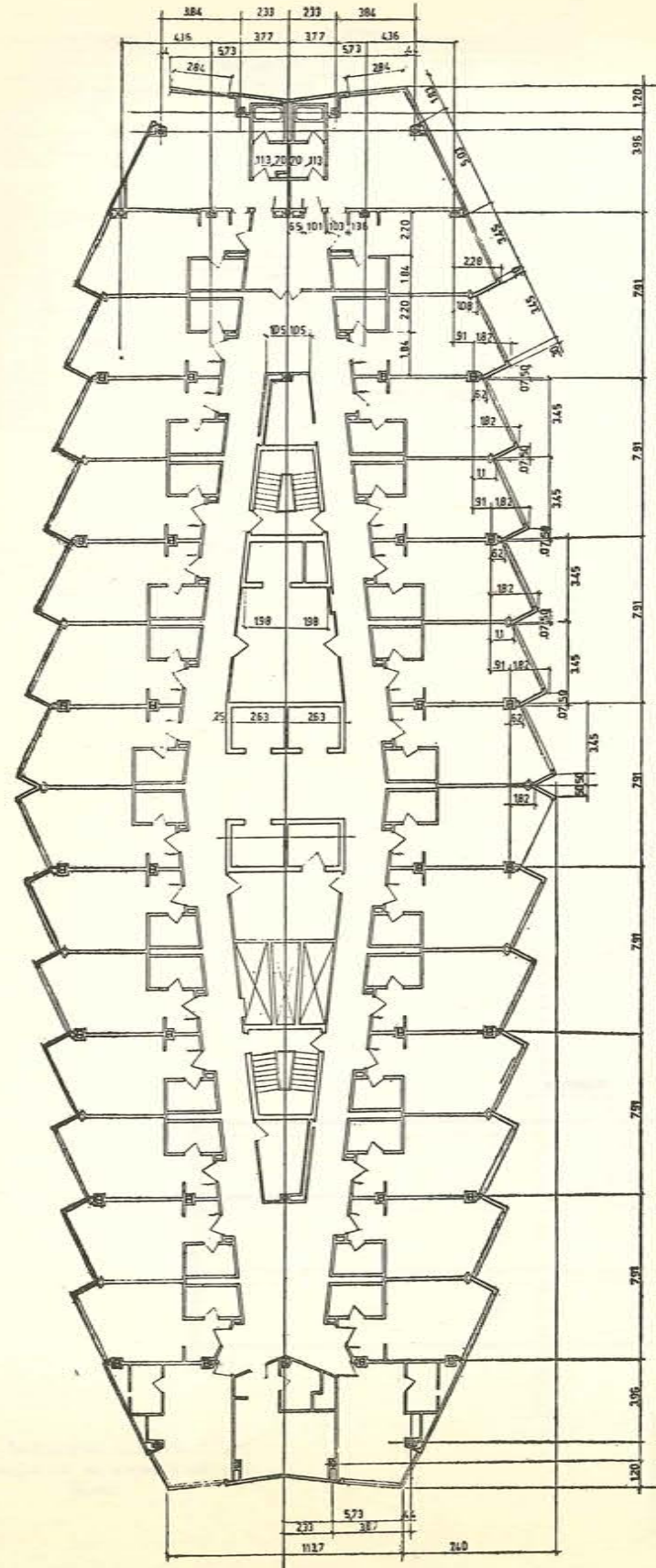
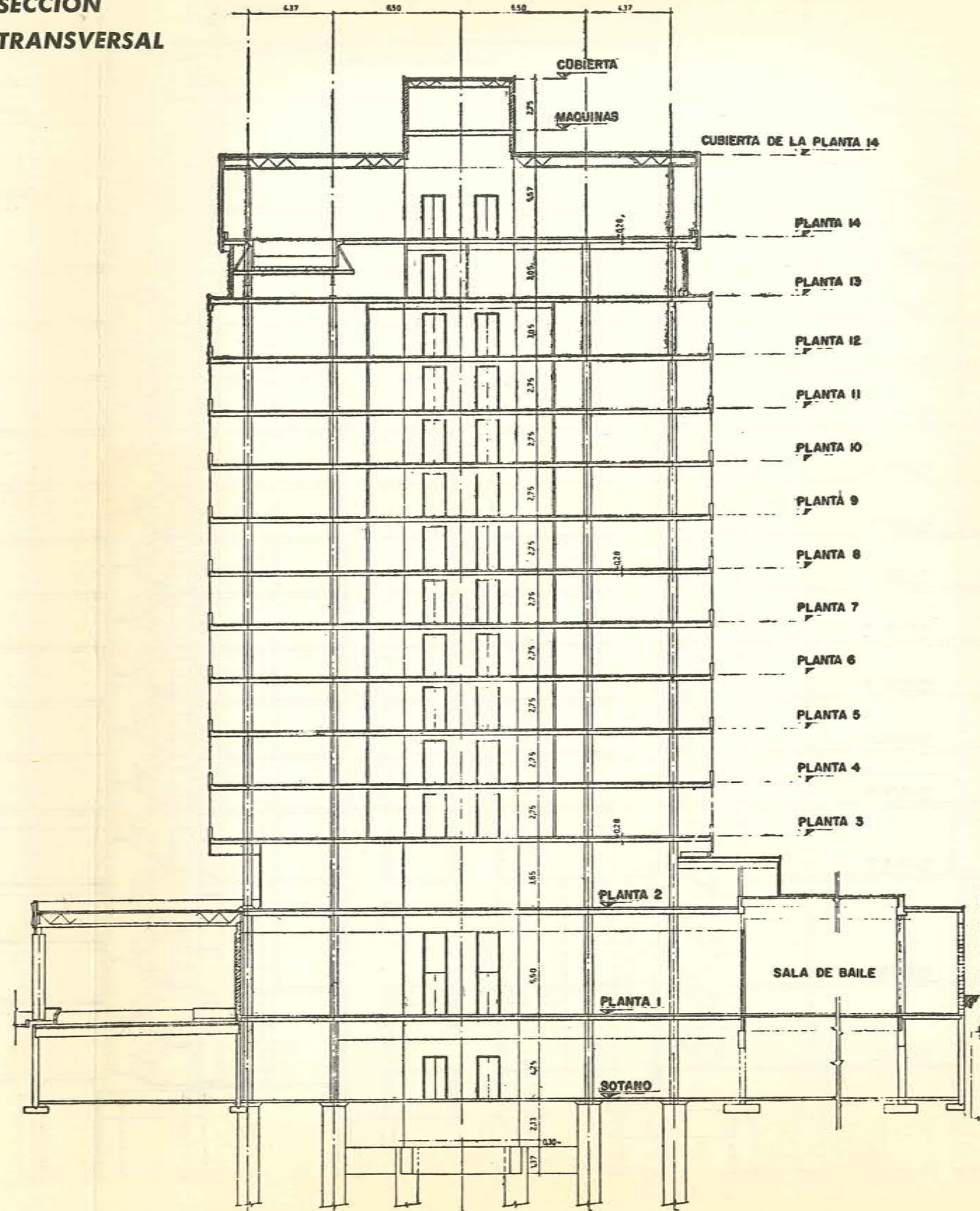


Fig. 5.—Colocación y empalme con los soportes de una de las vigas de arriostramiento.

# PLANTA TIPO



# SECCION TRANSVERSAL



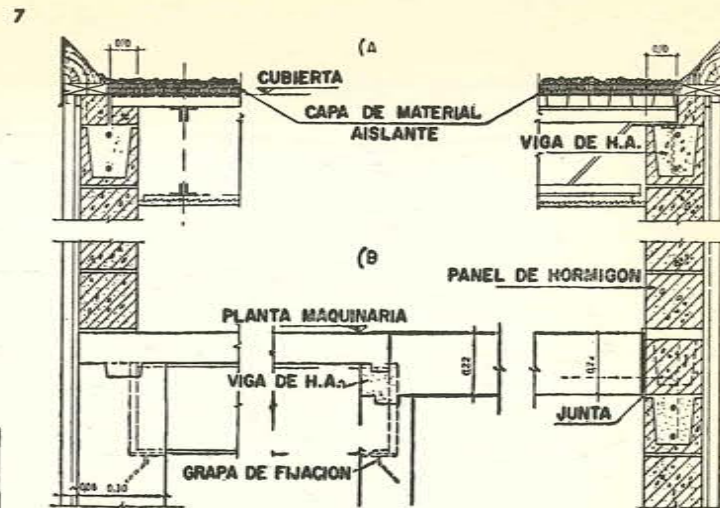
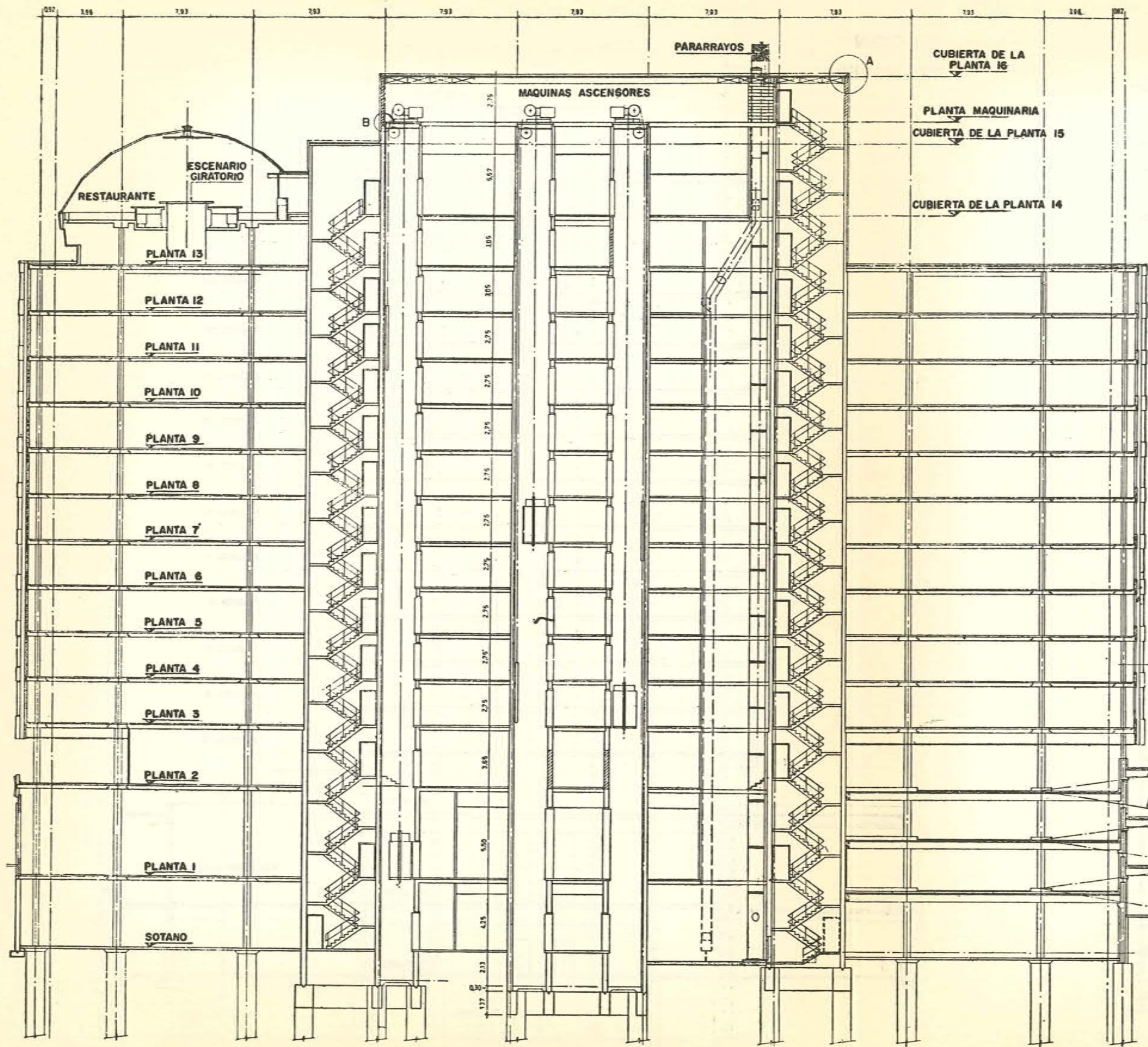


Fig. 8.—Sección de la última planta del edificio: A) cubierta, B) forjado del piso.

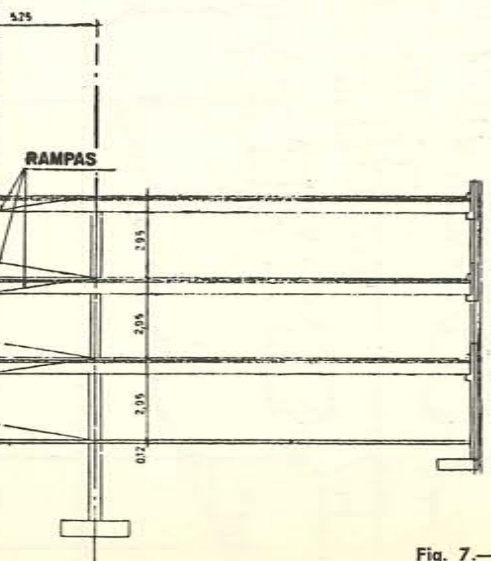


Fig. 7.—Sección longitudinal por los ejes de simetría de las cajas de escalera.

Fig. 10.—Cajas de las escaleras y ascensores que, adecuadamente ancladas al terreno, proporcionan al conjunto de la estructura prefabricada, la resistencia necesaria para soportar las acciones del viento.

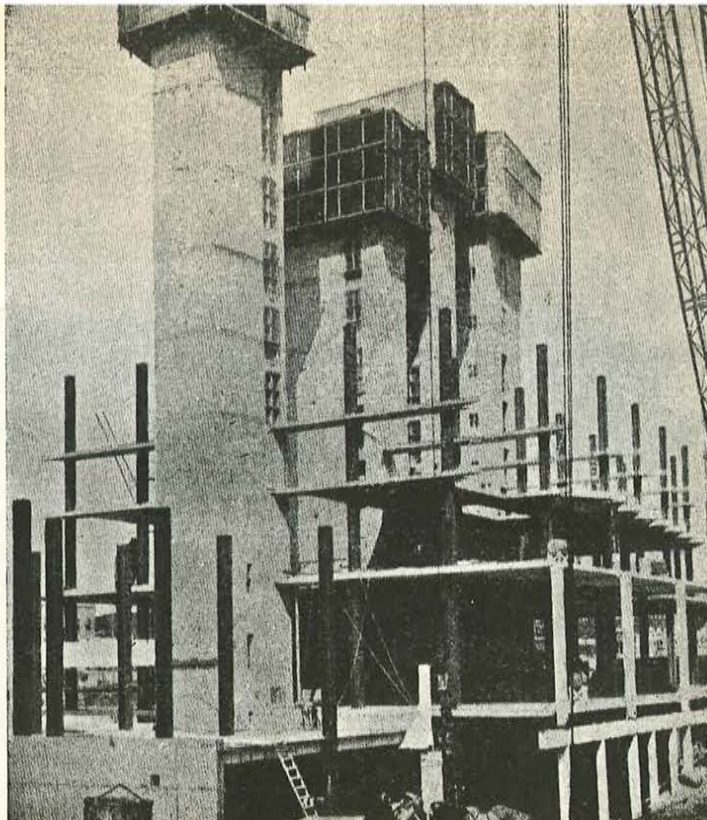
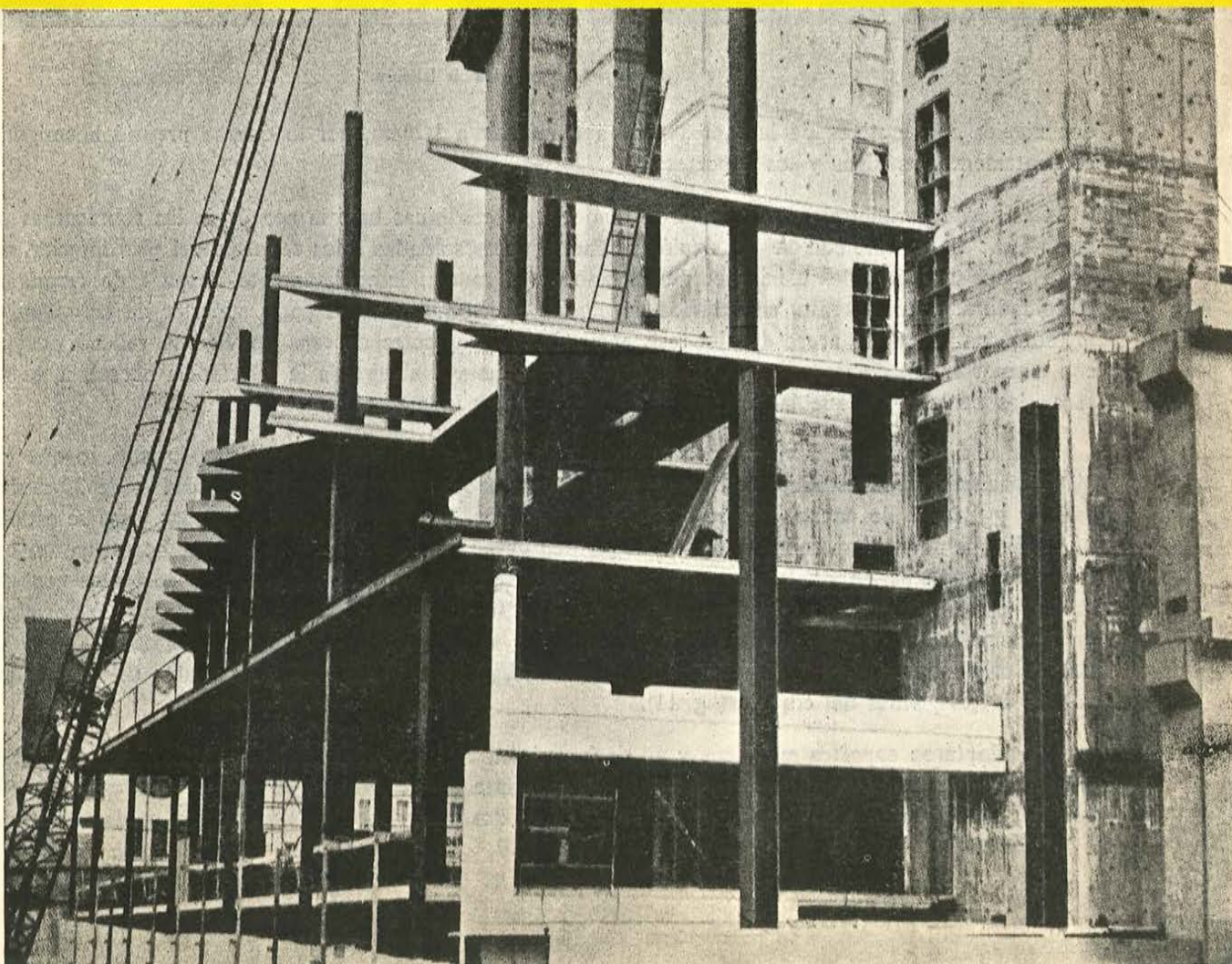


Fig. 11.—Colocación de las losas del forjado sobre las vigas de arriostramiento. Las losas voladas del lado izquierdo dan ya idea del movimiento de la fachada. Puede verse, asimismo, la estructura de la rampa de acceso entre plantas a distinto nivel. Los soportes metálicos tienen una longitud igual a la altura de tres plantas. Se aprecian las uniones correspondientes a cada tres plantas.



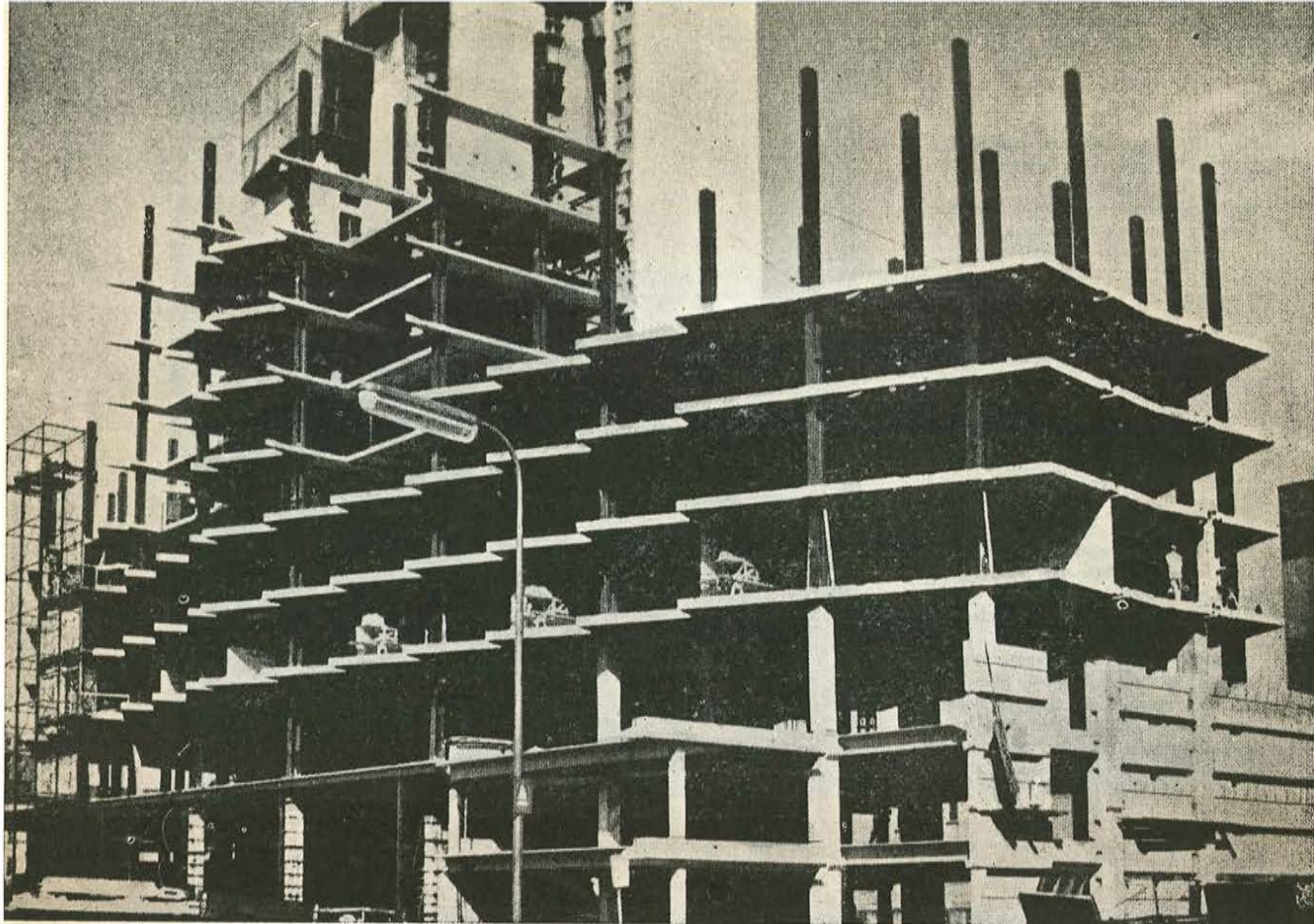


Fig. 12.—Una fase avanzada de la obra.

dos niveles consecutivos de la rampa resultaba inferior a 1,20 m, por lo que se prefirió hormigonar conjuntamente las vigas y los soportes.

Las vigas perimetrales se calcularon como vigas continuas bajo la acción de las sobrecargas accidentales; la continuidad se consiguió mediante juntas soldadas a los soportes del piso inferior. Sobre ellas se colocaron los elementos del forjado de la rampa, inmediatamente después de terminada la soldadura. Seguidamente, en orificios adecuados y dispuestos en la parte superior de las vigas, se introdujeron barras de acero de alta resistencia. El espacio entre cabezas de viga se rellenó después con un mortero de cemento, muy seco, apisonado; y una vez alcanzada la resistencia necesaria, se tesaron las barras para que las vigas pudieran resistir los momentos negativos.

Con el fin de no dejar vistos los nervios de las vigas por la parte inferior del forjado, lo que hubiese resultado poco estético, se construyó un cielo raso mediante losas prefabricadas, de 20 cm de espesor y 1,20 m de ancho, que se sujetan en las vigas. El apoyo de las losas en las vigas se estudió de modo que no hubiera saliente alguno en los puntos de unión (fig. 3); las losas se construyeron con hormigón ligero para reducir su peso, si bien sus extremos, sometidos a esfuerzos cortantes considerables, se realizaron de hormigón normal en una longitud de unos 30 cm. También se utilizó hormigón ordinario para las vigas de arriostamiento, teniendo en cuenta los grandes esfuerzos de punzonamiento originados en los apoyos de los soportes metálicos, constituidos por elementos de altura equivalente a tres plantas del edificio (fig. 11).

Se adoptaron soportes metálicos y no de hormigón, con objeto de evitar dificultades en la unión entre ambos elementos. Esta unión se realizó mediante un dispositivo de enlace—que quedaba embebido en el hormigón de las vigas—constituido por dos placas metálicas verticales, unidas con bulo-

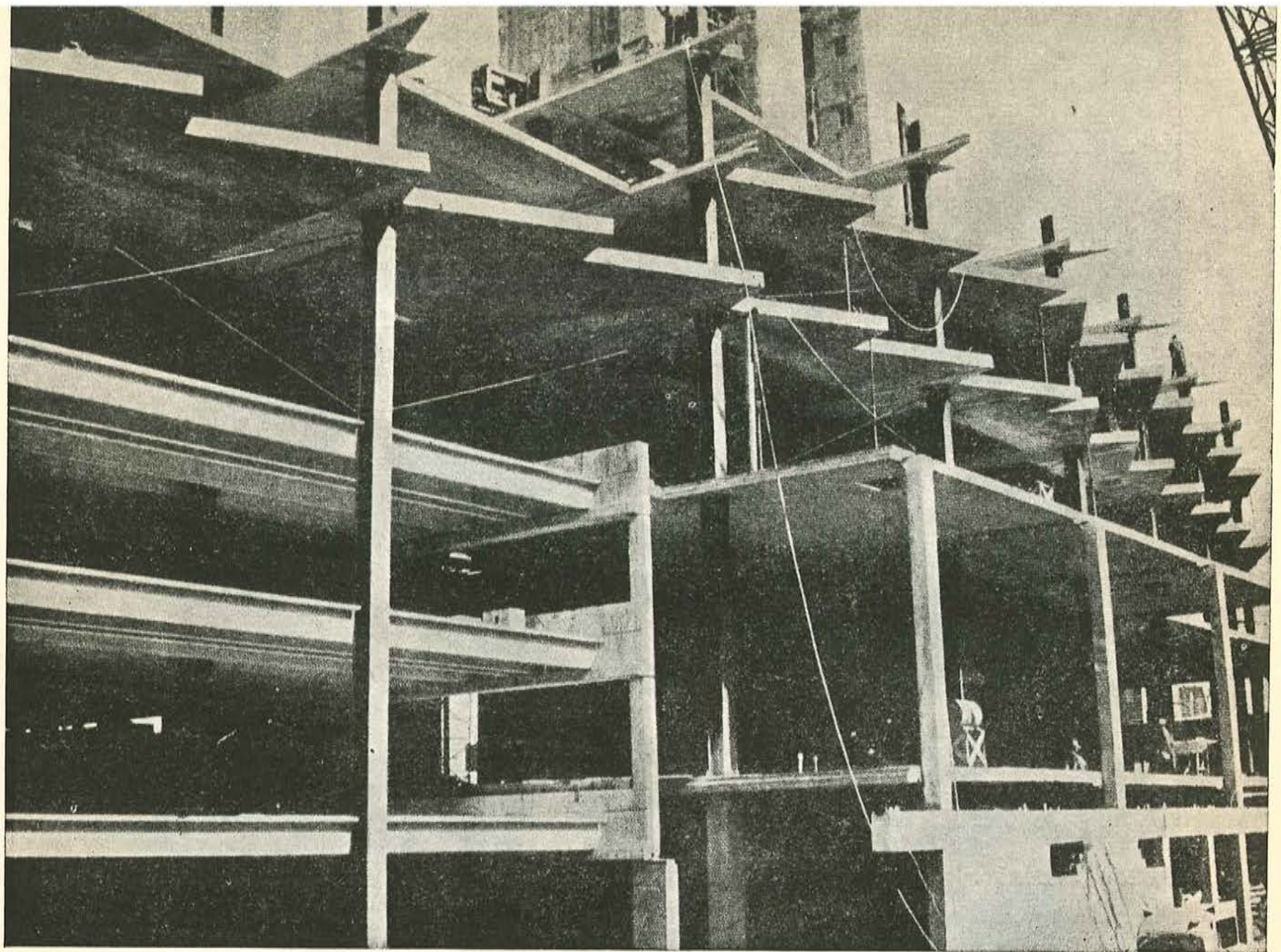


Fig. 13.—Las plantas inferiores, destinadas a servicios, tienen una estructura más regular.

nes al soporte durante la fase de montaje de las vigas; estas placas se soldaron, en los extremos de vigas, a 2 piezas metálicas en "C" que se extienden dentro de la viga, todo a lo ancho de ellas, y absorben las reacciones, transmitiéndolas a los soportes.

Una vez terminadas las vigas, se procedió a la colocación de las losas apoyándolas, en los lados de las vigas, sobre placas de neopreno, para evitar que se resquebrajen los bordes y permitir los movimientos producidos por las dilataciones térmicas. Las juntas entre vigas y losas se rellenaron con mortero de cemento, y a la placa así formada se le dio continuidad, mediante el pretensado, para reducir al máximo los movimientos termohigrométricos. El pretensado se efectuó mediante cables formados por 7 alambres de acero, del tipo usado normalmente para elementos estructurales prefabricados. Los cables se anclaban en un extremo, mediante un lazo, a un tubo embebido en la masa de hormigón de la placa y por el otro lado convergían en la zona central del edificio, donde se procedía a la operación de tesado.

Otro de los objetivos del pretensado era evitar flechas importantes de los bordes de las placas en ménsulas, en dientes de sierra, las cuales debían soportar, aparte del peso propio y de las sobrecargas accidentales, el peso de los muros de cerramiento, ejecutados con paneles prefabricados de hormigón.

La excentricidad de la carga de los paneles obligó a determinar el centro de gravedad de todas las cargas que actuaban sobre la losa y a colocar los cables de pretensado simétricamente respecto a él. Los cables se desviaron ligeramente, en las zonas por las que atraviesan las canalizaciones de servicio, pero, en general, se mantuvieron lo más próximos posible a su posición teórica.

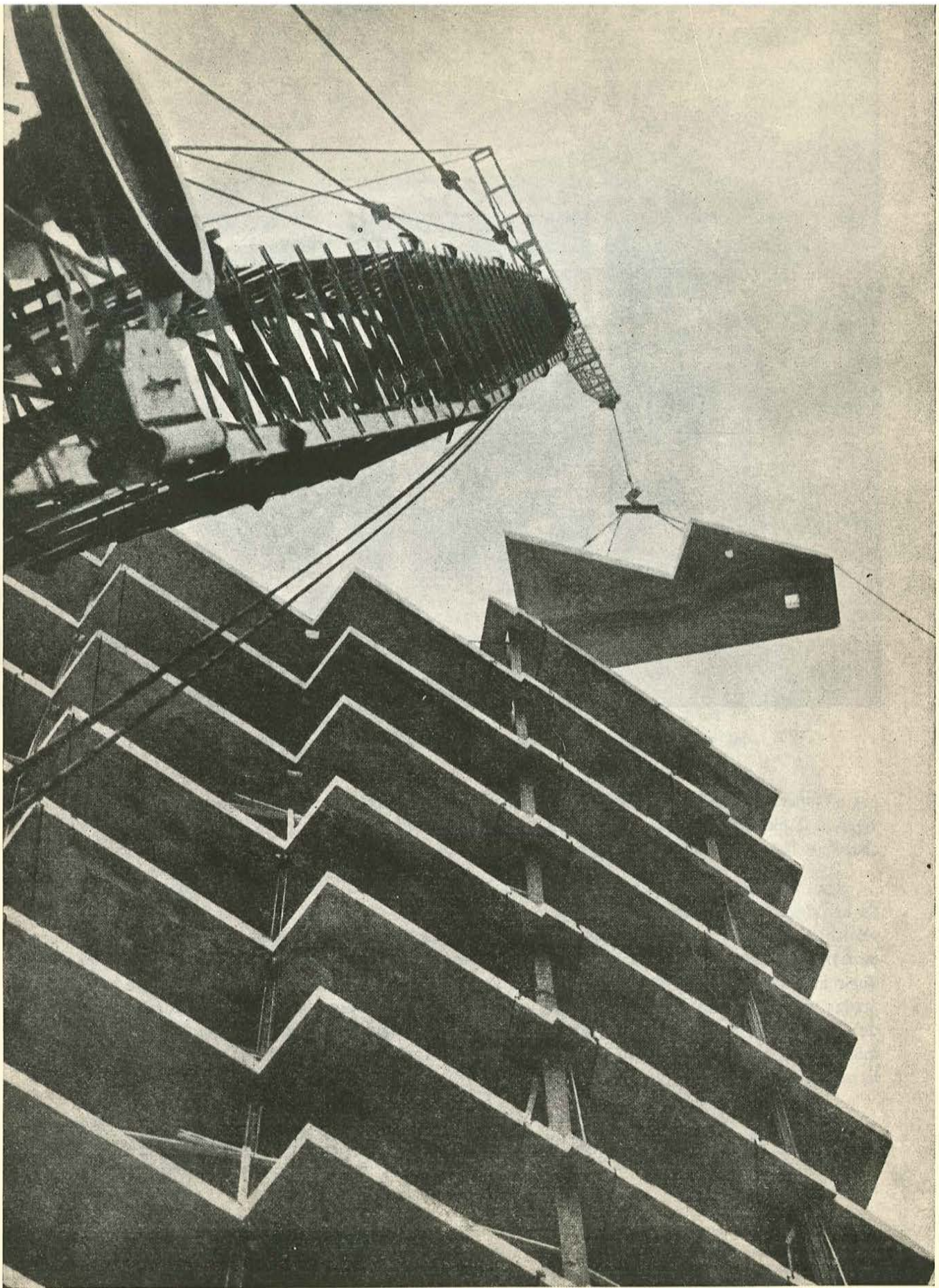


Fig. 14.—Elevación y colocación, en una de las últimas plantas, de una losa de forjado pretensada y prefabricada.





Fig. 20.—Planta de la cimentación de las cajas de escaleras y ascensores.

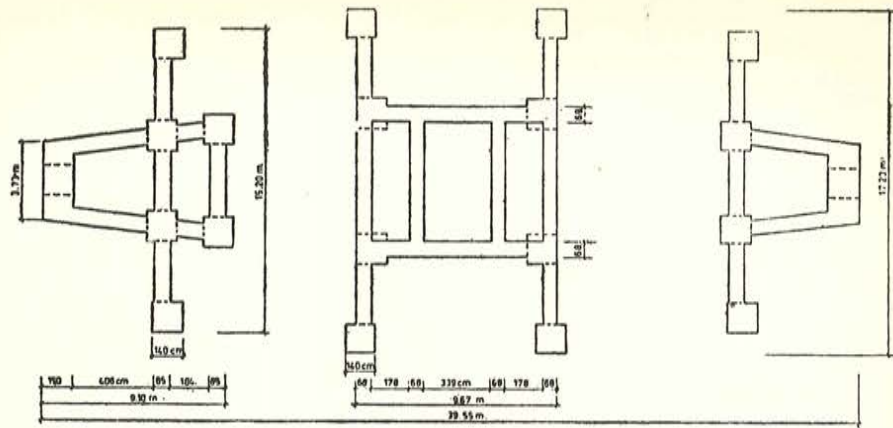


Fig. 21.—Detalle del anclaje de los cables.

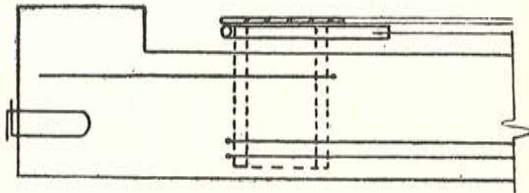


Fig. 22.—Gato de pretensado (planta).

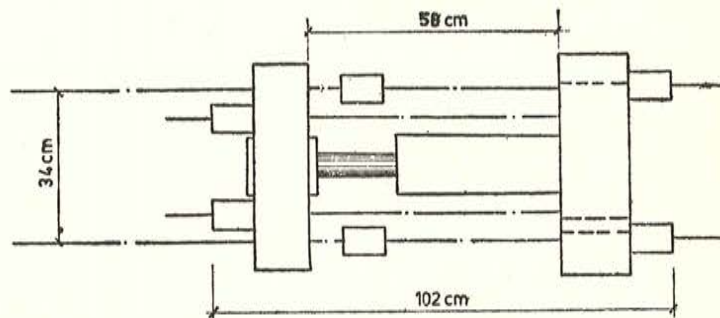
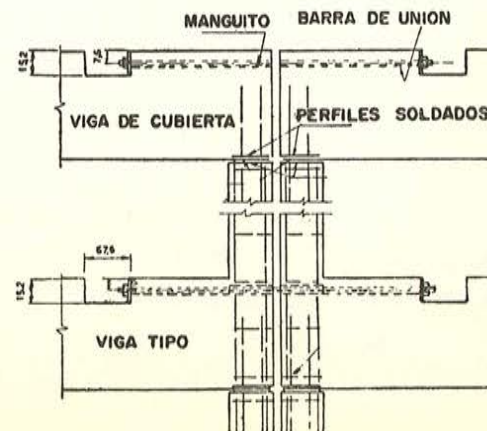
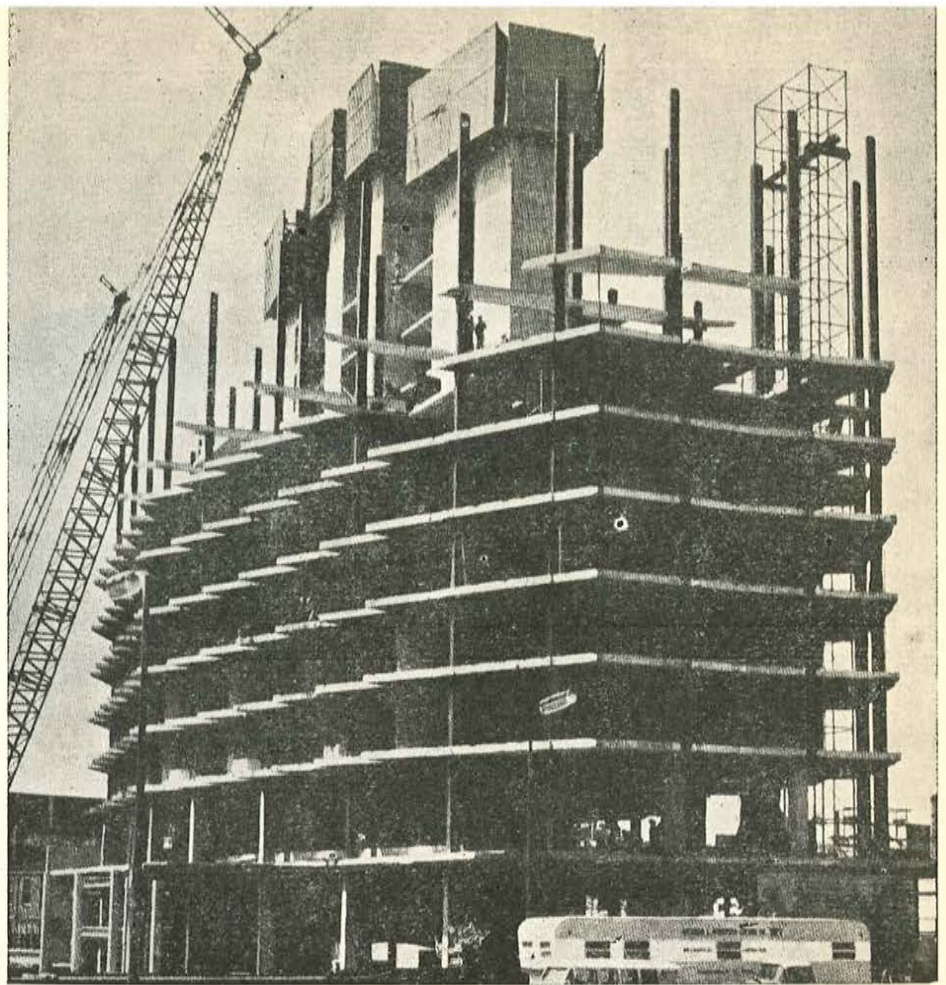


Fig. 23.—Unión entre las vigas de cubierta del edificio.





**Fig. 32.—Elevación y colocación de una viga de arriostramiento. La estructura muestra en conjunto la movida composición arquitectónica del edificio. Se pueden ver las cajas de las escaleras y ascensores, construidas «in situ».**



**Fig. 33.—Vista de conjunto de la estructura, completa en sus elementos horizontales; se han colocado ya los primeros paneles verticales de fachada.**

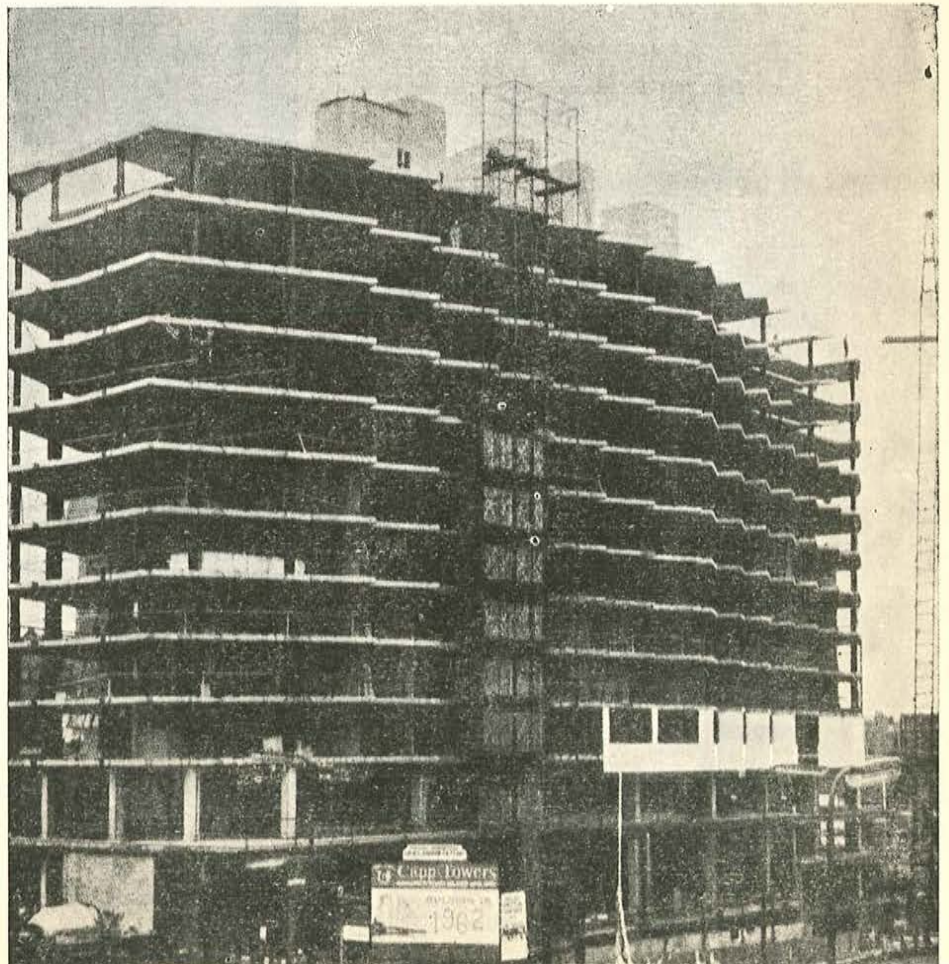




Fig. 34.—El «Capp Towers Motor Hotel», terminado.

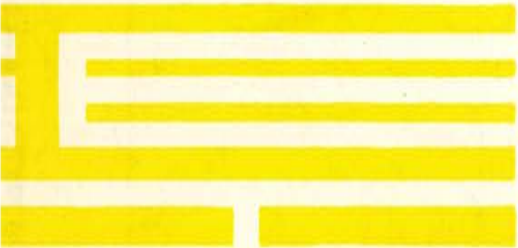
fabricados. Por otra parte, la colocación de las armaduras de los elementos prefabricados había que hacerla con mucho cuidado.

Por ello, durante la construcción, se adoptaron numerosas modificaciones y simplificaciones en dichas juntas. También se simplificó la junta entre vigas y soportes, obteniéndose un apreciable ahorro de mano de obra y material.

Se comprobó que las dimensiones y posición de los orificios en las losas, para el paso de los tubos y conducciones de servicio, tenían una influencia directa en el coste de la producción de los elementos prefabricados y, también, que hubiese sido posible obtener mejores resultados si tales orificios pudieran ser normalizados y simétricos en cada planta.

El propietario del edificio es Mr. Martín Capp, de Minneapolis; los arquitectos fueron Ackerberg y Cooperman, y la empresa constructora "Robin Hood, Construction Company", también de Minneapolis.

Los elementos prefabricados fueron construidos por la empresa "Prestressed Concrete, Inc.", de St. Paul, y el cálculo de la estructura fue realizado en las oficinas de Ross H. Bryan, Consulting Engineer, bajo la dirección de Mr. William J. Elliston Jr.



**instituto  
eduardo torroja  
de la construcción  
y del cemento**