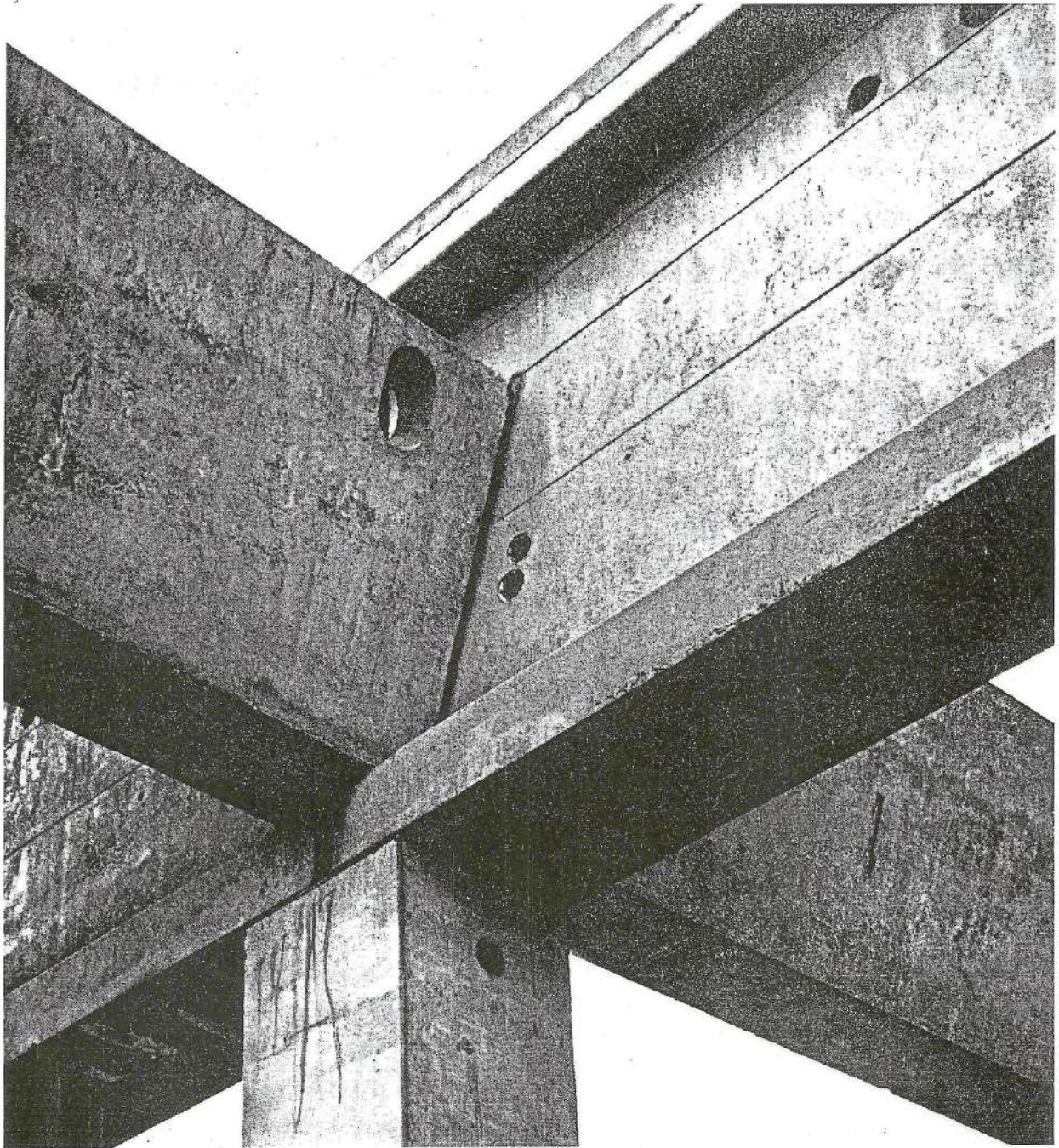


**ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES EN EL DISEÑO DE
ESTRUCTURAS PREFABRICADAS**

Ing. Luis Gonzalo Mejía C.



ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES EN EL DISEÑO DE
ESTRUCTURAS PREFABRICADAS

C A M A C O L
Seccional Antioquia

I C P C

PREFABRICADOS DE CONCRETO

Por:

Luis Gonzalo Mejía C.

Septiembre 24 al 28 de 1979

INTRODUCCION

El objeto de estas notas es el de recopilar una serie de información sobre un tema que cada día adquiere más importancia: la prefabricación.

Se ha tratado de presentar los temas lo más simple posible, buscando con ello, que sean accesibles no sólo a ingenieros, sino a arquitectos y constructores.

Aspectos más complejos como el diseño de detalles para proveer las estructuras prefabricadas de ductilidad, redundancia y capacidad de absorber energía se han apenas mencionado, pues se consideró que eran demasiado especializados.

En este aspecto, es importante anotar que recientemente se han hecho grandes avances (Ver ref. 17, 18, 19, 20) y que su importancia en zonas de alto riesgo sísmico, es de primer orden.

El análisis antisísmico de estructuras prefabricadas es de por sí un tema bastante extenso. La ref. 21, es un primer intento de fijar unos detalles mínimos en estructuras prefabricadas en zonas sísmicas.

1. ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES EN EL PROYECTO DE ESTRUCTURAS PREFABRICADAS.

1.1 Generalidades

Es muy común la idea de que las estructuras prefabricadas se deban proyectar de tal forma que todas las partes en su fase final actúen monolíticamente, para así lograr un buen funcionamiento de éstas. Esta concepción se remonta a las épocas del comienzo de la prefabricación, cuando las piezas que se prefabricaban (con el fin de ahorrar formaletería), eran partes de una construcción monolítica. El desarrollo técnico ha ido desechando esta concepción y hoy en día es diseñador trata de escoger el sistema estático de modo que se adapte en lo posible a las propiedades de la construcción monolítica.

NOTA: Los números encerrados entre paréntesis, se refieren a la bibliografía al final del artículo.

Proveer la estructura de continuidad trae sin duda algunas ventajas (diagrama de momentos, protección en caso de incendio), pero también algunas desventajas (grandes momentos negativos en vigas T, tensiones debidas a temperatura y retracción, etc.); siendo sin embargo la principal desventaja, la dificultad para realizar esa continuidad, lo cual lógicamente se refleja en un alto costo.

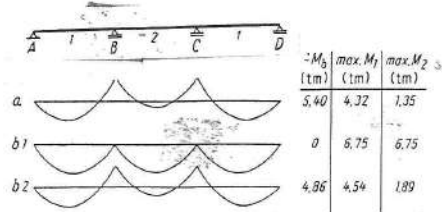
Desde el punto de vista técnico, se puede proyectar sin problemas una estructura estáticamente determinada; siempre y cuando se logre la unión correcta y simple de los elementos, tanto técnica como constructivamente. Este aspecto constituye uno de los problemas principales en el diseño de construcciones prefabricadas y se tratará en detalle más adelante.

En zonas sísmicas sin embargo, de acuerdo a los postulados básicos del diseño antisísmico, la estructura debe poseer ductilidad, redundancia y capacidad de absorber energía, siendo necesario proveer la estructura de detalles que cumplan con estos fines, aunque los miembros se calculen para la carga final o parte de esta como estáticamente determinados.

Existen otros aspectos adicionales que se deben tener en cuenta en el diseño de estructuras prefabricadas, los cuales trataremos brevemente a continuación.

a. Se debe chequear la resistencia de las piezas en cada uno de los estados desde la fabricación hasta el montaje (solicitaciones debidas a almacenaje en posición acostada o de cabeza, solicitaciones durante el transporte debido a frenado, solicitaciones durante el izaje, problemas de estabilidad, etc.).

b. Se debe prever con anticipación si el estado de una pieza luego de montada coincide o no con su estado de uso. Si no coincide se debe tener en cuenta la redistribución causada por el flujo plástico, ya que el estado de solicitaciones de un sistema estáticamente indeterminado, que se dividió en partes para su fabricación, corresponde en general, al estado, que hubiera tenido si se hubiera construido de una vez, ya que el flujo plástico en general disminuye y redistribuye las tensiones. Sin embargo, para secciones y cargas grandes (por ejemplo puentes), se debe chequear si esta simplificación todavía es correcta. Para ilustrar lo anterior, examinemos el caso de una viga de tres luces según (1).



- a. Momentos en la viga continua
- b1. Durante el montaje
- b2. Estado definitivo

Se puede pues ver, que como consecuencia del flujo plástico, los momentos negativos corresponden aproximadamente a 90% de los de viga construida monolíticamente desde el principio.

c. Se deben chequear los apoyos y las uniones. Aquí se debe tener muy en cuenta el aspecto de las tolerancias y que influencia puede tener una combinación desfavorable de éstas, pues cada una de ellas de por sí, puede ser aceptable, sin embargo, si se suman desfavorablemente pueden representar un peligro.

d. Se debe prestar especial atención a los problemas de estabilidad, no sólo para la estructura total, sino para cada una de las piezas.

e. En general se utilizan las placas como diafragmas para la transmisión de fuerzas horizontales o como rigidezadoras. Para asegurar estas funciones se deben hacer los chequeos necesarios durante el cálculo y se deben tomar las medidas constructivas necesarias.

f. Se debe diseñar la estructura considerando la posibilidad de un incendio.

2. SISTEMAS ESTRUCTURALES Y CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS.

2.1 Instalaciones industriales

La figura Nº 1 muestra las características generales de este tipo de construcciones.

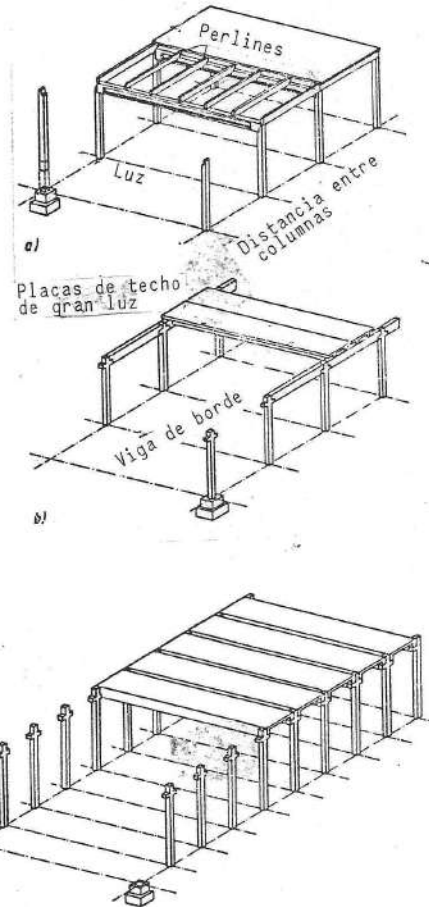


Figura 1.

En las figuras 2, 3 y 4 se pueden ver las características más importantes de una instalación industrial construida en Francfort.

Como se ve las uniones se tratan como articuladas y la estabilidad del sistema se logra empotrando las columnas en las fundaciones. Por medio de un perno se evita el desplazamiento lateral de los prefabricados, posibilitando por tanto la distribución en muchas columnas de las fuerzas horizontales debidas al viento y a la grúa. Es importante notar también la forma de las vigas de la grúa, pues debido a ésta (ver figura 4 y 5) se logra la introducción directa de la carga de la viga en las columnas.

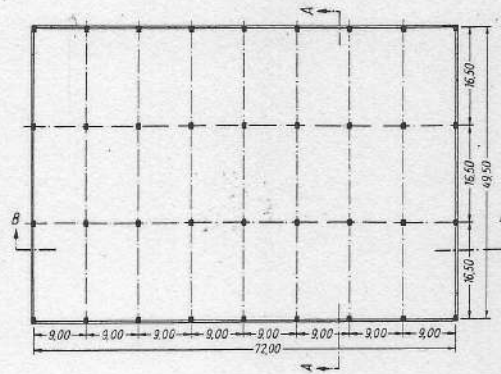


Figura 2.

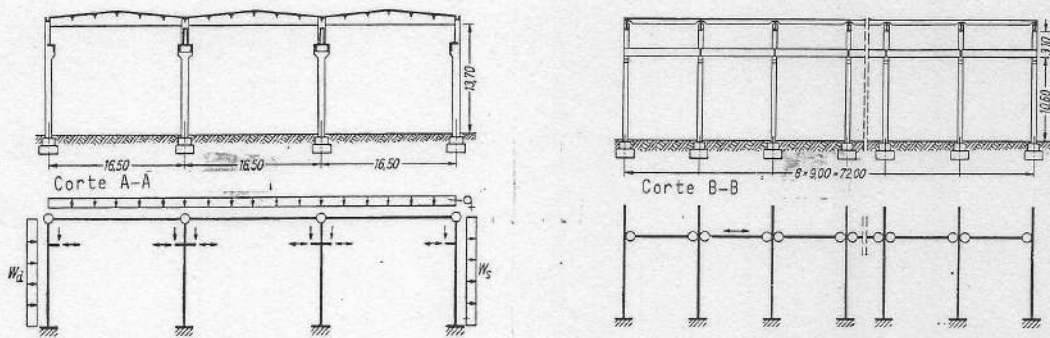


Figura 3.

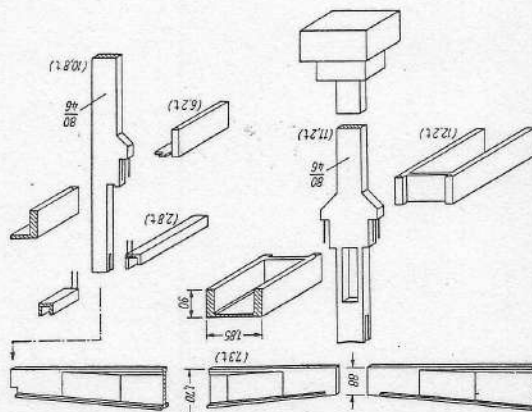


Figura 5.

En la figura 6 se ve un detalle de este tipo de unión, muy utilizado en construcciones prefabricadas.

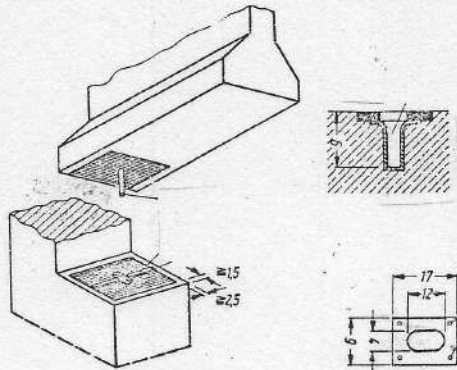


Figura 6.

En la figura 7 se ve un corte de otra instalación industrial y su respectivo sistema estructural.

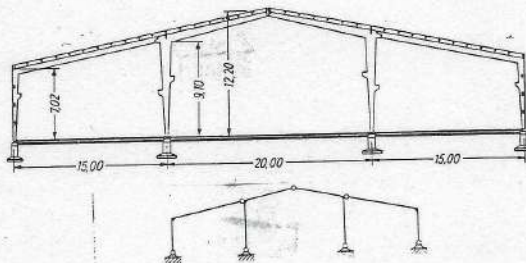


Figura 7.

Lógicamente pueden también prefabricarse estructuras en diente de sierra, siendo muchas las posibilidades de unir los elementos. En la figura 8, se ven varios sistemas estructurales posibles y detalles de los sistemas g y h.

Por último y para mostrar la variedad de soluciones, se muestra en la figura 9, el corte transversal de una obra en la cual se utilizaron cerchas parcialmente prefabricadas con diagonales y banda inferior pretensadas con la característica especial, de que en el centro reciben una carga de 30 t causada por la grúa. Para cada una de las cerchas se prefabricaron las barras verticales y

diagonales; mientras que las bandas superior e inferior se vaciaron en el sitio.

En la figura 10, se ve una foto de una instalación industrial en construcción.

2.2 Edificios de varios pisos

Como se mencionó en el numeral 1, la ejecución de uniones monolíticas en estructuras prefabricadas es difícil y costosa. Por esto, generalmente las cargas horizontales se transmiten a puntos fijos rígidos como la caja de escaleras o ascensores, en vez de tratar que estas sean transmitidas por acción de pórtico.

Se busca por tanto que las columnas reciban solamente carga axial y transportar las fuerzas horizontales por medio de diafragmas horizontales hasta los núcleos rígidos y de allí al suelo.

En construcciones prefabricadas, que cumplan con esta concepción de transmisión de las cargas, se debe poner especial atención en el diseño de las placas, para que puedan desarrollar esta función de diafragmas, ya que si las juntas entre las partes prefabricadas no están correctamente calculadas y construidas, no se puede asegurar el buen funcionamiento de este modelo de transmisión de cargas.

En la figura 11a, se ve una vista espacial de un edificio con las características anotadas; en la figura 11b, se ven dos posibilidades del sistema estructural; en la figura 11c, un detalle de los nudos (2), (3), y en la figura 11d, un esquema sobre la transmisión de fuerzas horizontales.

No se debe olvidar que en zonas de alta sismicidad, es necesario diseñar detalles especiales para proveer la estructura de ductilidad y redundancia.

Otro tipo de sistema muy utilizado es el llamado de grandes paneles. En la figura 12, se muestra una de estas construcciones en las cuales, las paredes y placas se consideran como componentes de una estructura plegada espacial, cuyas aristas en general no son monolíticas. En la figura 13, se muestra esquemáticamente en una celda el principio de estabilidad de tales construcciones. En la referencia (4), se encuentra información

sobre este tipo de estructuras de grandes paneles, sobre las cuales, y por su complejidad, no se profundizará en estas notas.

En la figura 14, se muestran otros dos ejemplos de estructuras prefabricadas.

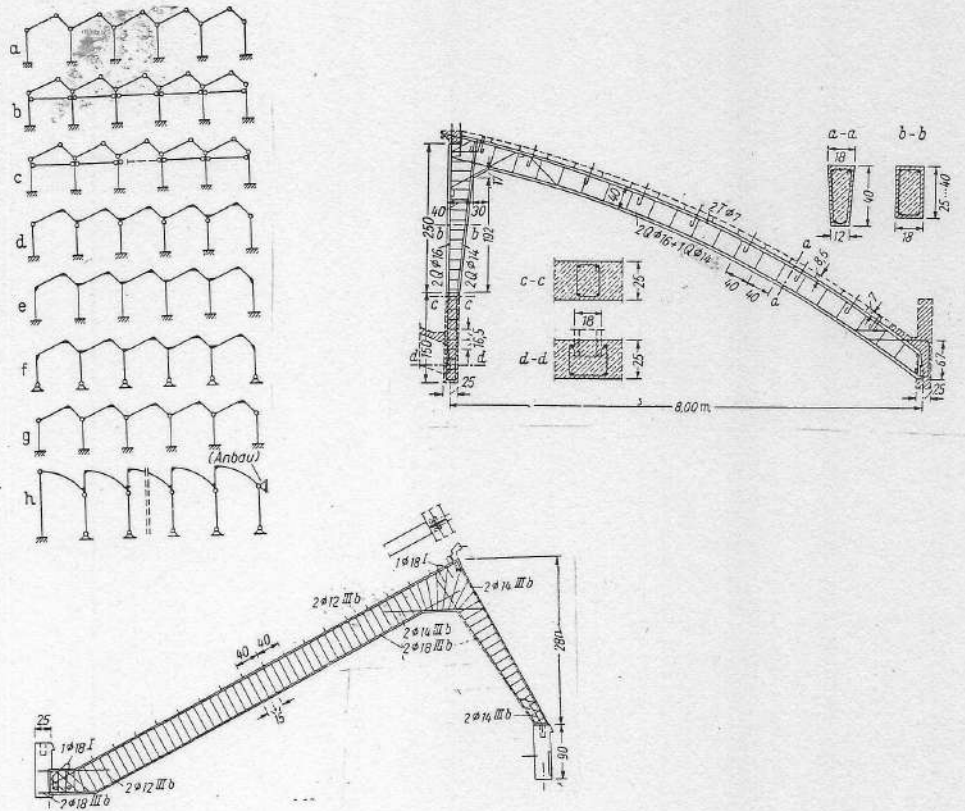


Figura 8.

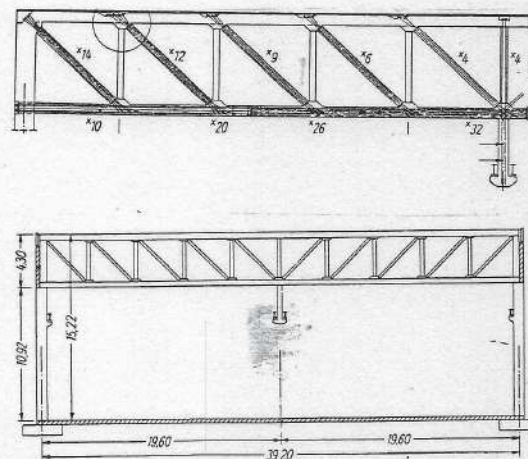


Figura 9.

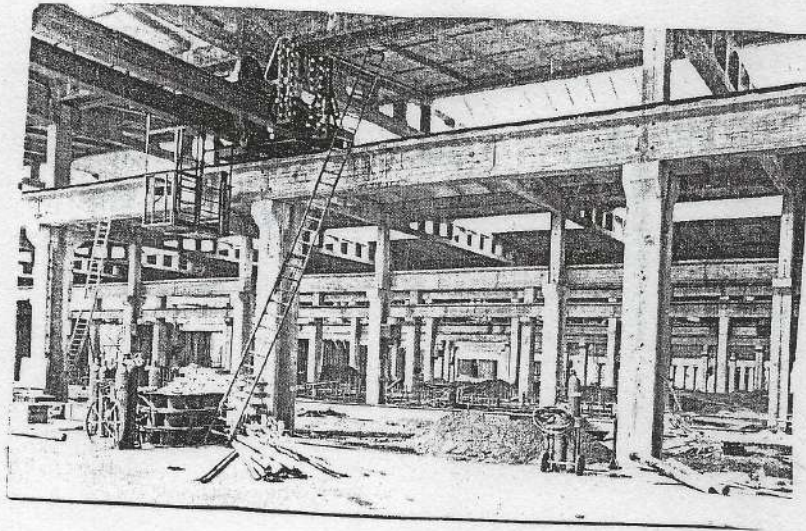
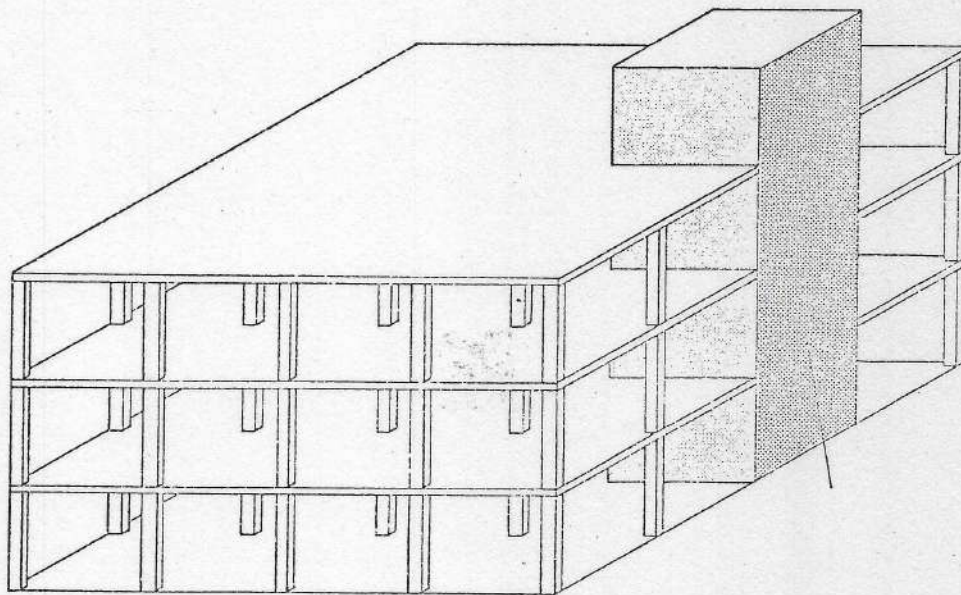


Figura 10



NOTA: La disposición mostrada es muy desfavorable desde el punto de vista sísmico, pues introduce grandes torsiones. Una localización simétrica del núcleo sería ideal.

Figura 11a.

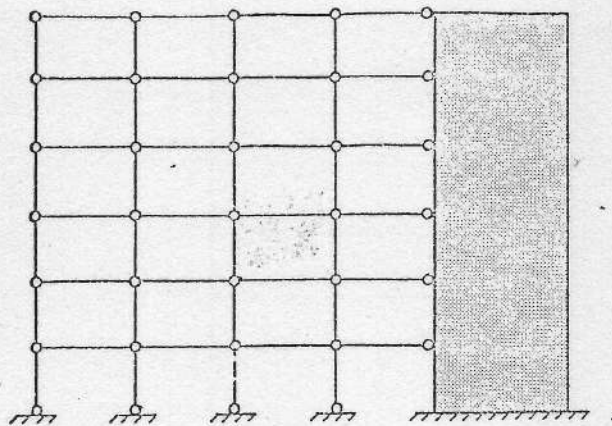
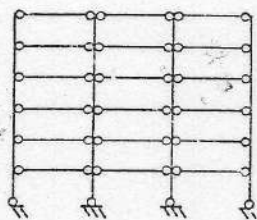
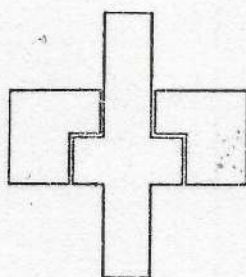
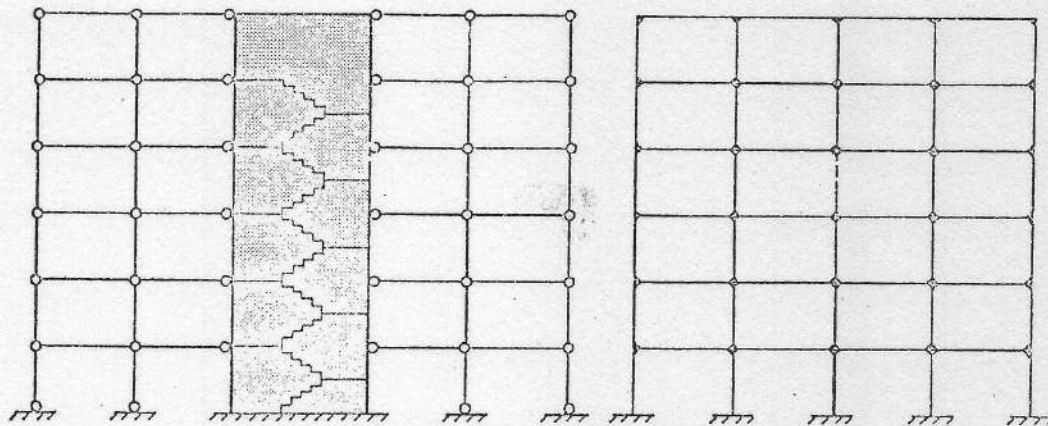


Figura 11b.



NOTA: Este tipo de nudos, no son aconsejables en zonas de alta sismicidad.

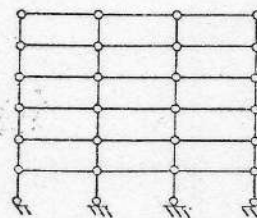
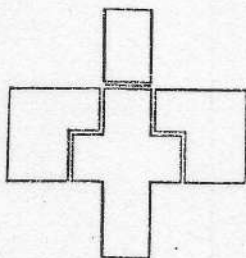


Figura 11c.

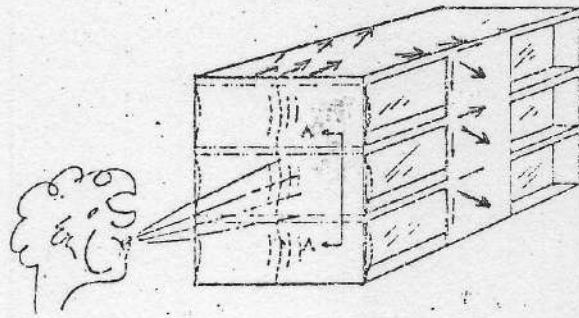


Figura 11d.

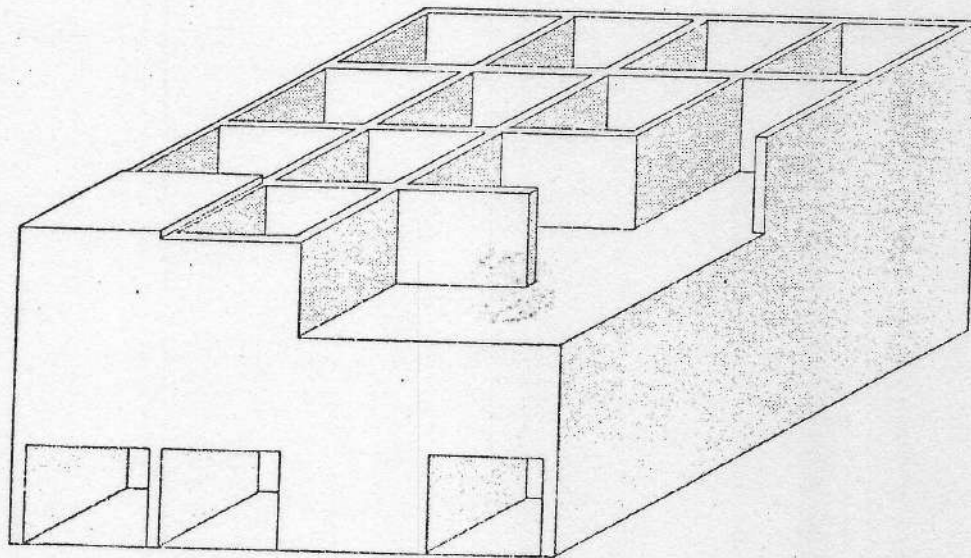


Figura 12.

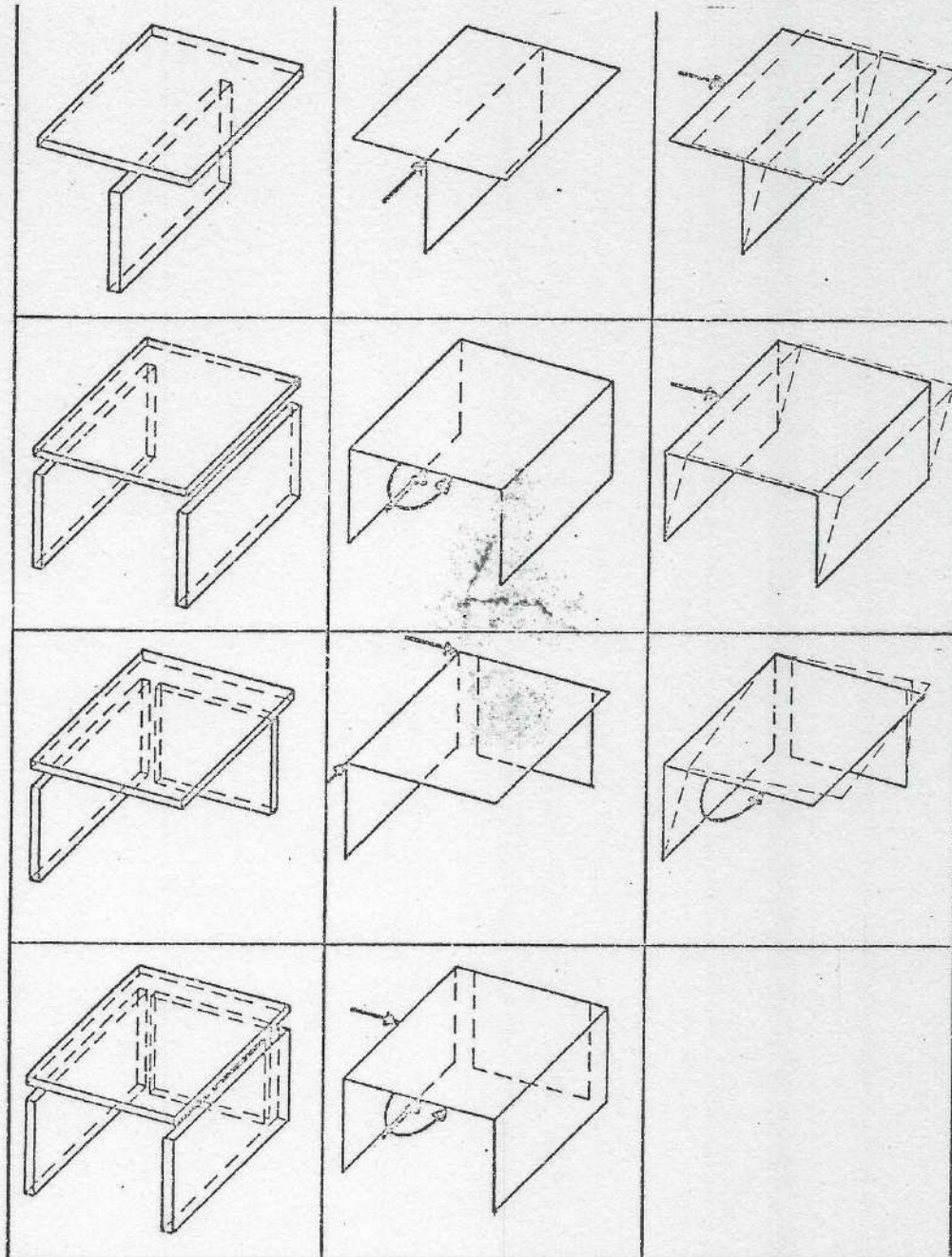


Figura 1

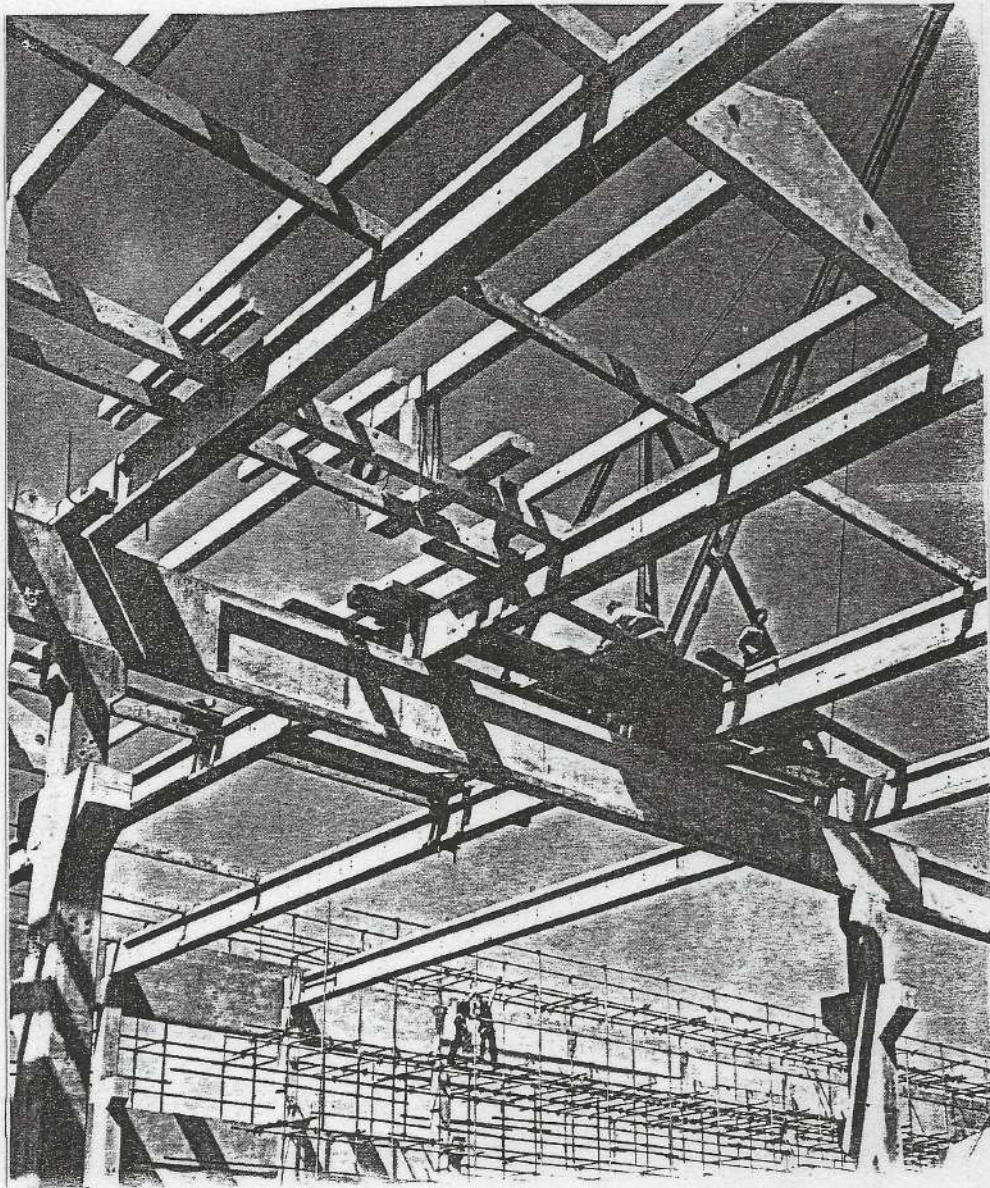


Figura 14.

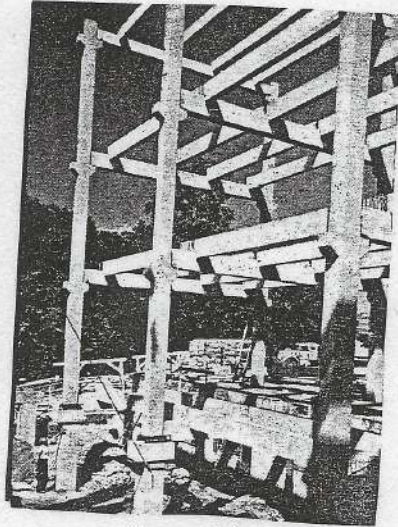


Figura 14.

2

2.3 Ejemplos de otras estructuras

En muchos otros campos se utilizan las construcciones prefabricadas. En puentes por ejemplo, especialmente cuando estos son muy largos, se presenta uno de los principales campos de aplicación. En Louisiane se construyó un puente de 38,6 km de longitud, para el cual se prefabricaron 2.232 losas iguales de 17,1 m y 185 t de peso; 2.240 vigas de 9,75, y 18 t de peso y 4.886 pilotes iguales (Ver Fig. 15). En Londres se construyó un puente

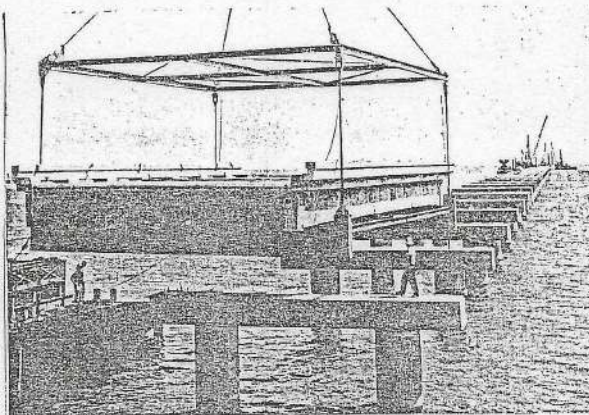


Figura 15.

con piezas prefabricadas, las cuales se unieron después por medio de pretensado para formar una estructura continua. En la figura 16 se ve un detalle de las piezas que conformaban el puente.

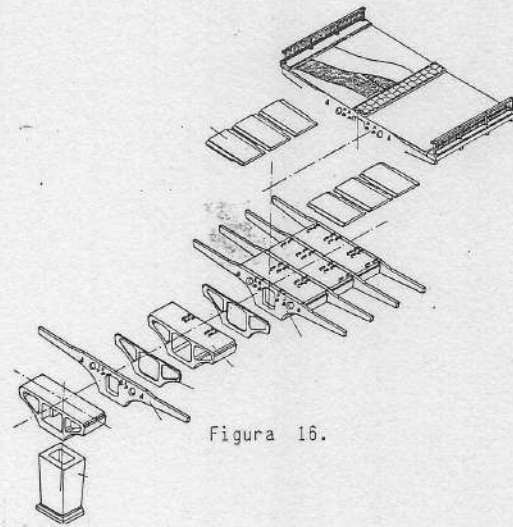


Figura 16.

En la figura 17, se ven las piezas utilizadas en un puente sobre el Nteroi en Brasil (5); en la figura 18 se ve una etapa de la construcción de un puente en Illinois.

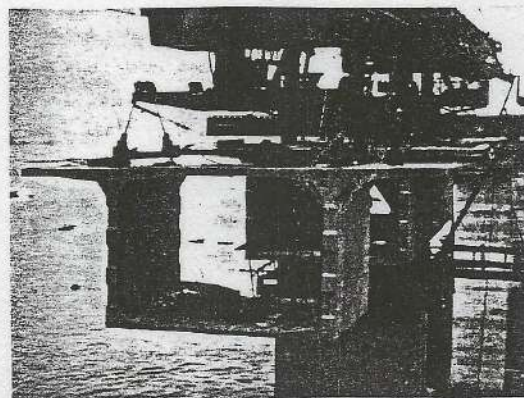


Figura 17.

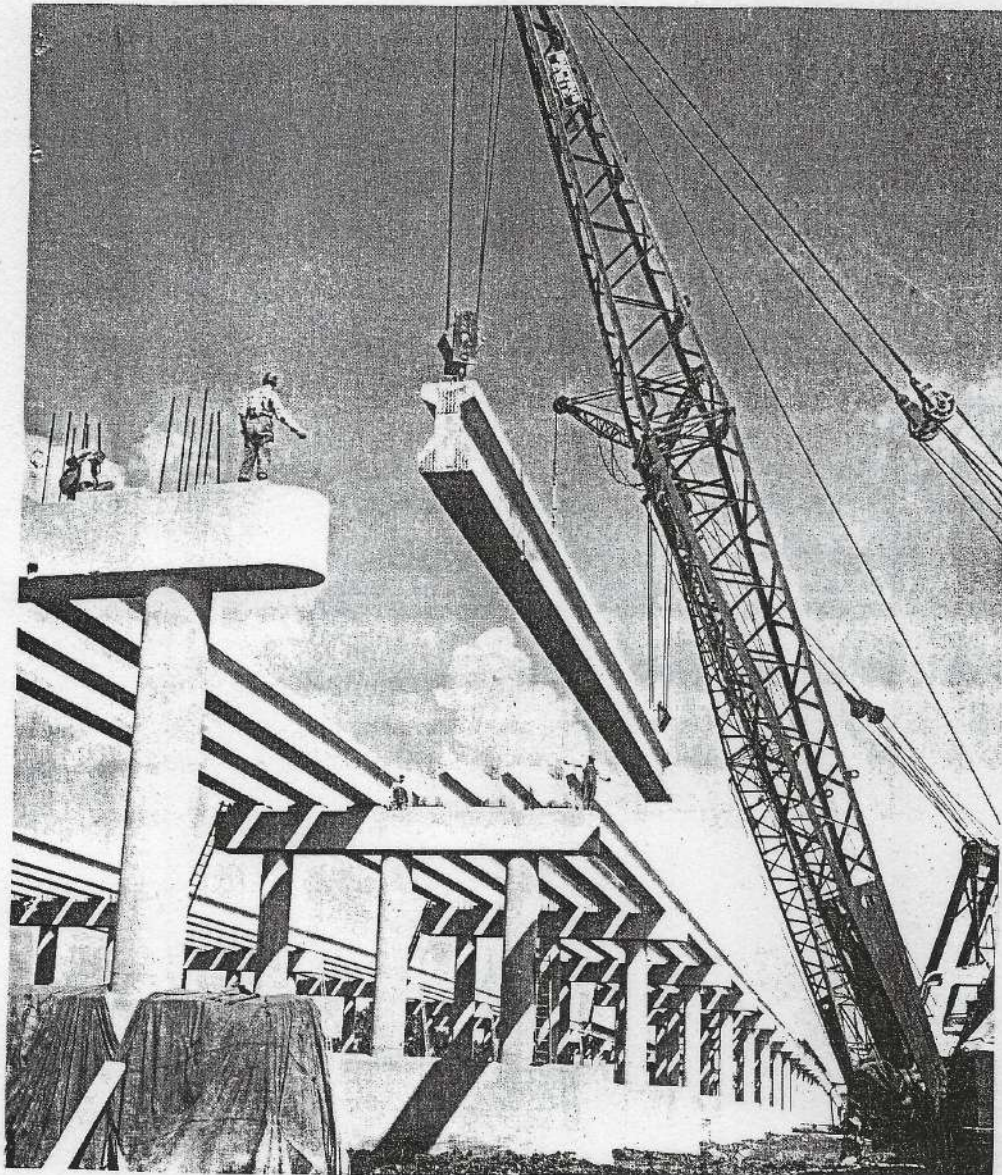
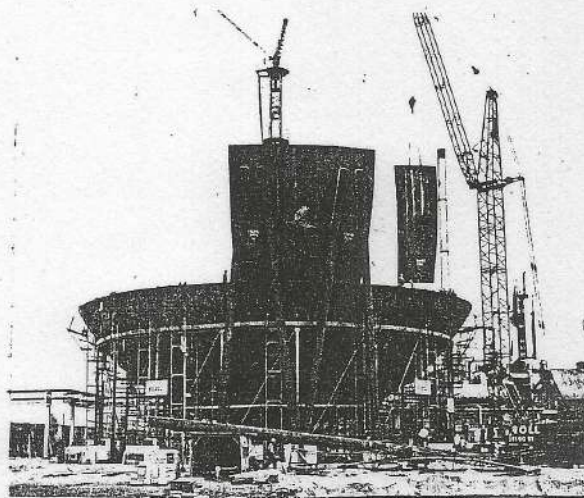
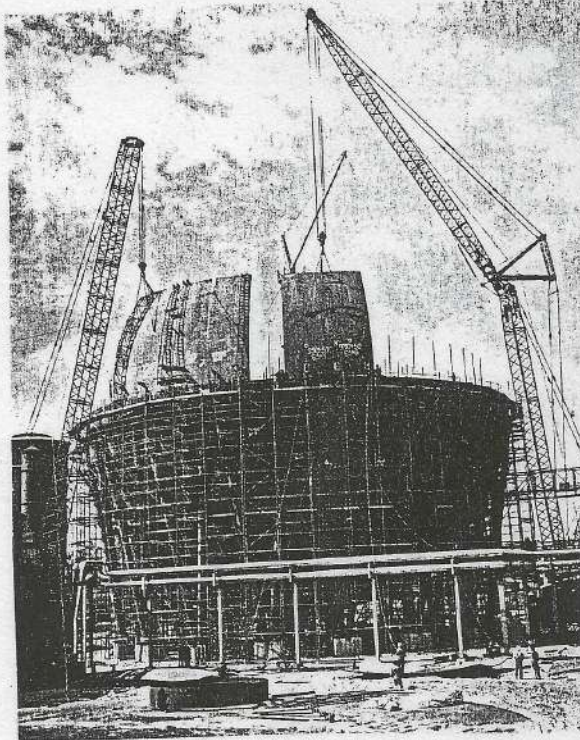


Figura 18.

Aún en tanques encuentra aplicación. En la figura 19, se ve el proceso de construcción de un gran tanque prefabricado. En túneles, torres, silos, cúpulas, etc., se presentan grandes posibilidades de aplicación de la prefabricación, pudiéndose decir que no hay campo en que no encuentre uso la

prefabricación, generalmente con grandes economías de tiempo y dinero.

En la figura 20, se ven otros ejemplos y posibilidades de la prefabricación, en las cuales se utilizaron los más variados sistemas estructurales.



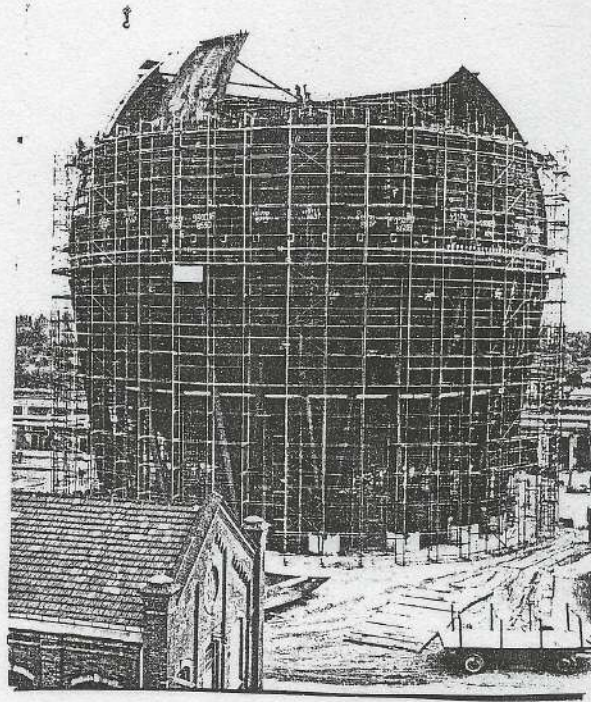


Figura 19.

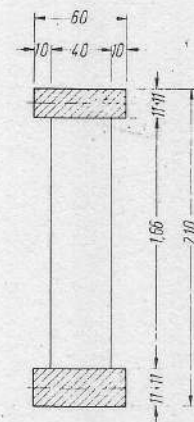
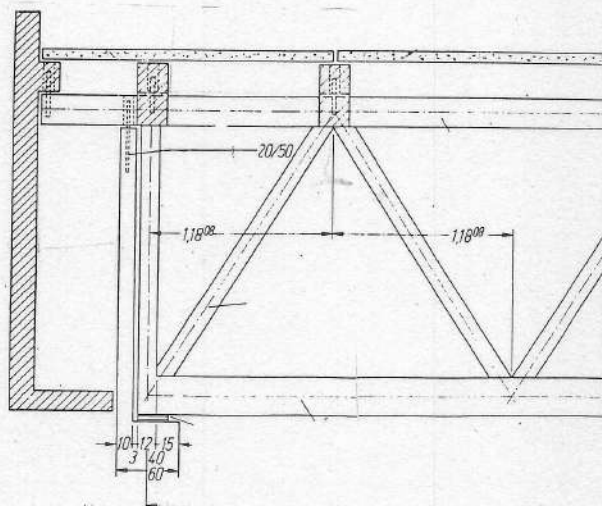
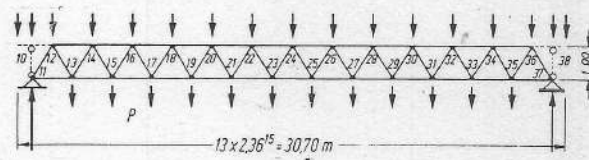


Figura 20.

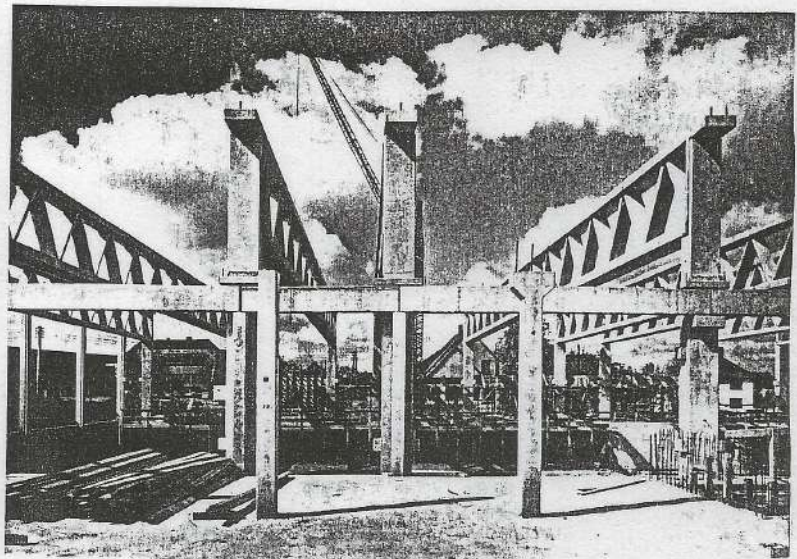
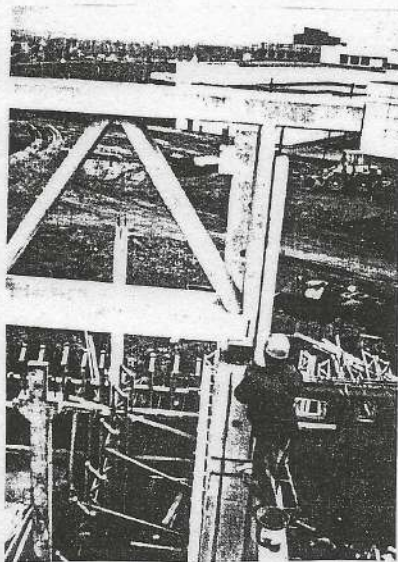
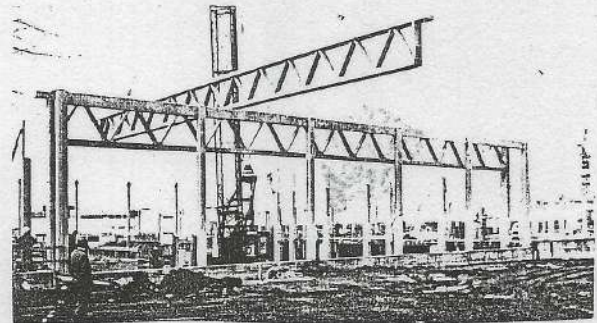
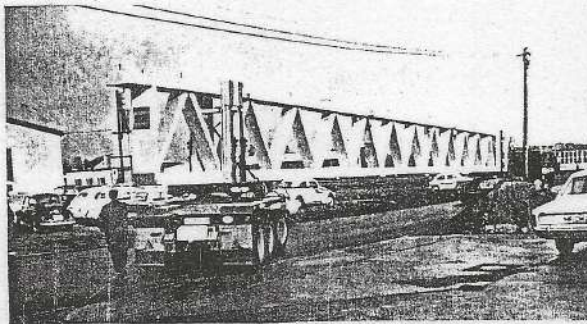
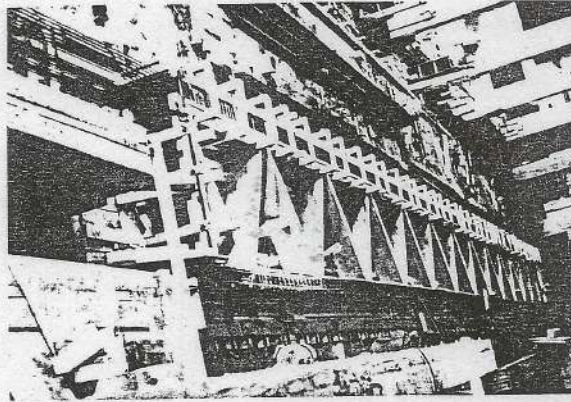


Figura 20.

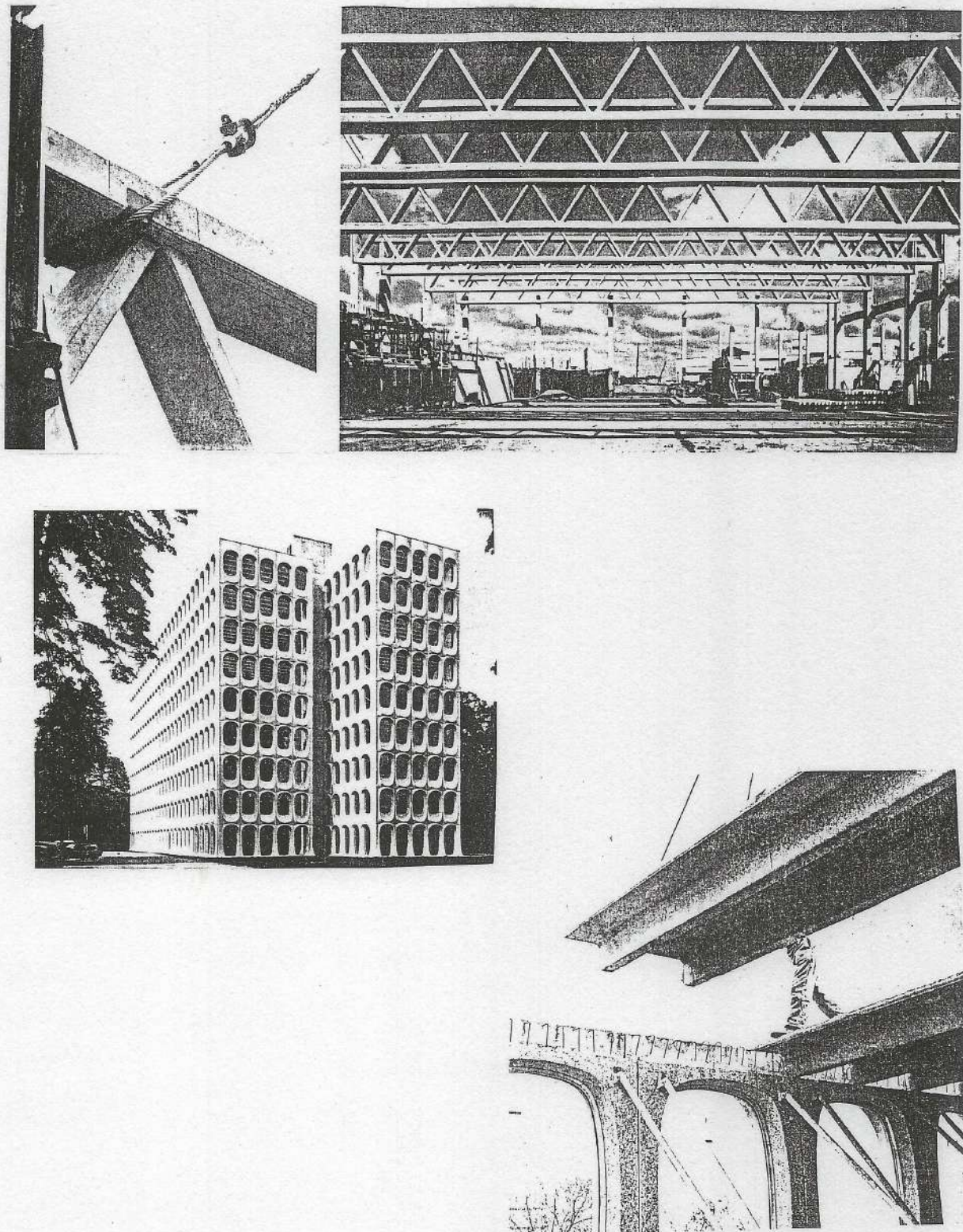
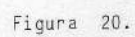


Figura 20.



Figura 20.



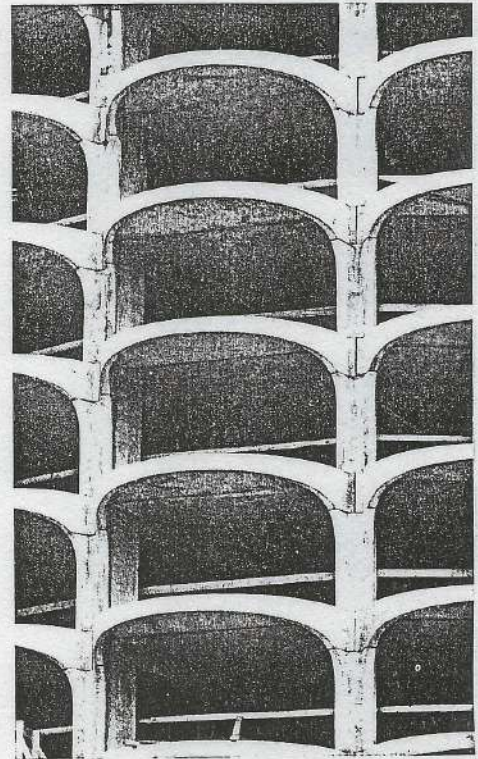
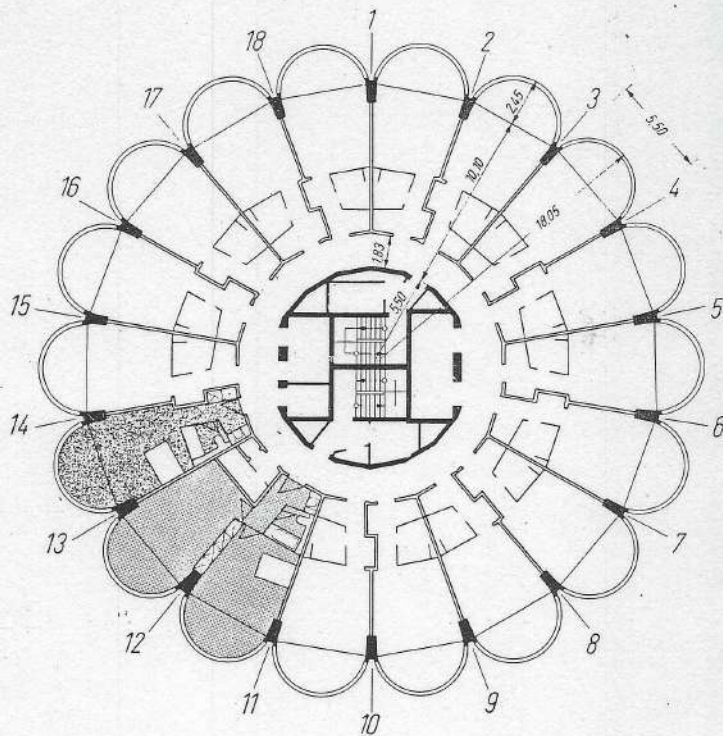


Figura 20.

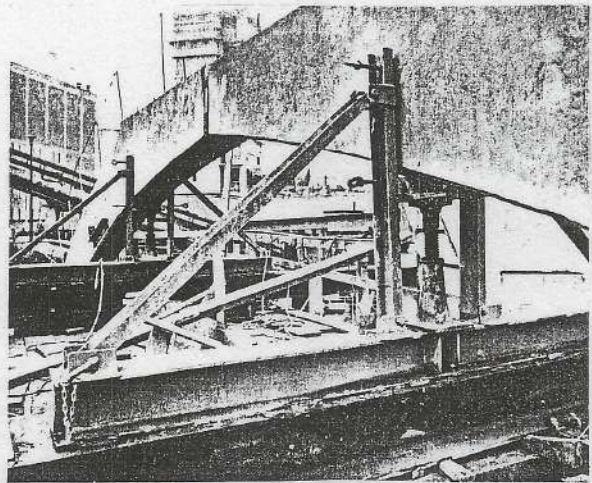
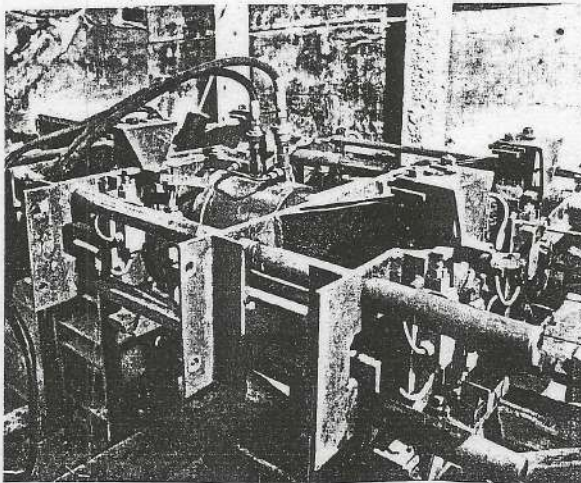
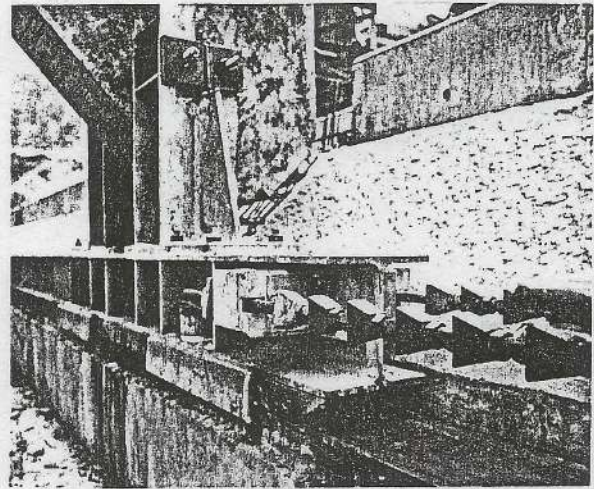
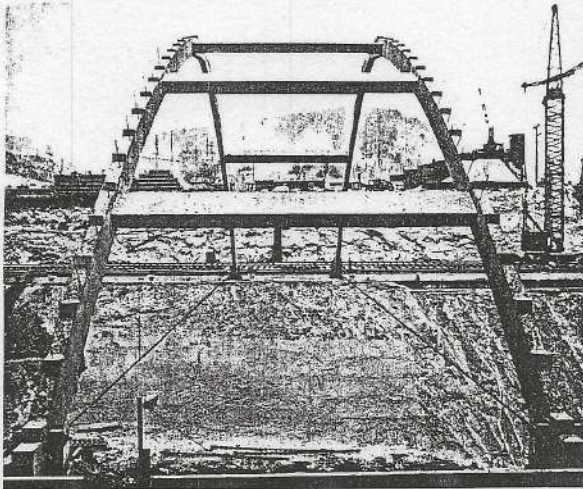
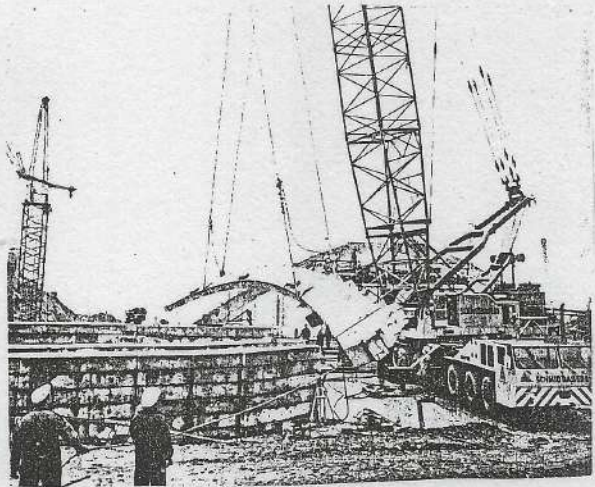
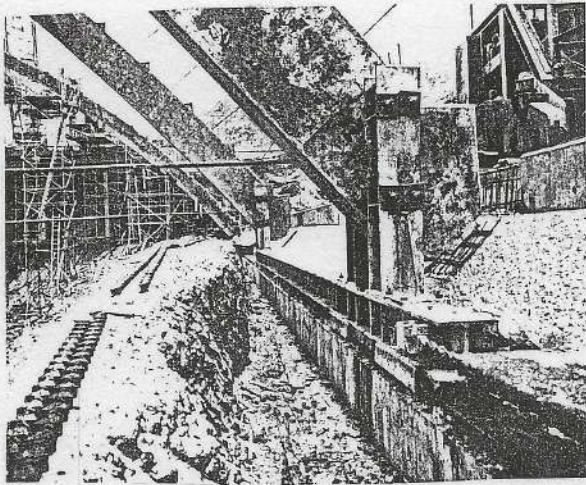


Figura 20.

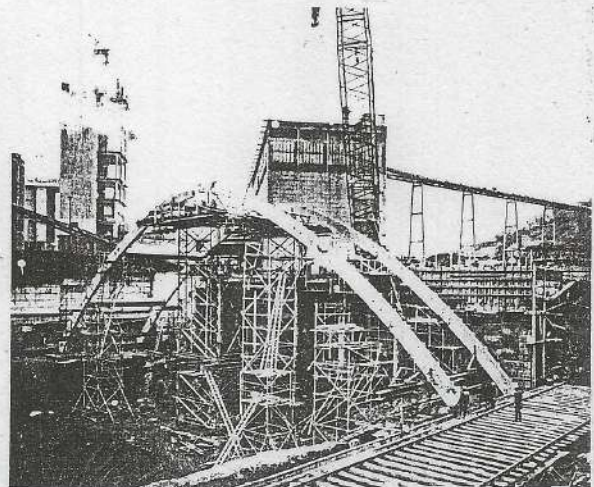
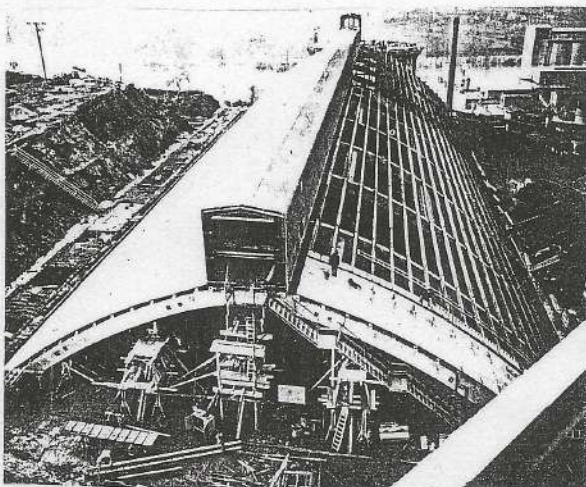
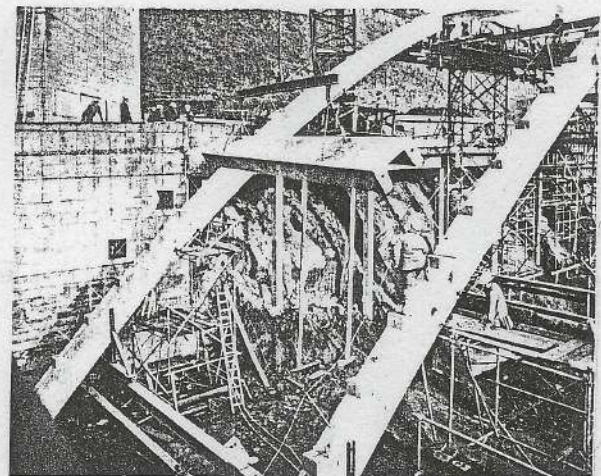
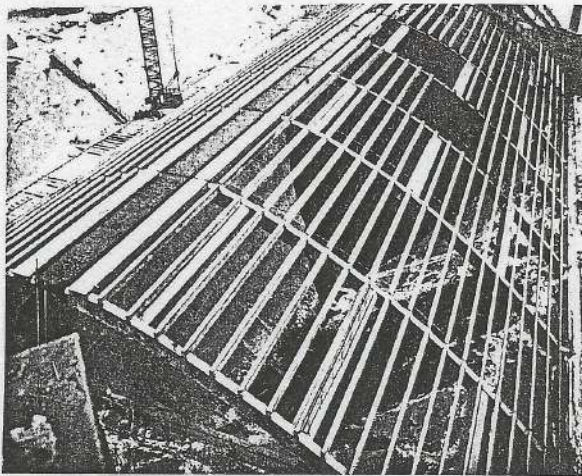
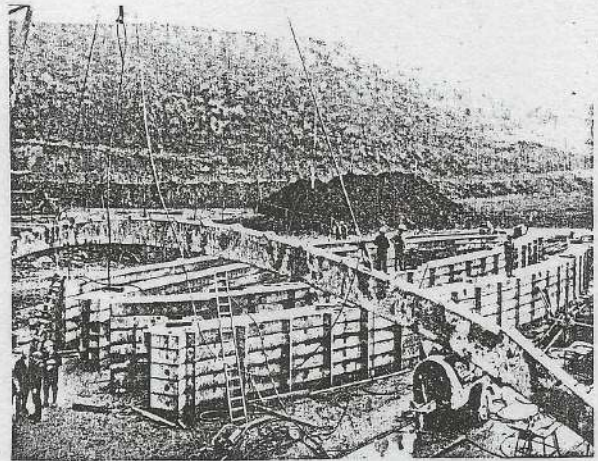
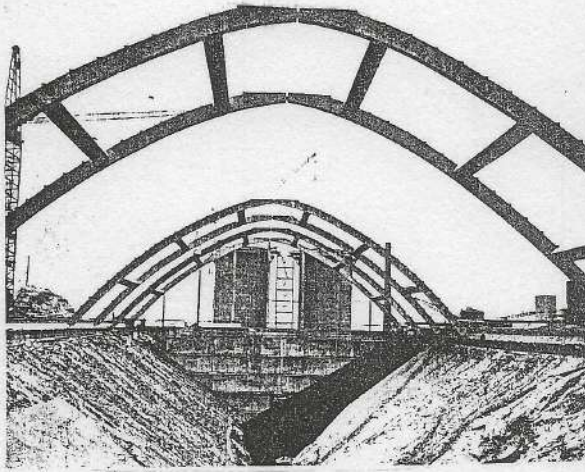


Figura 20.

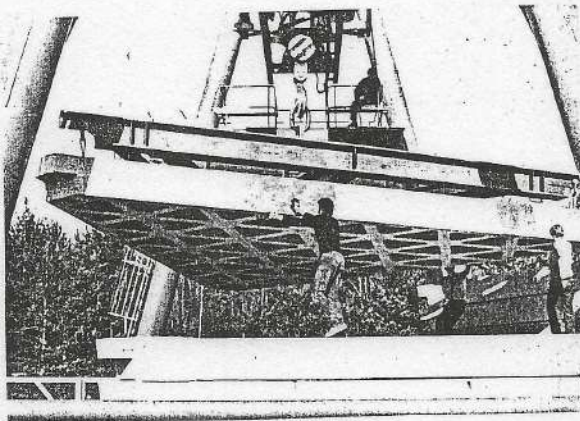
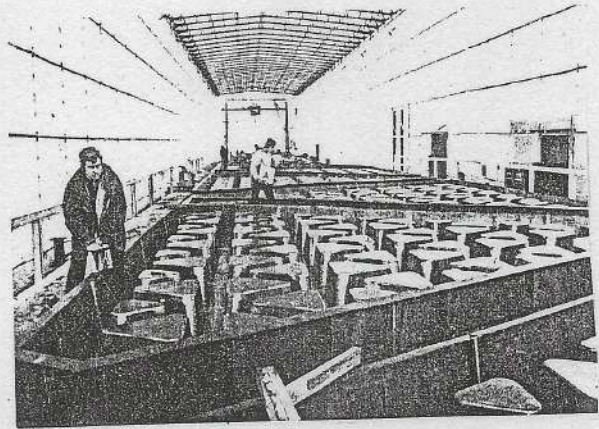


Figura 20.

3. UNIONES EN ESTRUCTURAS PREFABRICADAS.

Tal vez uno de los aspectos fundamentales en la prefabricación es el de las uniones entre los elementos de la estructura. Mientras más simples sean éstas, más económica, más exitosa es la construcción prefabricada.

A continuación se describirán algunos de los sistemas de unión más utilizados y en un capítulo posterior se entrarán a analizar algunos aspectos estructurales importantes que se presentan en el diseño de éstas.

3.1 Unión fundación columna

Aunque se ha ejecutado la unión de las fundaciones vaciadas en el sitio con columnas prefabricadas, lo más común hoy en día, es la utilización de fundaciones prefabricadas. En general estas tienen la forma mostrada en la figura 21a. En la figura

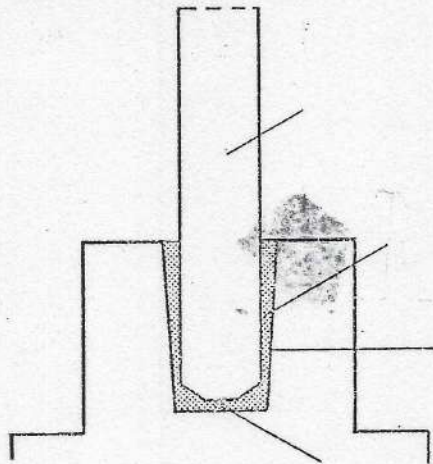


Figura 21a.

21b se ve la conocida como fundación sueca. Estas están diseñadas de tal forma que producen un empostramiento de la columna, aspecto fundamental en la estabilidad de la construcción, especialmente de instalaciones industriales. Para que la fundación esté en capacidad de proveer este empostramiento debe cumplir varias condiciones, especialmente que las paredes tengan una profundidad suficiente y que el espesor de estas sea grande. En la figura 22 se el detalle de unión de una columna prefabricada con una fundación vaciada en el sitio. (6)

3.2 Unión columna - columna

El detalle mostrado en la figura 22 de la unión de una fundación con una columna, se puede utilizar también en la unión de columnas.

En la figura 23 se muestra una recopilación de los sistemas de unión más comunes en columnas. Los sistemas a, c y e, son aptos sólo para transmitir fuerzas de compresión; en el sistema b, se permiten alguna pequeñas excentricidades; en el sistema d se cumplen los requisitos de traslapes y es el único apto de los mostrados para transmitir momentos.

Mencionaremos aquí algunas de las posibilidades que se tiene para traslapar el refuerzo, mostrando así la versatilidad y posibilidad de otras uniones fuera de las mostradas en las figuras 22 y 23.

En la figura 24a, b, c y d, aparecen varios dispositivos para unir el refuerzo, siendo el último el más utilizado. En la figura 24 c, se ve el

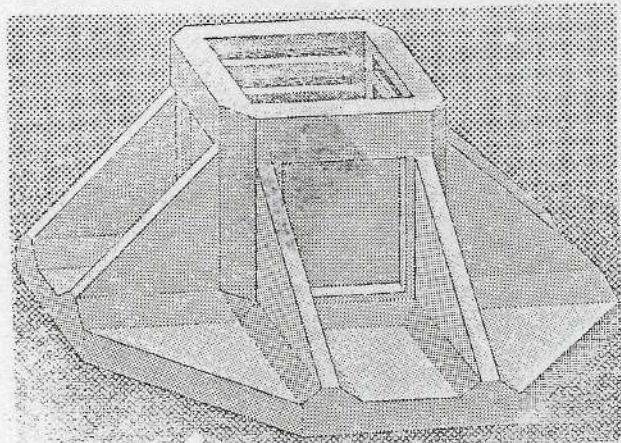


Figura 21b.

traslapo con termita, en el cual un dispositivo especial lleno de aluminio y óxido de hierro, se conecta al punto donde se va a efectuar el traslapo y se enciende, produciendo una reacción en la cual aparece hierro fluido, que ejecuta el traslapo. Este método constituye el paso de la soldadura y conlleva los mismos cuidados que éste. No se debe utilizar para aceros tratados en frío, no se debe utilizar cuando existen cargas dinámicas y el proceso de soldadura debe ser hecho por personal experto en la soldadura de acero de refuerzo para el concreto, ya que este no es producido con

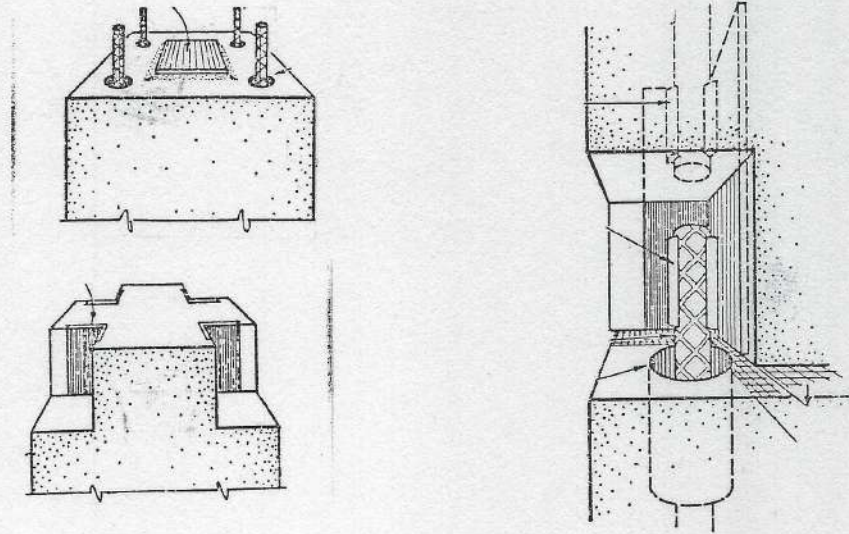


Figura 22.

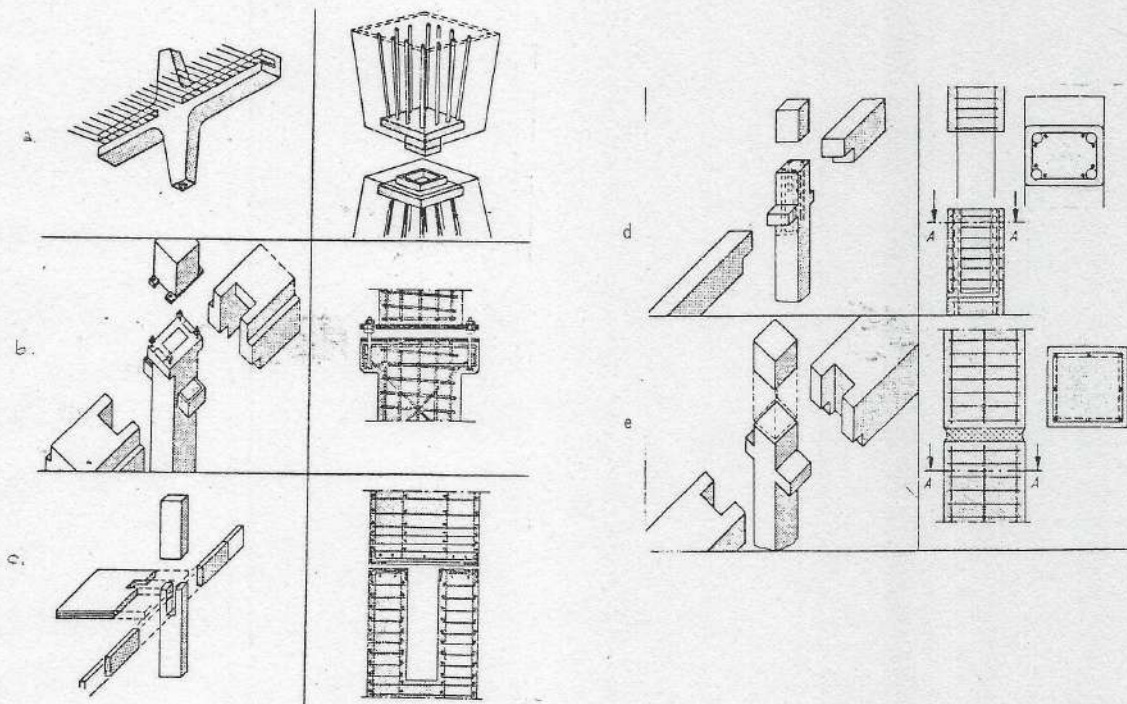


Figura 23.

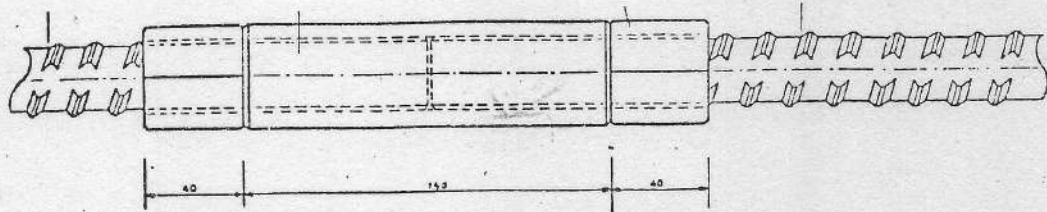


Figura 24a.

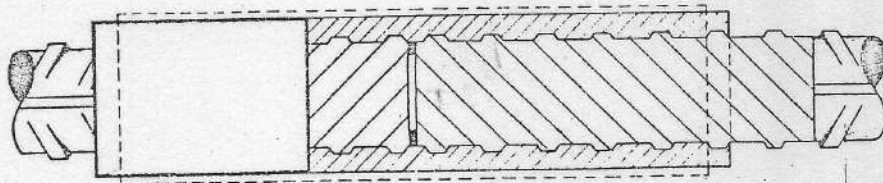


Figura 24b.

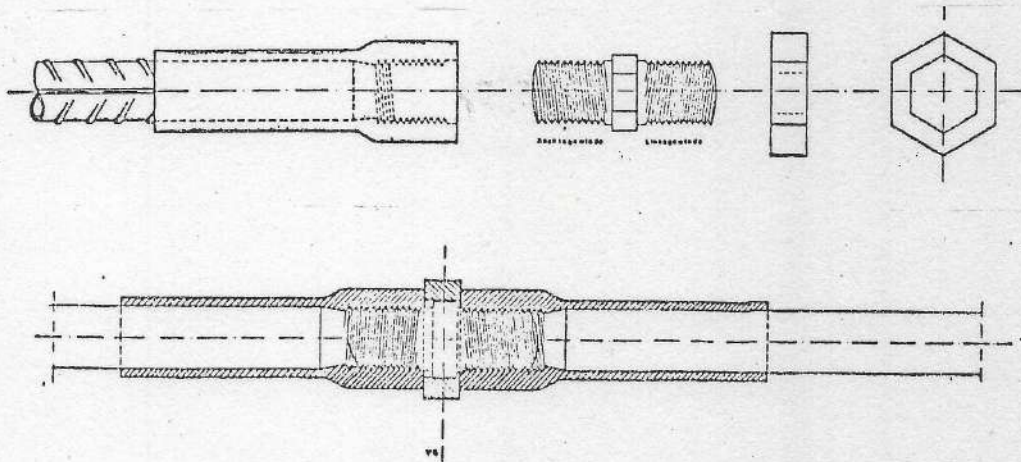


Figura 24c.

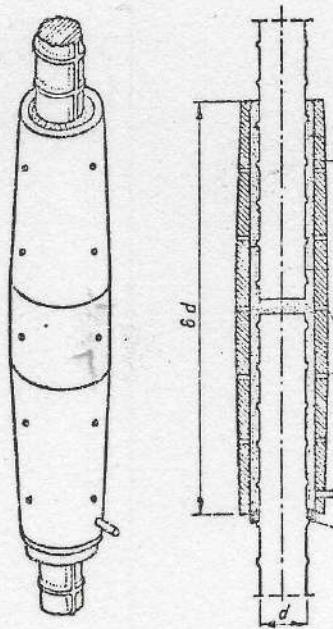


Figura 24d

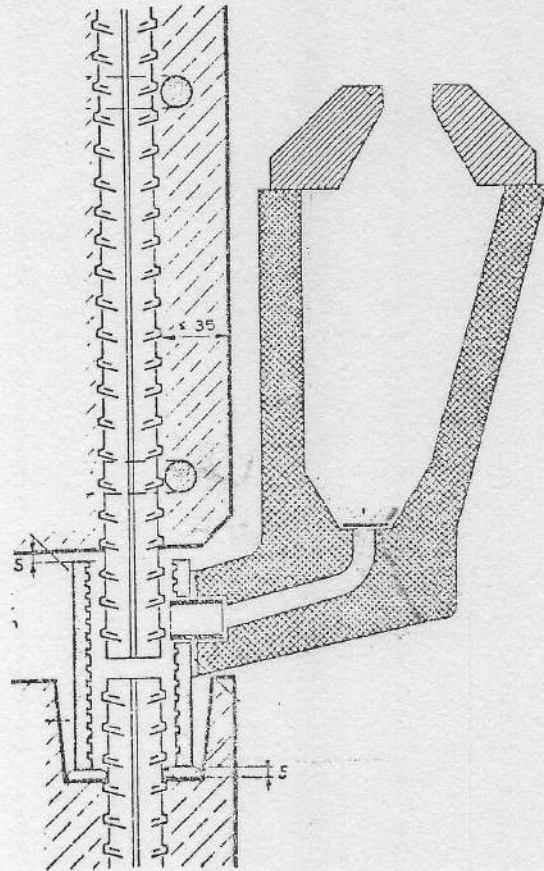


Figura 24e.

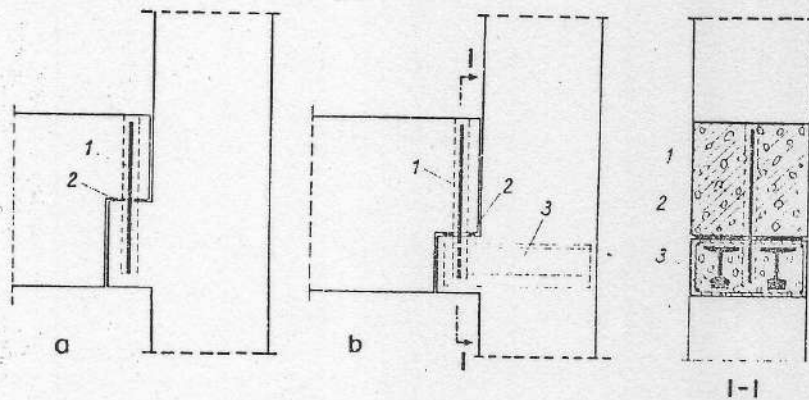
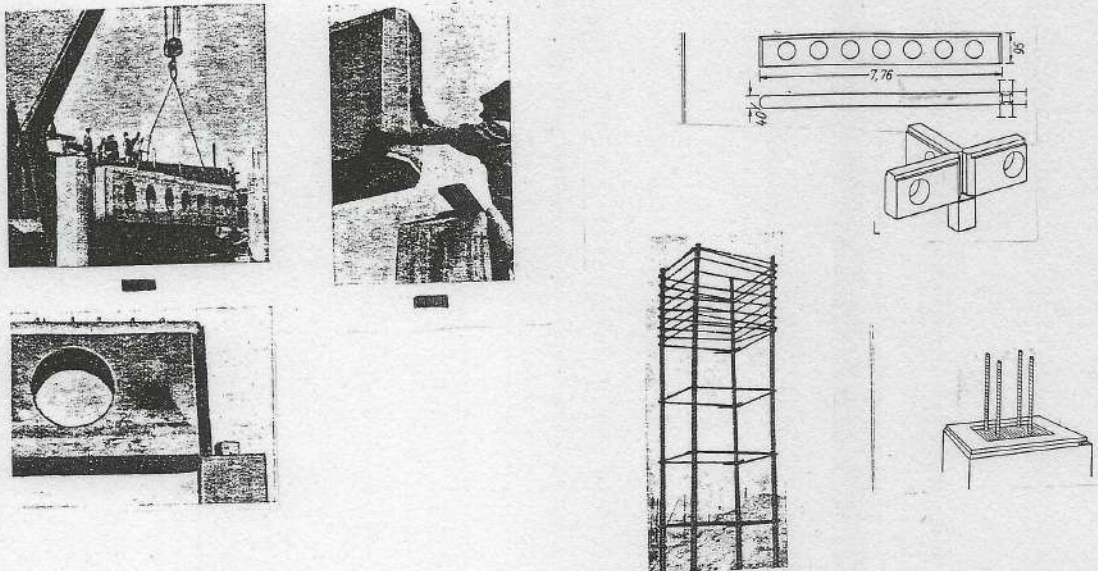
el fin de que sea soldado, siendo por tanto su soldadura diferente a la del acero utilizado en estructuras metálicas por ejemplo y exigiendo por tanto, como se dijo arriba, un personal experto para cada labor. (7)

3.3 Unión viga - columna

En la figura 25, se ve en forma esquemática la unión de los elementos en el sistema S K - Berlín y una serie de detalles adicionales de uniones entre vigas y columnas. En la figura 26 se ve una conexión en cuchillo tomada de la referencia (6). Esquemas como los mostrados en la figura 25, se pueden aplicar con ayuda de soldadura y pretensado en zonas sísmicas (17).

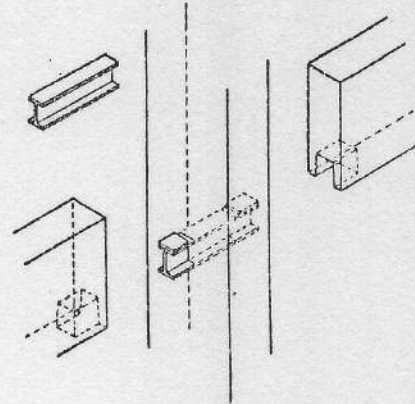
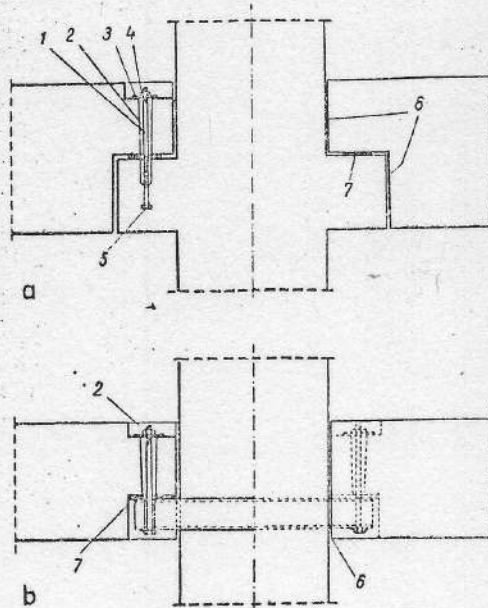
3.4 Unión entre los elementos de la losa

En 2.2 se discutió el sistema estructural más comúnmente usado en estructuras prefabricadas (columnas reciben la carga vertical y las paredes de cizalladura la carga horizontal) y se hizo notar allí la importancia del correcto diseño de las placas, para que actuaran como diafragmas horizontales, con capacidad para transmitir las fuerzas debidas al viento o sismo. A este respecto se debe distinguir si la placa cumple fines simplemente rigidizadores (por ejemplo evitar el pandeo de una viga esbelta), o si tiene el fin de transmitir fuerzas. En el primer caso, con algunas medidas constructivas se puede lograr el efecto deseado (ver fig. 27), mientras que en el segundo es generalmente necesario un análisis detallado.



1. Pasador
2. Apoyo de neopreno
3. Perfil

Figura 25



- 1. Pasador
- 2. Mortero
- 3. Arandela
- 4. Hembra

- 5. Tornillo vaciado en concreto
- 6. Mortero
- 7. Apoyo elástico

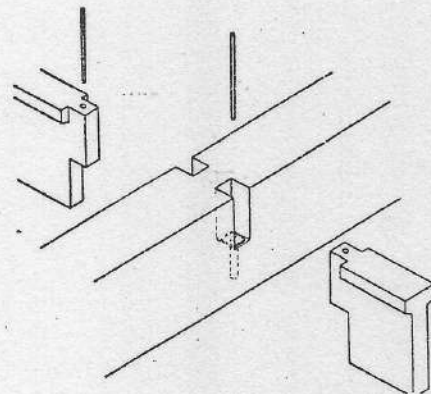
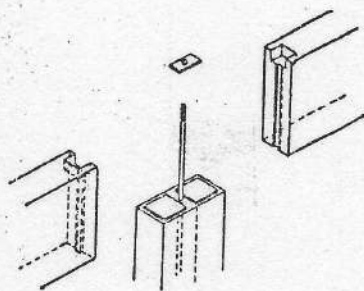


Figura 25.

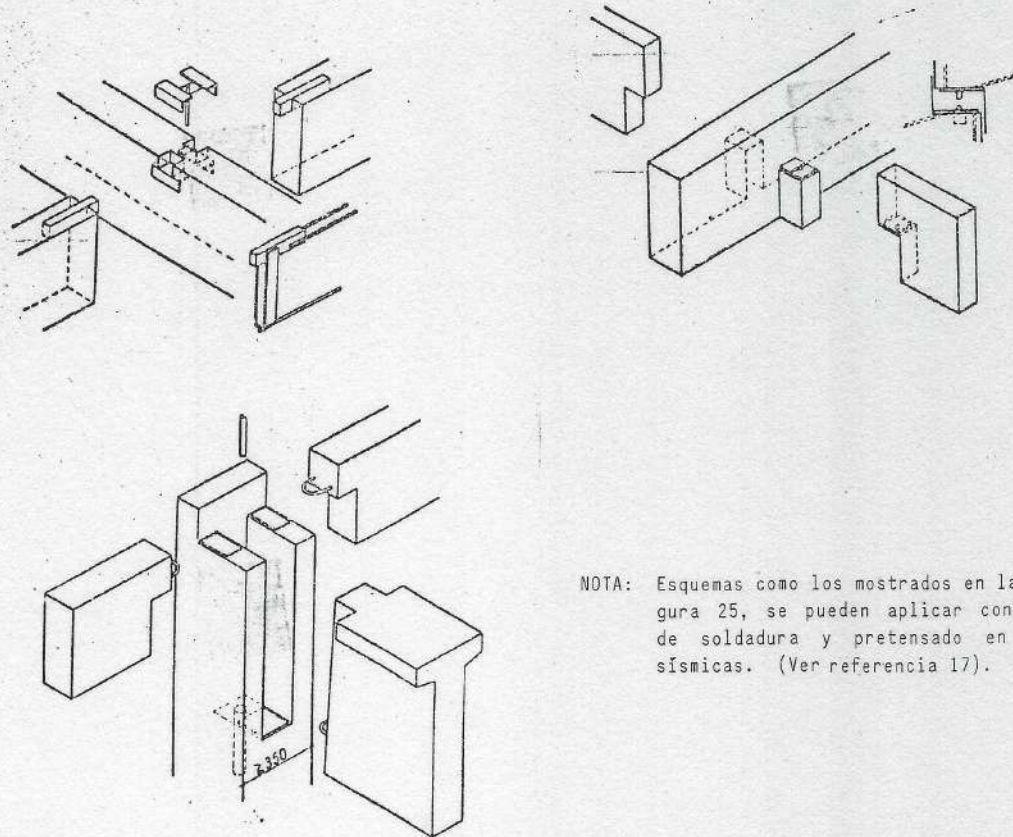


Figura 25.

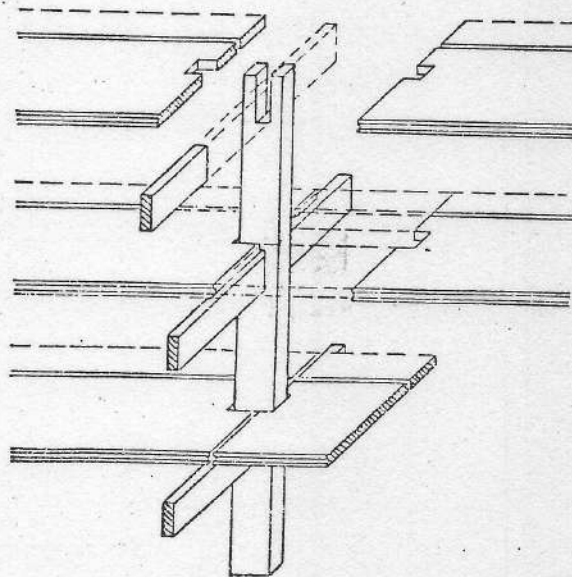


Figura 25.

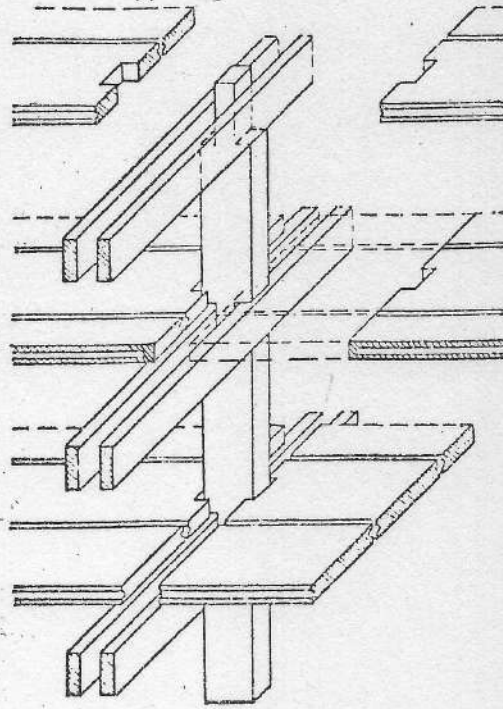


Figura 25.

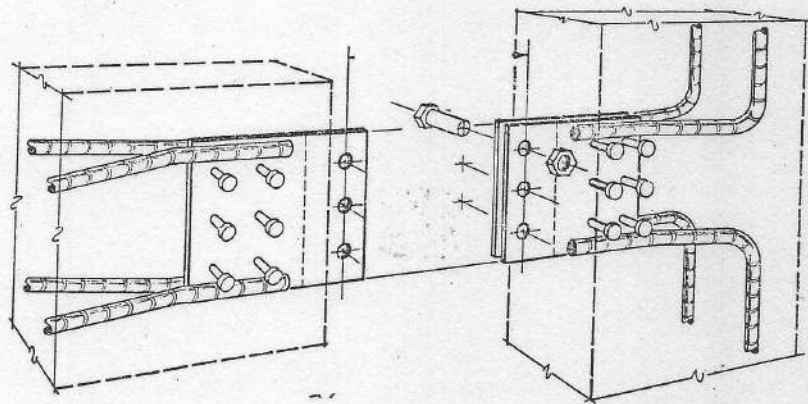


Figura 26.

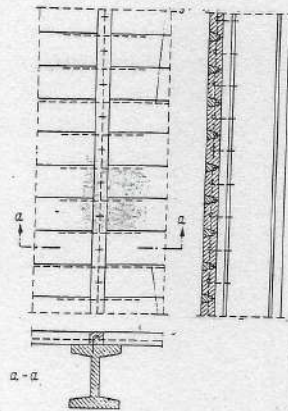
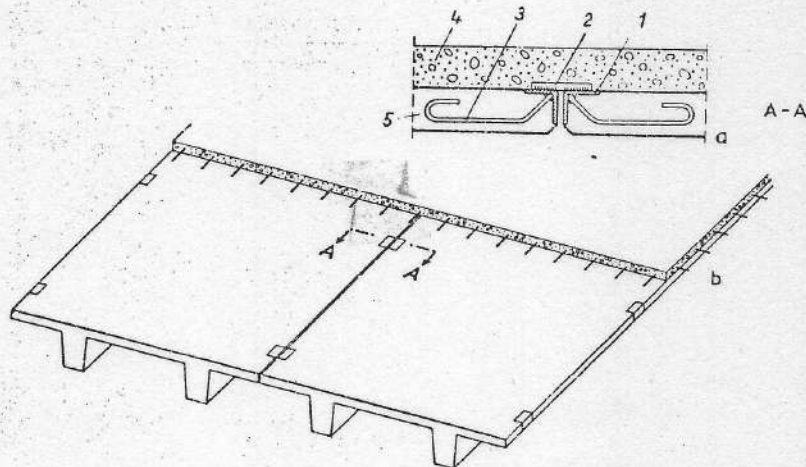


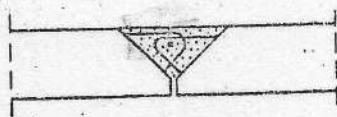
Figura 27.

En la figura 28, se ven algunas uniones típicas entre placas prefabricadas, con capacidad para transmitir fuerzas.

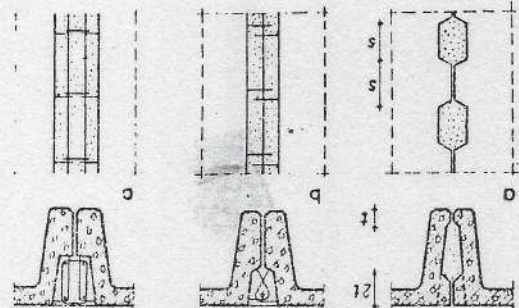
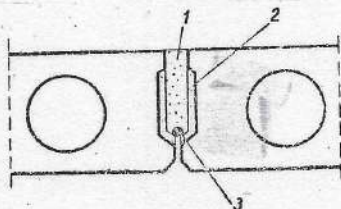
La continuidad de las placas puede lograrse de muchas formas, tal como se ven en la figura 29. Cuando se prefabrican nervios y se vacía sobre



- 1. Angulo
- 2. Platina
- 3. Anclaje
- 4. Concreto en el sitio
- 5. Prefabricado

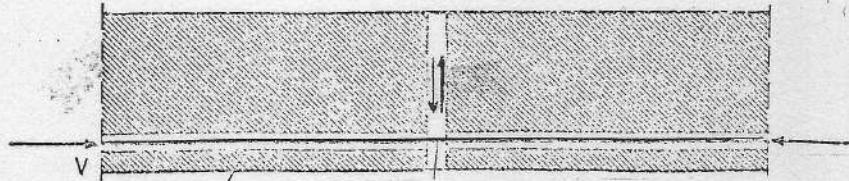


Unión por medio de bucles

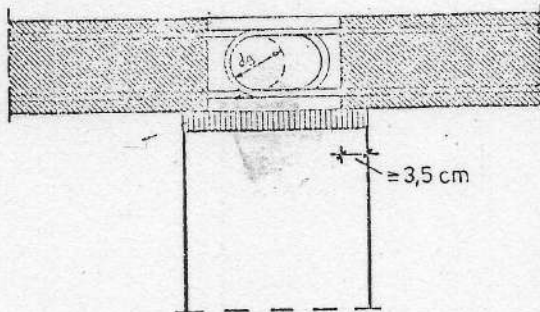


- a. Sin refuerzo con concreto en el sitio.
- b, c. Con refuerzo (bucle) y concreto en el sitio.

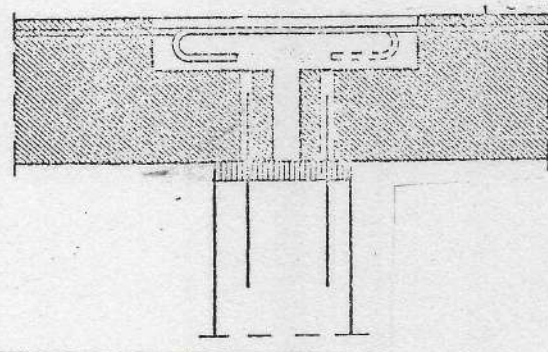
Figura 28



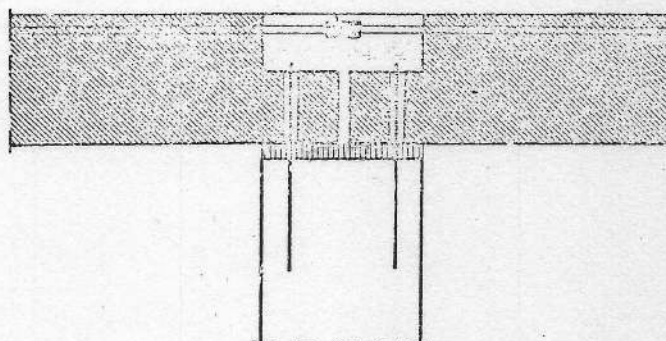
a. Unión con pretensado.



b. Unión con bucles.

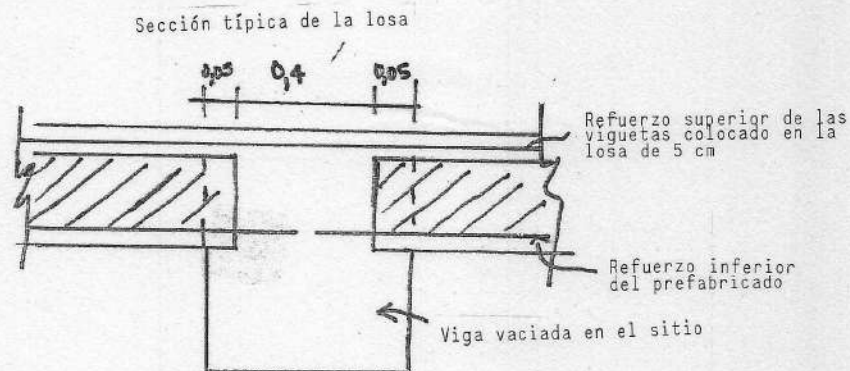
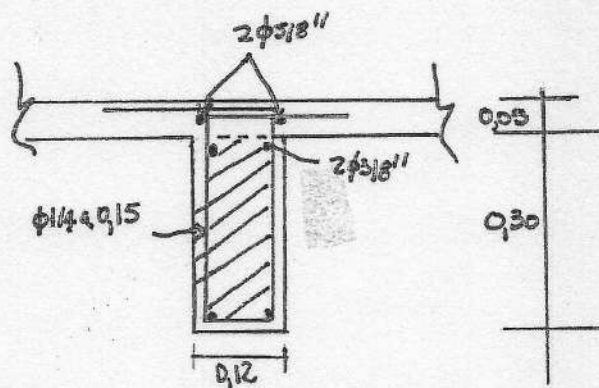
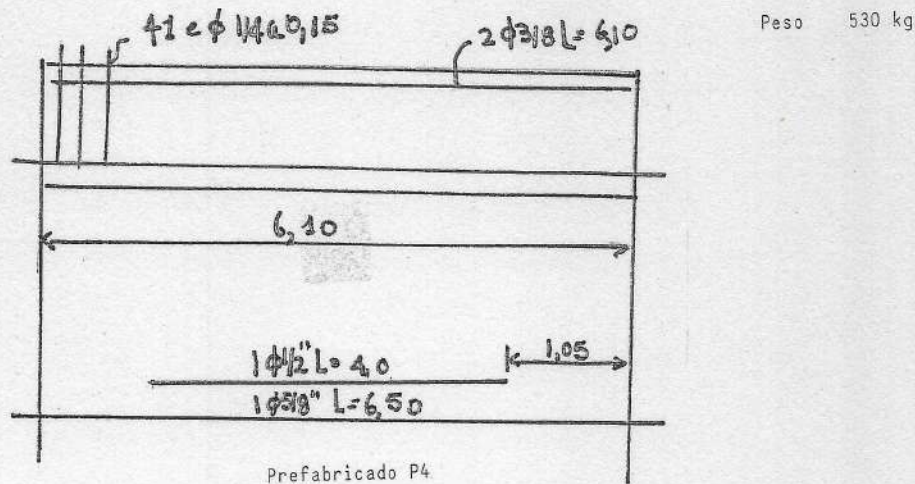


c. Unión por traslapo.



d. Unión con dispositivos mecánicos

Figura 29.



Detalle de la unión prefabricado - viga
 Obra Edificio Nacional
 Arquitectos: Grupo Habitar
 Calculistas: Jaime Muñoz Duque y Cía

Figura 30.

ellos un recubrimiento estructural, se puede colocar allí el refuerzo negativo necesario. Este caso se presenta en el Edificio Nacional de esta ciudad. Allí se prefabricaron todos los nervios, el detalle de uno de los cuales se muestra en la figura 30. Sobre éstos se vació una placa de 5 cm y allí se colocó el refuerzo negativo.

Podemos resumir lo anterior diciendo que para reunir una serie de partes prefabricadas en una estructura segura, se necesitan uniones suficientes entre las partes y, son suficientes, cuando están en capacidad de transmitir con seguridad las fuerzas que les llegan, de acuerdo al sistema estructural escogido. Esto no quiere decir que las uniones deben ser tales que la obra final sea monolítica. La construcción prefabricada tiene sus características propias con sus correspondientes uniones.

En zonas de alto riesgo sísmico, la estructura formada por piezas prefabricadas debe poseer ductilidad, redundancia y capacidad de absorción de energía. Aunque esto es difícil de lograr y se desconoce mucho todavía, se han hecho recientemente grandes avances en este campo. (18), (19), (20).

4. ASPECTOS ESPECIALES EN LA PREFABRICACION.

Mientras para estructuras tradicionales de concreto, en general no se presentan problemas de estabilidad, en construcciones prefabricadas, este es el caso más común. A continuación se mencionan algunos de los problemas más comunes que se presentan en el diseño de estructuras prefabricadas.

4.1 Estabilidad de la estructura

Las construcciones prefabricadas se diferencian de las construcciones monolíticas entre otras cosas, porque tienen uniones. Dichas construcciones son extremadamente sensibles a la distribución de fuerzas causadas por deformaciones de la construcción, cuando las uniones no están bien ejecutadas, siendo por tanto la estabilidad, entendida como el estudio del comportamiento de la estructura considerando las deformaciones elásticas y plásticas, de singular importancia.

La utilización de núcleos cada vez más esbeltos y de resistencias cada vez mayores, hace necesario un chequeo de estabilidad. Según (8) un chequeo no es necesario cuando las paredes de cizalladura cumplen la ecuación siguiente:

$$h \sqrt{N/EI} \leq 0,6 \quad \text{Para } n \geq 4$$

$$\leq 0,2 + 0,1 n \quad 1 \leq n \leq 4$$

Con h = Altura total del edificio en m.
 N = Suma de todas las cargas del edificio.
 EI = Suma de la rigidez a la flexión de todos los elementos rigidizadores considerando la sección no agrietada.
 n = Número de pisos.

Exige además (8) que las partes prefabricadas estén unidas entre sí por medio de refuerzo o medidas equivalentes o dado el caso con partes de concreto vaciado en el sitio, de tal forma que estén en capacidad de resistir solicitaciones excepcionales (asentamientos, movimientos fuertes, fuego, etc.).

Se debe analizar adicionalmente el caso de desplome, causado por desplomes de algunos miembros, curvaturas, no homogeneidad en las propiedades de los materiales etc. que según (8) se puede tener en cuenta considerando una inclinación de toda la estructura igual a:

$$\varphi_2 = \pm 1/100 \sqrt{h}$$

4.2 Estabilidad en vigas

En general, y debido a la utilización de concretos de altas resistencias y del pretensado, se obtienen secciones muy esbeltas en las vigas. Por este motivo se presentan en ellas fenómenos de inestabilidad, que causan una falla súbita de la viga especialmente en las etapas de transporte y montaje.

Debido a las fuerzas de compresión causadas por el momento flector, se presenta un desplazamiento lateral de la zona a compresión de la viga. Este desplazamiento lateral se conoce como volcamiento y es sumamente peligroso ya que se presenta sin aviso (Ver figura 31).

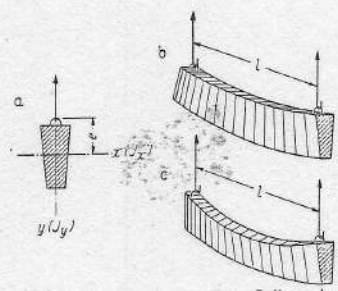


Figura 31.

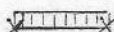
El estudio de este fenómeno es sumamente complejo, pues el concreto difiere mucho de un material ideal. Se debe tener en cuenta por tanto en la determinación de la carga o momento crítico que causa el volcamiento la influencia del refuerzo, del agrietamiento, de la sección y del diagrama esfuerzo deformación curvo del concreto.

Existen hasta el momento varios estudios como los citados en (9), los cuales permiten determinar, especialmente el (9c), en relativa facilidad el momento crítico que causa el volcamiento de la viga.

Según (9c), el momento de vuelco M_v , para una viga simplemente apoyada (apoyo de tenedor), está dada por:

$$M_v = n_1 \frac{b^3 h}{1} E_{sec} (1 - n_3 e/l) \sqrt{\xi} \sqrt{\xi}$$

En la cual: n_1 y n_3 dependen del tipo de carga.

$n_1 = 0,37$	
$n_3 = 1,14$	
$n_1 = 0,44$	
$n_3 = 1,37$	

$$E_{sec} = \frac{\text{Esfuerzo en el concreto en el momento de vuelco}}{\text{Deformación en el concreto en el momento de vuelco}} = \frac{f'_{cv}}{\epsilon_{cv}}$$

$$\sqrt{\xi} = \sqrt{\bar{P}/\alpha_{ov}} \quad \bar{P} = P \cdot fy / f'c$$

α_{ov} = Valor tomado de una tabla.

Durante el proceso de izaje entra una nueva magnitud en consideración y es la distancia e del punto de izaje al eje centroidal de la viga. Mientras que para una viga ideal sin ninguna deformación bastaría que e estuviera por encima del eje centroidal ($e > 0$), para una viga que posee deformaciones accidentales por fabricación, no homogeneidad de los materiales, desplazamientos inevitables de los cables de pretensado, como es el caso de las vigas de concreto, es necesario para asegurar la estabilidad que e cumpla con la siguiente condición. (Ver figura Nº 31).

$$e_{min} = \sqrt[4]{\frac{I_x - I_y}{120 I_x I_y E} g l^4}$$

En general las condiciones se pueden mejorar mucho corriendo hacia el centro los puntos de izaje, lo cual sin embargo, tiene sus limitaciones en vigas pretensadas por altos esfuerzos de compresión que se presentan.

En la figura 32a, se ve una viga ($h = 2,16$ m), de una sala de deportes durante el montaje. En la

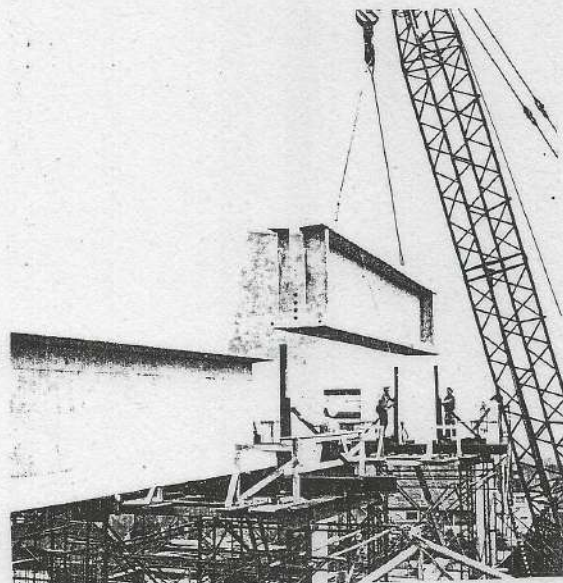


Figura 32a.

Figura 32b, se muestran algunos aspectos importantes de la construcción de un hangar en Alemania.

Allí se utilizaron vigas de 89,0 m aproximadamente y 5,5 m de profundidad, el ancho del alma es de

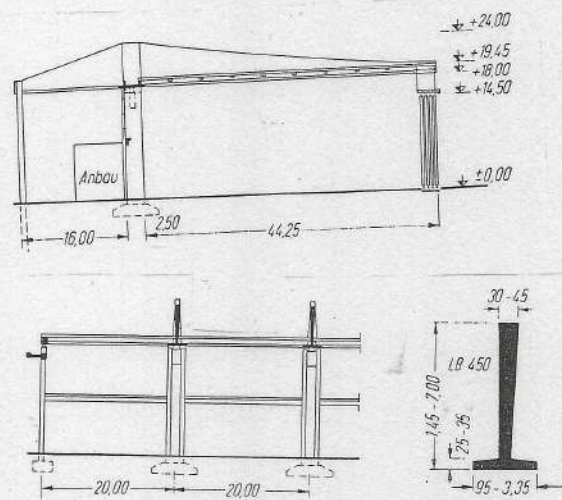
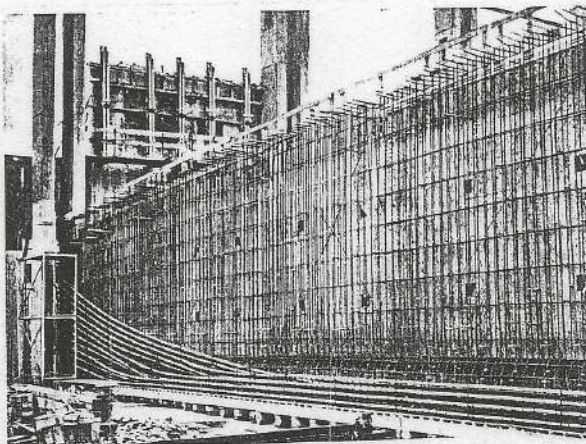
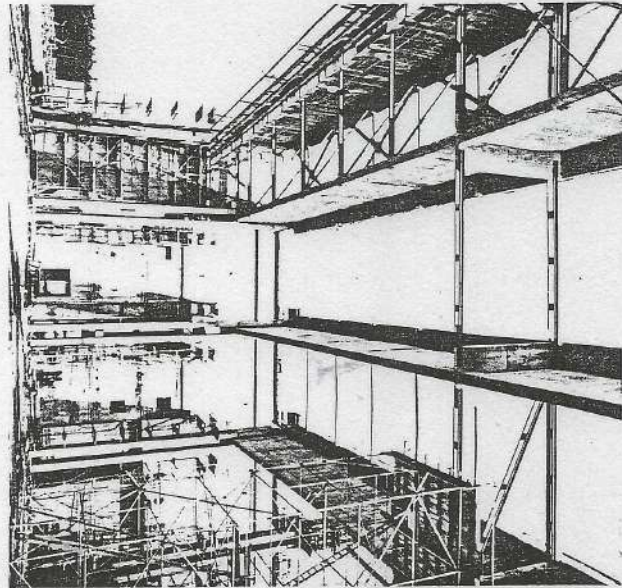


Figura 32b.

sólo 18 cm. Las vigas fueron hechas con concreto ligero y pretensadas. Se vaciaron en el sitio entre dos columnas en los extremos que tienen por fin rigidizar la viga para evitar el volcamiento y servir como puntos de apoyo para subirlas a su posición a unos 15,0 m. Una vez colocadas se ven los dispositivos utilizados para rigidizar horizontalmente las vigas supremamente esbeltas y así evitar que se presentaran los problemas descritos de inestabilidad.

En la figura 33, se ven otras fotos en las cuales se aprecian diferentes métodos utilizados en el montaje de vigas prefabricadas.

4.3 Unión de prefabricados y concreto vaciado en el sitio para que actúen como una unidad.

En el numeral 1.1 se mencionó e ilustró por medio de un ejemplo, que el estado de una viga prefabricada en parte y completada en la obra, corresponde en general al que hubiera tenido si se hubiera construido de una vez. Para que ésto sea cierto, se deben cumplir algunos requisitos en la junta de unión entre el prefabricado y el concreto vaciado en el sitio, ya que un trabajo conjunto solo se puede asumir si la unión está en capacidad de resistir la cizalladura horizontal que se presente en ella.

Se debe por tanto diseñar mecanismos que estén en capacidad de transmitir la cizalladura horizontal en la junta. Entre estos mecanismos se pueden mencionar: refuerzo, dientes reforzados, uniones de acero especialmente diseñadas, tratando siempre de que la parte superior del prefabricado sea rugosa para mejorar las condiciones en la unión.(10)

En general se utilizan los estribos como parte del refuerzo necesario para absorber la cizalladura horizontal. Para lograr esto, se deja que del prefabricado salgan unas puntas o toches que quedan embebidos en el concreto vaciado en el sitio. Con estribos adicionales se puede completar el refuerzo de unión necesario.

A veces por motivos constructivos o de fabricación es desfavorable colocar este refuerzo siguiendo la variación de los refuerzos de cizalladura, por lo cual se ha permitido que el refuerzo de unión (no el de cizalladura), se coloque uniformemente, con la restricción de que su espaciamiento debe ser menor que dos veces el espesor de la losa completa. En la figura 34a, se ven dos ejemplos de

lo expuesto, para losas de edificios y en la figura 34b, se muestran otros dos casos típicos en puentes.

4.4 Apoyo de vigas

4.4.1 Anclaje del refuerzo

En general las vigas prefabricadas poseen apoyos mínimos, razón por la cual se dificulta el anclaje correcto del refuerzo. Según (8), existe en el apoyo una fuerza de tracción $T = Q \cdot v/h$, que se debe anclar, en contraste con lo afirmado por la resistencia de materiales, para lo cual en el apoyo $T = 0$ ya que el momento flector allí es cero. La aparente contradicción se origina en el comportamiento especial de las vigas de concreto, en las cuales en el instante de la falla se forma una cercha (analogía de la cercha de Mörsch), con el refuerzo como banda inferior traccionada. Para vigas con refuerzo a la cizalladura, compuesto por estribos verticales $v = 0,75 h$, donde $T = 0,75 Q$, siendo Q la reacción en el apoyo.

En general se puede lograr este anclaje por medio de ganchos o en casos extremos con otros mecanismos como los mostrados en la figura 35a. Según el ACI es conveniente utilizar algún refuerzo perpendicular a una grieta potencial tal como se ve en la figura 35b, para cumplir con los requisitos de la teoría de cizalladura por fricción. (10) en el numeral 12.12.1 exige por este motivo y para tener una cierta reserva para asentamientos, cargas laterales etc., que por lo menos una tercera parte del refuerzo entre mínimo 15 cm en el apoyo contados desde la cara del soporte.

4.4.2 Formas de apoyo

En la figura 36, se ven algunas posibilidades de apoyos de vigas y placas en las vigas principales, muy a menudo se presenta el caso de las llamadas "vigas escalonadas", tal como las de la figura 36a, e y g. El diseño de estas vigas aunque no presenta gran dificultad, si exige gran cuidado en el detalle del refuerzo, pues detalles pobres son los causantes de la falla de dichos elementos. En la figura 37a, se ve la forma típica de agrietamiento de estos miembros. Para el diseño de diagonales de compresión o de tracción, como se ve en la figura 37b, donde están indicados además el valor de las fuerzas de tracción resultantes según el modelo adoptado.

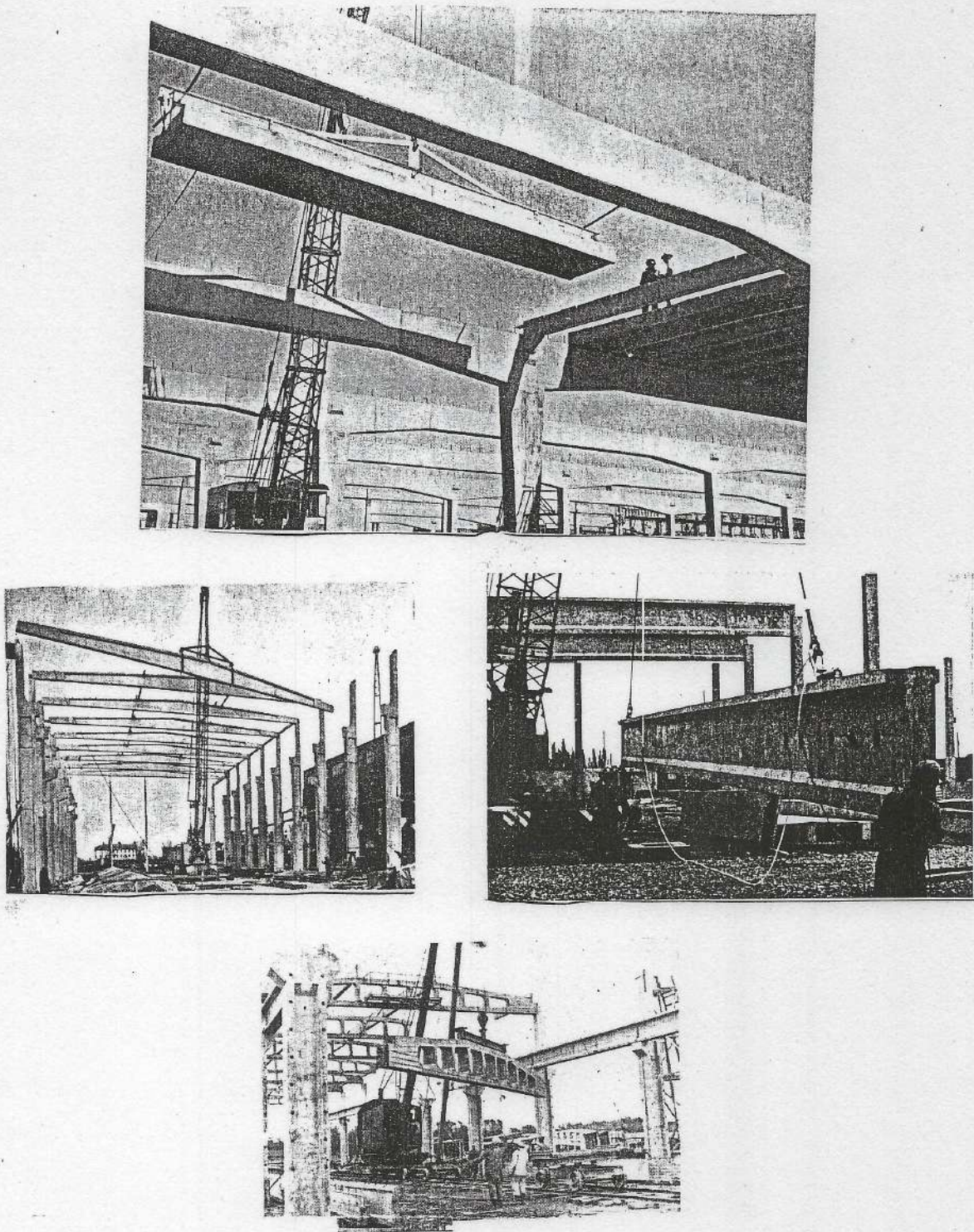


Figura 33.

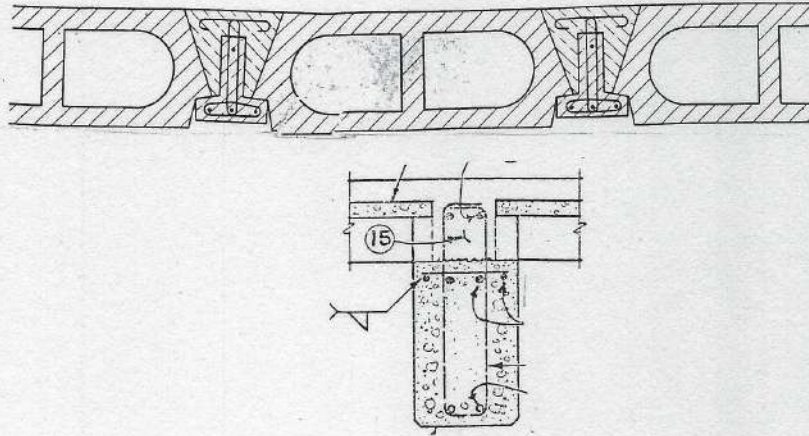


Figura 34a.

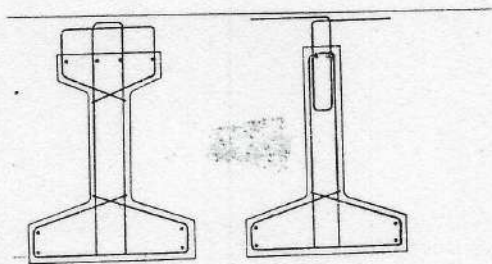


Figura 34b.

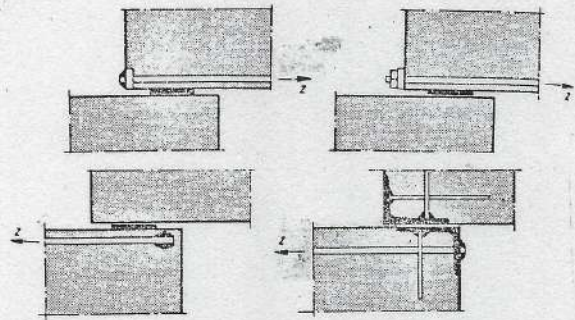


Figura 35a.

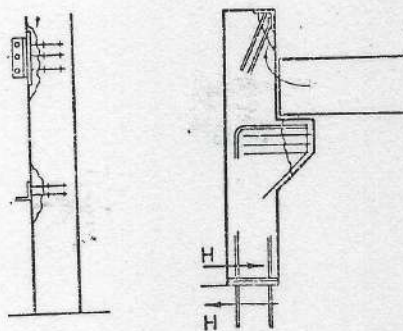


Figura 35b.

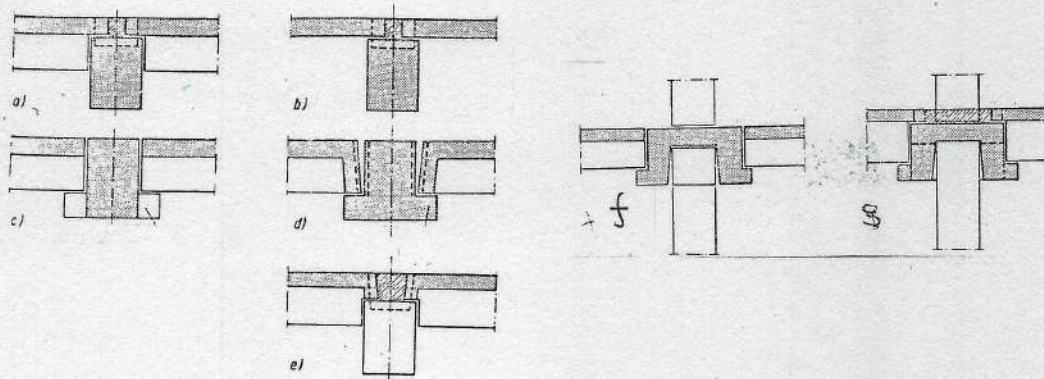


Figura 36

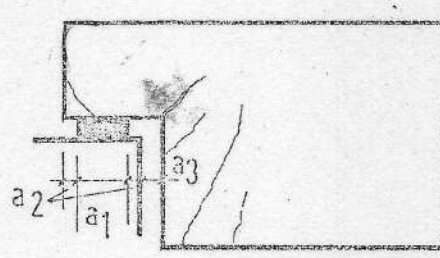
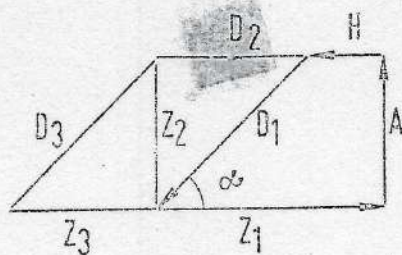
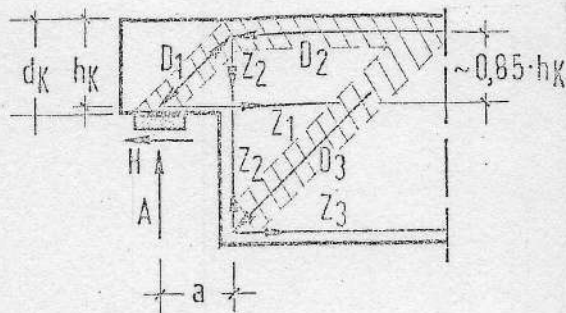
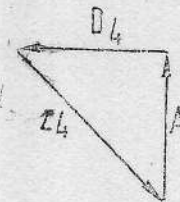
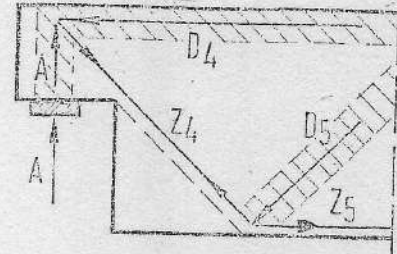


Figura 37.a.



$$\begin{aligned}
 Z_1 &= H + A \cdot \cot \alpha \\
 Z_2 &= A \cong Z_3 \\
 \cot \alpha &= \frac{a}{0,85 \cdot h_K}
 \end{aligned}$$

$$Fe_2 + \frac{Fe_1}{\sqrt{2}} = \frac{A}{\sigma_e}$$



$$\begin{aligned}
 Z_4 &= \frac{A}{\sin \beta} \cong A \cdot \sqrt{2} \\
 \text{para } \beta &\cong 45^\circ
 \end{aligned}$$

$$Fe_1 = \frac{A \cdot a}{0,85 \cdot h_K \cdot \sigma_e} + \frac{H}{\sigma_e}$$

$$Fe_2 = \frac{A}{\sigma_e} \cong Fe_3$$

$$Fe_4 = \frac{A}{\sigma_e} \cdot \sqrt{2}$$

NOTA: $\sigma_e = f_y$
 $Fe = As$

Figura 37b.

En la figura 38 y 39, se muestran detalles de la colocación correcta del refuerzo. La figura 40 muestra dos detalles pobres de refuerzo, los cuales no se deberían utilizar, ya que no es posible anclar suficientemente las varillas de diámetro muy grande del refuerzo positivo.

La vigas escalonadas se apoyan generalmente en ménsulas, las cuales por ser elementos muy cortos requieren igualmente sumo cuidado en lo referente a anclajes y presiones de apoyo.

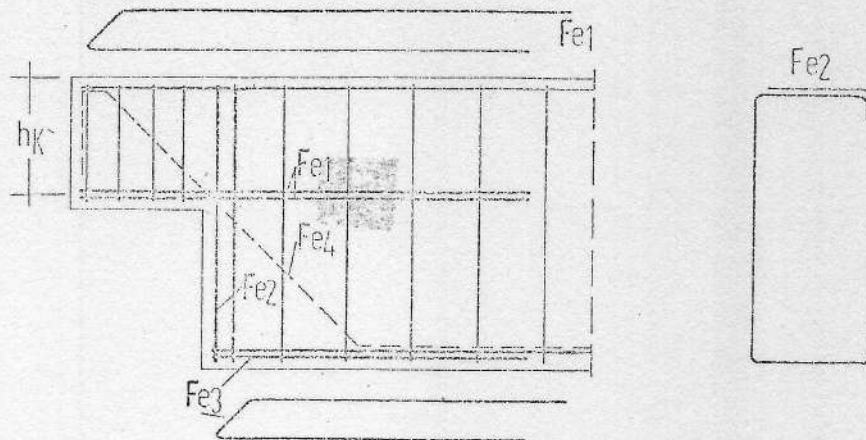


Figura 38.

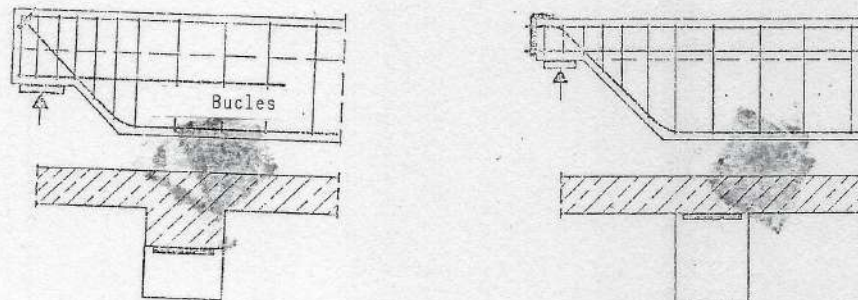


Figura 39.

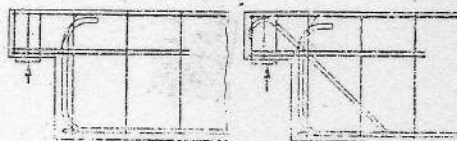


Figura 40.

En la figura 41a, se muestran las características más importantes del comportamiento de las ménsulas y la forma de reforzarlos.

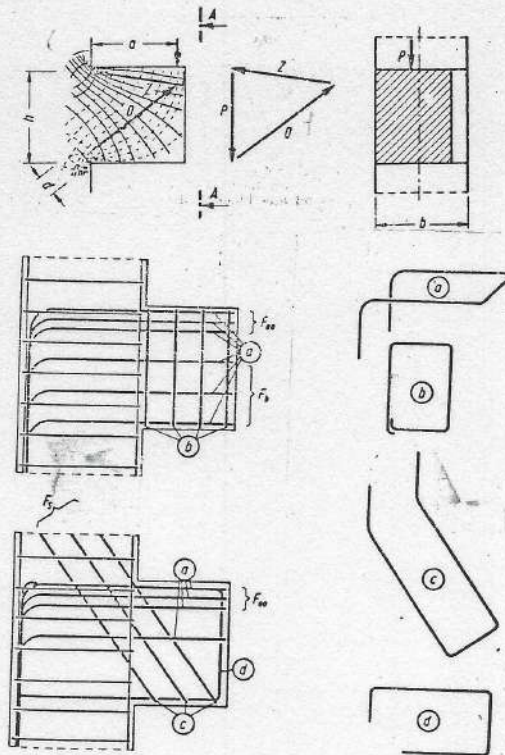


Figura 41a.

Según (11) $F_{eo} = P \cdot a / 0,85 h f_s$

$F_b = 1/4 F_{eo}$

Si se utiliza refuerzo inclinado

$$F_{eo} = 0,9 \cdot \frac{a}{h} \cdot \frac{P}{f_s}$$

$$F_s = 0,4 (1 + a/h) \cdot P / f_s$$

Con $f_s = f_y / 1,75$ y P carga no factorada.

Este refuerzo F e o, es necesario para absorber la fuerza de tracción Z (ver figura 41a) y el F_b para absorber las fuerzas de tracción perpendiculares a la compresión D . Se deben chequear todavía, las dimensiones de la sección, que deben ser suficientes para resistir la compresión D . Según

(11) $D = 0,7 (1 + a/h) \cdot P$ y $d = h/4$, de donde el esfuerzo de compresión es:

$$f_c = \frac{0,7 (1 + a/h) P}{b \cdot h/4} \leq f'_c / 2,1$$

de donde se puede deducir la altura necesaria, para que no se presente una falla del concreto:

$$h = 1,4 \cdot \frac{P}{b f'_c / 2,1} \left[1 + \sqrt{1 + 1 + 1,43 \cdot \frac{a \cdot b}{P} \cdot \frac{f'_c}{2,1}} \right]$$

(10), trae en el numeral 11.9 disposiciones especiales para ménsulas y cornisas. Allí se recomienda además que si la relación a/h es menor que 0,5, se debe utilizar para el diseño el numeral 11.7 (cizalladura por fricción).

La carga no se debe colocar muy cerca de la cara exterior de la ménsula, pues puede causar la falla de ésta, especialmente cuando existen fuerzas horizontales (Ver figura 41b).

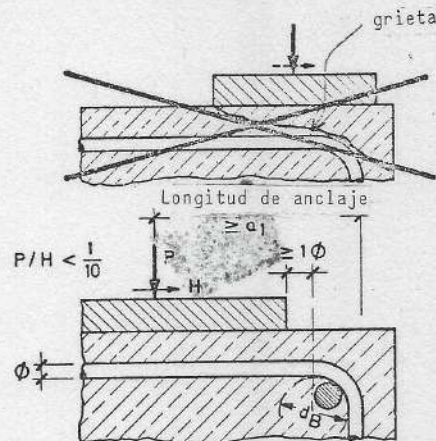


Figura 41b.

4.5 Diseño de fundaciones prefabricadas

Casi sin excepción se utilizan en la construcción de instalaciones industriales y estructuras prefabricadas pequeñas, fundaciones prefabricadas, no solo por la economía de éstas, sino porque empujan las columnas, dándole a la estructura la estabilidad necesaria para resistir fuerzas horizontales.

El esquema estructural se muestra en la figura 42. Allí aparecen las características más importantes: fuerzas y esquemas de colocación del refuerzo.

La fundación debe ser lo suficientemente profunda para que el brazo de H_o y H_u , sea grande y las paredes deben ser gruesas, pues de lo contrario el empotramiento es muy débil. Por tanto $t > 1,5d$ y $d_1 \geq d/2$. Además el concreto de relleno debe ser de muy buena calidad.

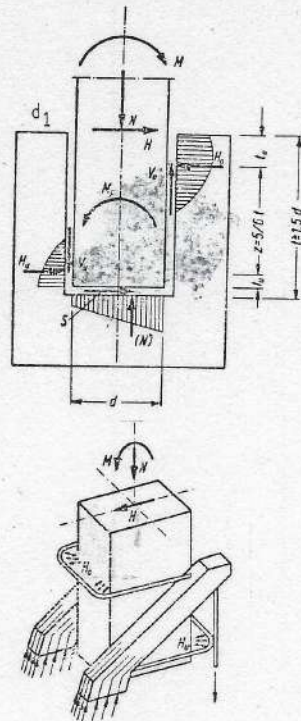


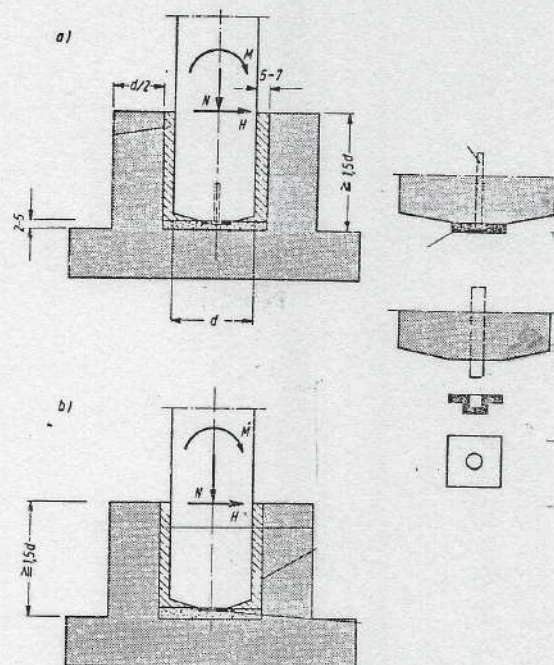
Figura 42

4.6 Solicitaciones especiales

Durante la fabricación, almacenaje, transporte y colocación de las piezas prefabricadas se pueden presentar muchas solicitaciones especiales diferentes a aquellas que tendrá cuando esté en su posición definitiva. La figura 43, muestra algunos casos típicos de solicitaciones especiales, para los cuales deben estar reforzadas las partes prefabricadas, pues de lo contrario fallarían.

Es muy común el caso de las columnas prefabricadas que durante el montaje están sometidas a momentos mayores que los que los causará en ellas el viento. La figura 44 muestra algunos casos típicos tomados de la referencia (12).

Vigas principales que reciben losas, pueden estar sometidas durante la construcción a momentos torsores muy fuertes (ver figura 45), para los cuales, al igual que sus apoyos, deben estar diseñadas. Se puede tratar de contrarrestar por medio de un par de fuerzas D y Z el momento A e. Para esto es necesario que la fuerza Z puede transmitirse. La figura 46, muestra un detalle típico de tales uniones. (8), exige la colocación de por lo menos una varilla de $\phi \frac{1}{4}"$ en la zona de



compresión de la viga, para aumentar la rigidez lateral. Cuando la relación largo/ ancho es mayor que 20, se puede aumentar este refuerzo a por lo menos dos barras en cada lado.

4.7 Diseño de las uniones de la losa para lograr que esta actúe como un diafragma

De lo expuesto en 2.2 y 3.4, se ve la necesidad de diseñar las losas como diafragmas horizontales que estén en capacidad de transmitir las fuerzas horizontales a los núcleos rígidos. Las losas de concreto vaciado en el sitio se pueden considerar que actúan en general como diafragmas; sin embargo, para losas compuestas de piezas prefabricadas,

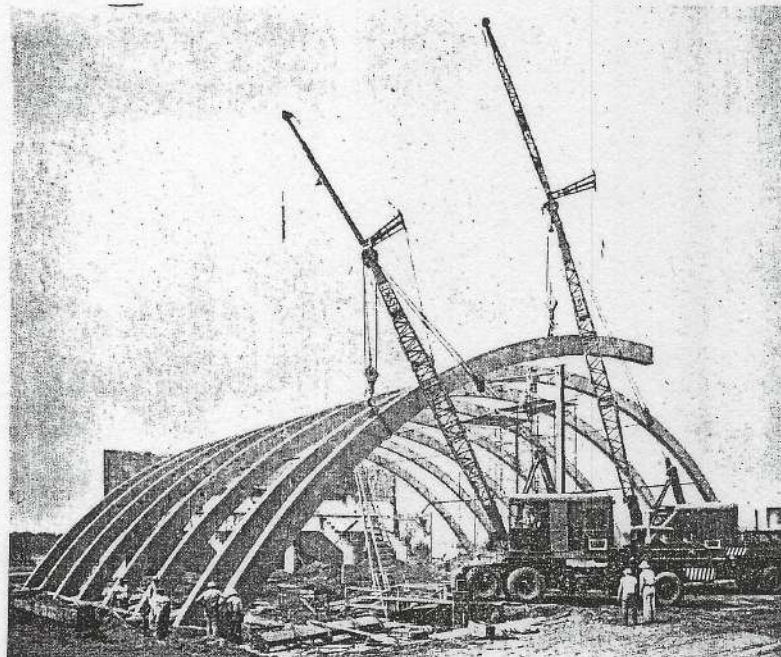
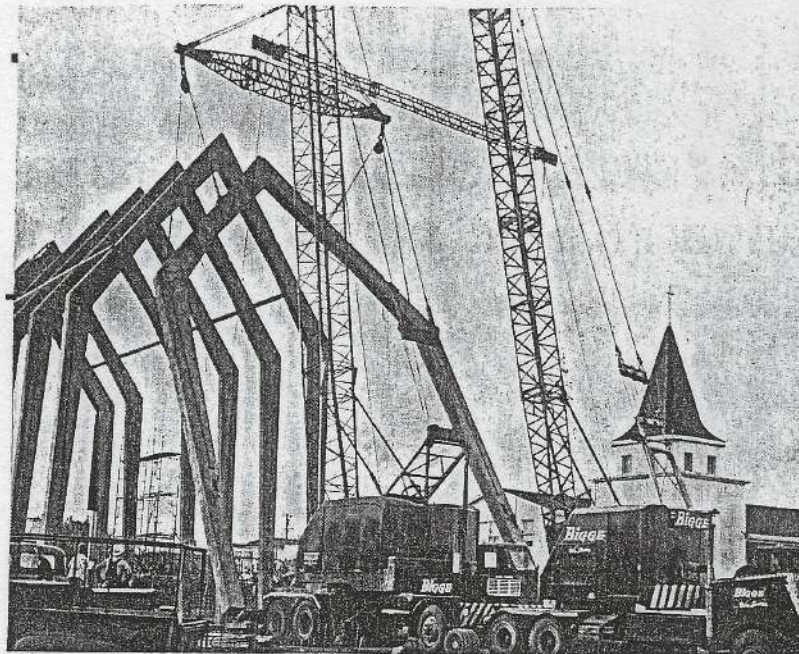


Figura 43

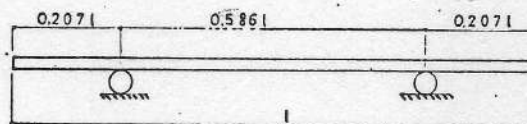
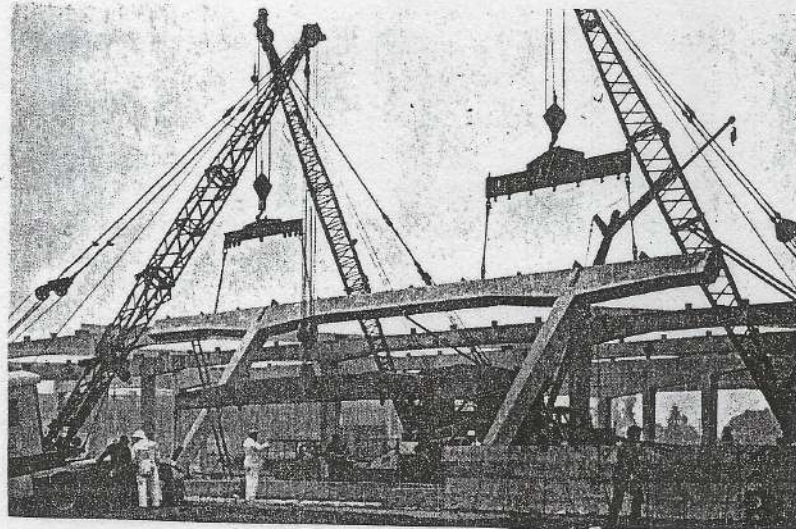
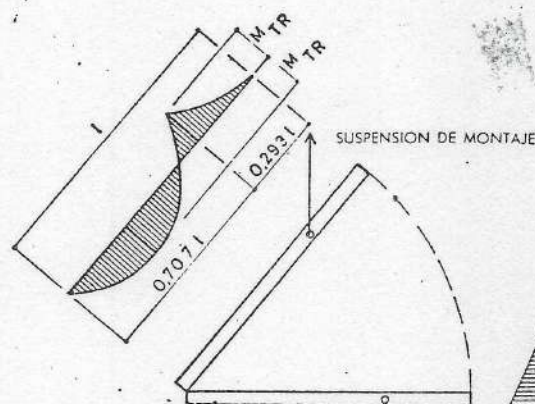
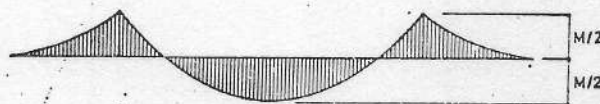


Fig. —Transporte de pies derechos y postes con un mínima de sollicitación por flexión.



—Comparación de los momentos en los pies derechos durante el montaje con los producidos por la acción del viento una vez colocados en obra.



M_{TR} = MOMENTOS EN EL TRANSPORTE

Figura 44.

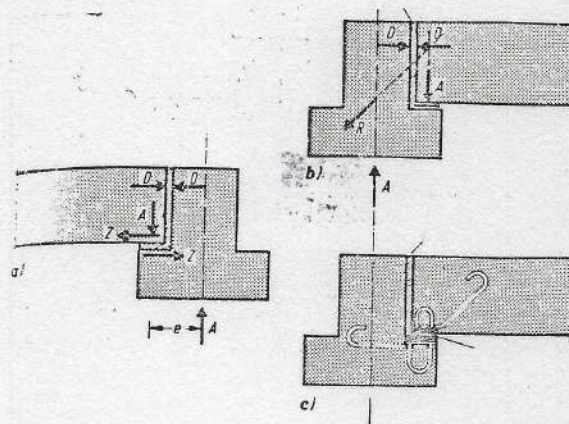


Figura 45.

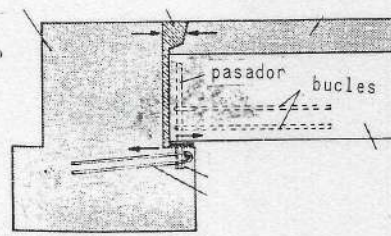


Figura 46

a causa de las uniones entre ellas, no se puede suponer esto de antemano. Según (8), una losa prefabricada se puede considerar como un diafragma, cuando en su estado final para una superficie en la cual, las piezas de la losa poseen uniones resistentes a compresión y cuando las cargas que actúan en el plano de la losa sean absorbidas por medio de una acción de arco o cercha en unión con vigas de borde y barras traccionadas especialmente reforzadas para esto. La figura 47, tomada de la referencia (13), nos permite visualizar lo dicho arriba. Adicionalmente a las fuerzas de tracción Z aparecen diagonales comprimidas, que atraviezan las uniones entre las piezas prefabricadas, pudiéndose descomponer allí en una fuerza de compresión y cizalladura. Si bajo la suposición de que la cizalladura se distribuye uniformemente en toda la unión, los esfuerzos de cizalladura sobrepasan 1 kg/cm^2 , es necesario colocar refuerzo para cizalladura en las uniones.

En la figura 48, aparecen otros dos ejemplos tomados de (5) y que ilustran lo dicho arriba a las cargas horizontales de viento o sismo que actúan sobre la estructura, se le debe sumar una carga

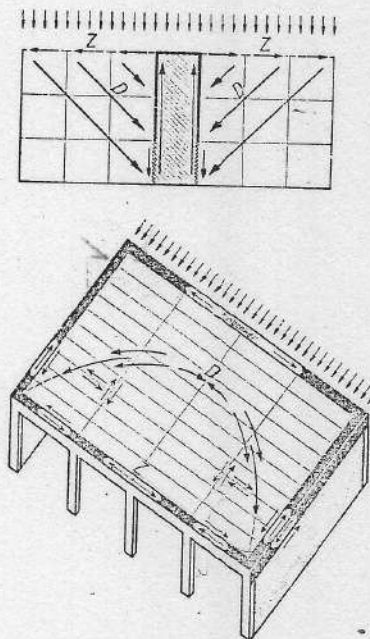


Figura 47

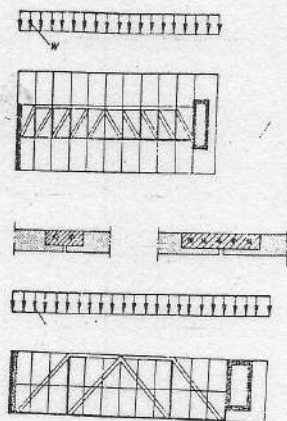


Figura 48

adicional horizontal causada por desplome y que según (8), corresponde a la fuerza horizontal causada por un desplome $= \pm 1/200 h^1$ de todas las columnas y paredes diferentes a aquellos que constituyen el sistema resistente del edificio. En la ecuación anterior, es el ángulo entre las columnas y paredes y la vertical h , es el promedio de las alturas de los pisos arriba y abajo de la placa considerada.

Con el fin de ilustrar más ampliamente el proceso de introducción de las cargas horizontales a las paredes de cizalladura, se muestra en la figura 49, los puntos más importantes en el diseño de una placa como diafragma horizontal, de acuerdo a un ejemplo presentado en la referencia (14).

La figura 49a, muestra una planta típica y un corte de la losa. La figura 49b, muestra el modelo (cercha), utilizado para transmisión de cargas horizontales.

La carga horizontal (viento + desplome), es igual a 1,46 t/m, así:

$Q1 = 45,4 \text{ t}$
 $Z1 = 7,94 \text{ t}$
 $Z6 = 2,66 \text{ t}$
 $Q2 = 22,2 \text{ t}$
 $Z2 = 11,06 \text{ t}$
 $D2H = 10,6 \text{ t}$
 $Z3 = 45,4 \text{ t}$
 $D2V = 14,76 \text{ t}$
 $Z4 = 18,46 \text{ t}$
 $Zs = 22,2 \text{ t}$

Por tanto para asegurar la transmisión de las fuerzas horizontales se debe colocar en la placa el refuerzo necesario para absorber las tracciones obtenidas del análisis de la cercha. Se debe analizar por último el valor del esfuerzo de cizalladura causado por la componente horizontal $D2h$, de la fuerza de compresión $D2$ de la cercha $D2h=10600 \text{ kg}$, suponiendo una longitud del prefabricado de 8,0 cm y un ancho de la junta de 12 cm y considerando una distribución uniforme de la cizalladura $= 10.600/12.800 = 1,1 \text{ kg/cm}^2$ $1,0 \text{ kg/cm}^2$, no siendo necesario por tanto diseñar un refuerzo de cizalladura. El refuerzo para la barra 3, se reparte entre las dos vigas que llegan a ambos lados del foso de escaleras.

4.8 Unión transversal de piezas prefabricadas

De lo expuesto anteriormente se ve la importancia del correcto diseño de las uniones. Adicional al diseño de la fuga para cizalladura horizontal, se debe diseñar para cizalladura vertical con el fin de distribuir cargas concentradas, pues cargas diferentes en piezas contiguas, pueden causar deflexiones diferentes con el correspondiente peligro, si no se han tomado medidas para evitar que esto suceda.

La figura 50, muestra un detalle típico de miembros prefabricados, para resistir cizalladura horizontal (detalle C) y vertical (detalle D) (6). Según (8), la unión se debe diseñar para una fuerza de borde equivalente a $P = 0,5 p$ (t/m) (Ver figura 51), siendo p la carga viva de la estructura.

En general, el tipo de unión transversal depende del tipo de losa, de la carga viva y de si existen o no cargas dinámicas. (8), describe varios tipos de uniones, de diferente grado de eficiencia, de acuerdo a las condiciones existentes, con la característica de que si se utilizan éstas, puede considerarse que hay una distribución transversal suficiente de la carga. Mencionaremos a título explicativo solamente dos de ellas, las que aparecen en la figura 52.

La unión de la figura 52a, se puede usar para cargas vivas menores de 350 kg/m^2 (pero no en fábricas y talleres) y siempre que se trate de piezas prefabricadas que se colocan muy juntas. La llave es necesaria para transmitir cizalladura vertical y entraría a trabajar cuando se sobrepase la parte transmitida por adhesión. para cargas vivas mayores de 275 kg/m^2 se deben colocar vigas de amarre.

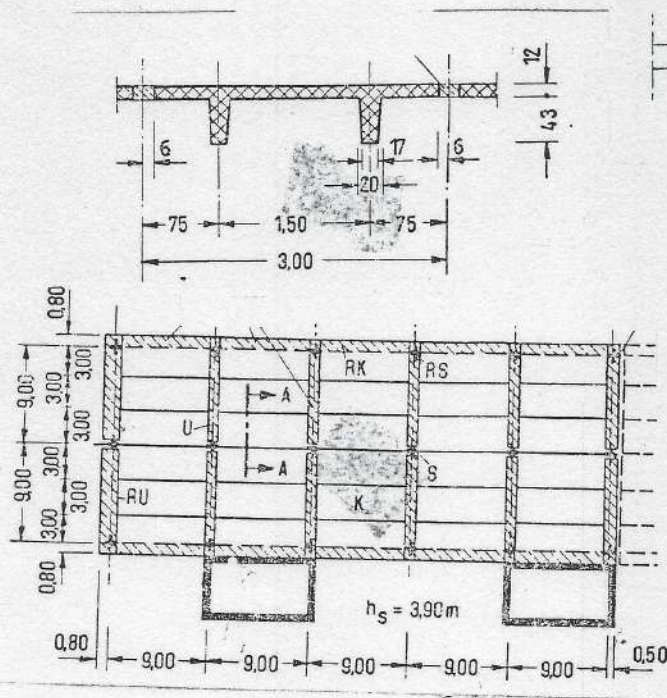


Figura 49a.

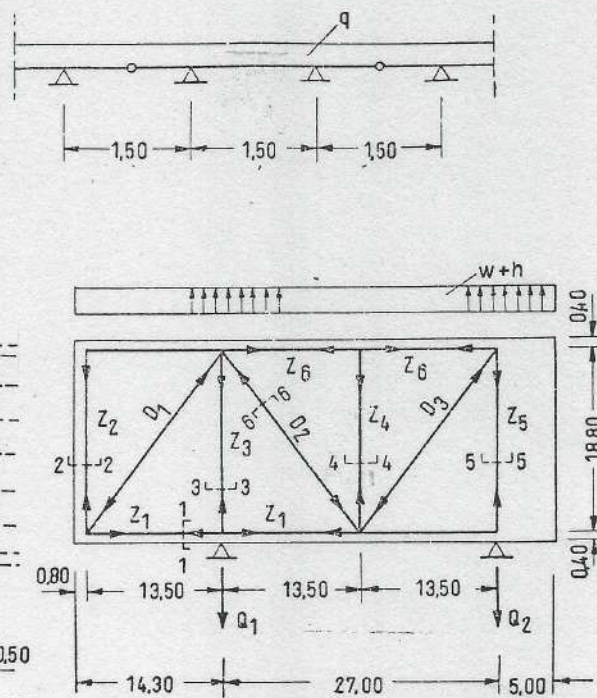


Figura 49b.

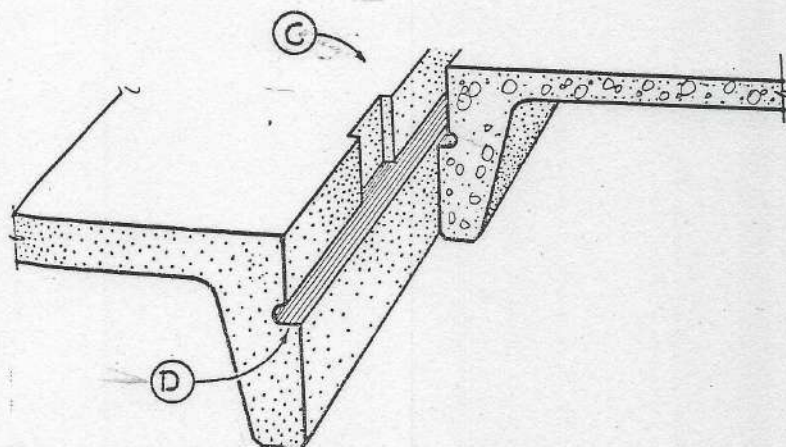


Figura 50

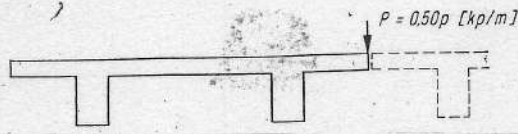


Figura 51.

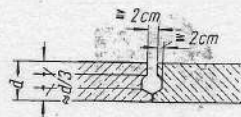


Figura 52a.

La unión de la figura 52b, se puede utilizar para el mismo tipo de prefabricados que la 52a, pero para cargas vivas hasta 500 kg/m² y aún en fábricas y talleres.

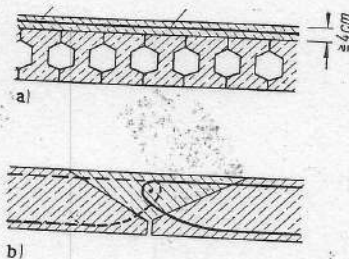


Figura 52b.

5. OTROS ASPECTOS IMPORTANTES

Gran parte de la falla de estructuras es causada por acción del fuego. En estructuras prefabricadas el caso incendio adquiere especial importancia, pues debido especialmente a pérdida de apoyo de las piezas prefabricadas, puede presentarse fácilmente el colapso de la estructura, si no se tomaron medidas para evitarlo.

La magnitud de los cambios de longitud causados por el fuego dependen del tiempo que la temperatura, que puede alcanzar 1.000°C y más, actúe; de la longitud de la estructura, de las medidas de protección que se tomen, etc.

Se acostumbra catalogar las estructuras en tres grupos F30, F90 y F180, de acuerdo a si permanecen 30, 90 ó 180 minutos sin fallar y sin perder resistencia cuando están expuestas al fuego.

En general para estructuras normales se exige que éstos sean F90 y se debe pues garantizar que esto se cumpla.

Los factores determinantes para el buen comportamiento de una estructura durante un incendio son los siguientes:

- Que el refuerzo tenga suficiente recubrimiento.
- Que el apoyo de placas, vigas, etc., sea suficiente.
- Diseño correcto de juntas.

A continuación haremos algunos comentarios sobre los puntos anteriores.

a. Un recubrimiento suficiente es necesario y conveniente no sólo desde el punto de vista del acero de refuerzo, sino del concreto. Con aumentos de temperatura de más de 100°C el concreto empieza a perder resistencia y a disminuir su módulo de elasticidad. Cerca a los 500°C ocurre una disminución de la resistencia y el concreto comienza a explotar. La tabla siguiente tomada de la referencia 15, muestra el efecto benéfico de un aumento de recubrimiento de 2 cm.

MIEMBRO	RECUBRIMIENTO	500°C
Viga	2 cm	50/55 minutos
	4 cm	70/85 minutos
Losas	1 cm	40 minutos
	2 cm	50 minutos

El acero por su parte alcanza la temperatura crítica (temperatura a la cual el límite de fluencia decae el valor del esfuerzo real actuante), la cual varía de 500 a 600°C, reduciéndose allí por tanto el factor de seguridad a 1,0. La tabla siguiente nos muestra igualmente el efecto benéfico del recubrimiento.

TEMPERATURA	RECUBRIMIENTO	
	1,0 cm	3,0 cm
TIEMPO EN MINUTOS		
450	40	80
500	45	90
550	55	90
600	70	90
650	90	90

b. Cuando el apoyo de las piezas prefabricadas (especialmente losas) es muy pequeño, ocurre la falla de las estructuras por pérdida del apoyo de las placas como se ve en la figura 53, la cual muestra la falla de una estructura por apoyos insuficientes.

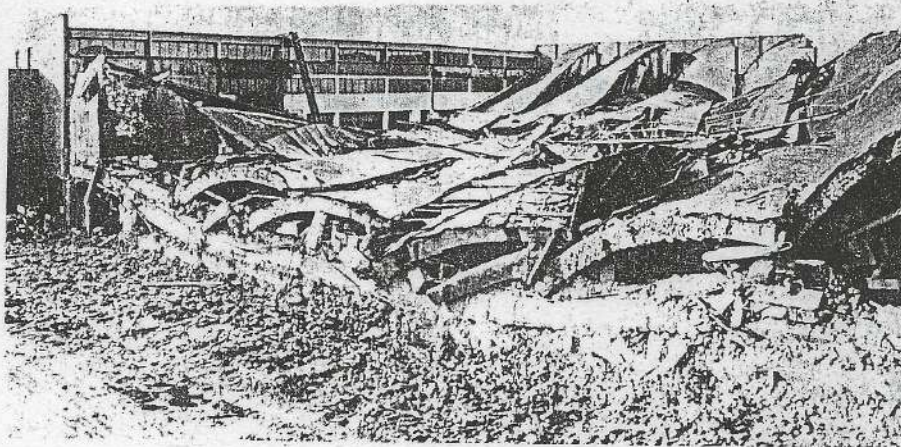


Figura 53

c. Para especificaciones muy largas y con gran riesgo de fuego, se deben colocar juntas de dilatación cada 30,0 m o menos, con un ancho de $a/1.200$ (a = distancia entre las juntas en cm), pues el impedimento de las dilataciones causa grandes esfuerzos que pueden ocasionar la falla de la estructura. Se deben utilizar además muros corta-fuegos (categoría F180), para evitar en lo posible que el fuego alcance toda la edificación.

De acuerdo a lo expuesto arriba y en los numerales 4.4.1 y 4.7, se ve la importancia de proveer las vigas de apoyo y anclaje suficiente. La figura 54 muestra la falla de dos estructuras durante un sismo por falta de apoyo suficiente y la figura 55 muestra un detalle (16) de las fuerzas actuando en una unión durante un sismo. Por último vale la pena mencionar que en caso de presentarse una serie de tolerancias sumadas desfavorablemente pueden presentarse presiones concentradas muy altas con el consiguiente peligro para la estructura. (Figura 56).

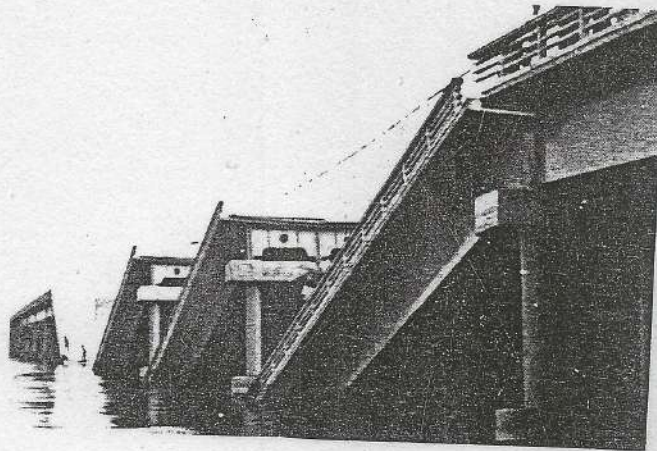


Figura 54.

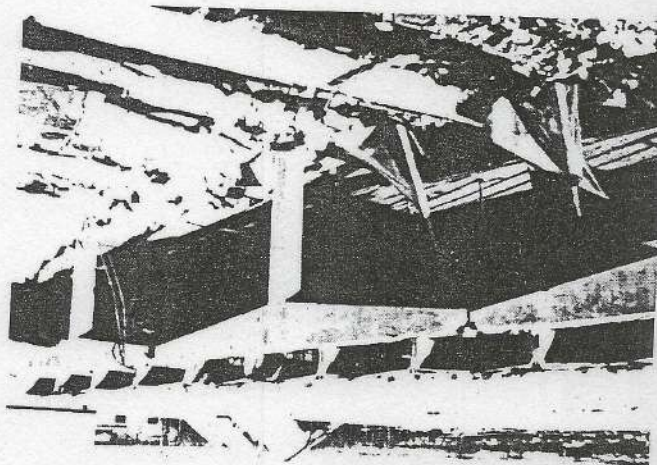
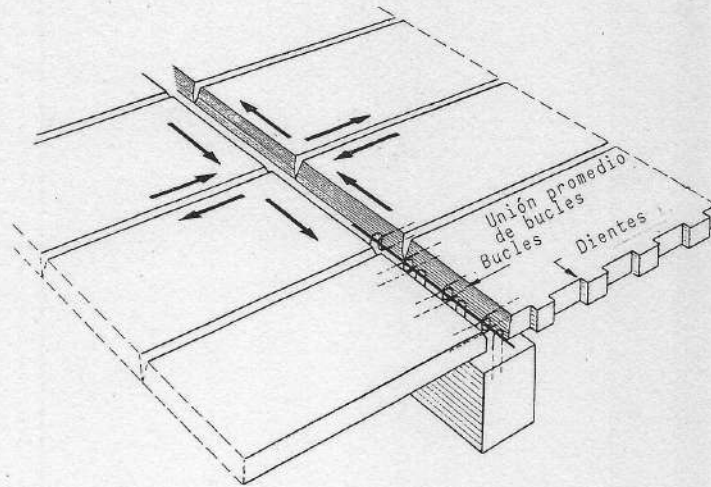


Figura 55.



Unión por medio de bucles

Figura 55

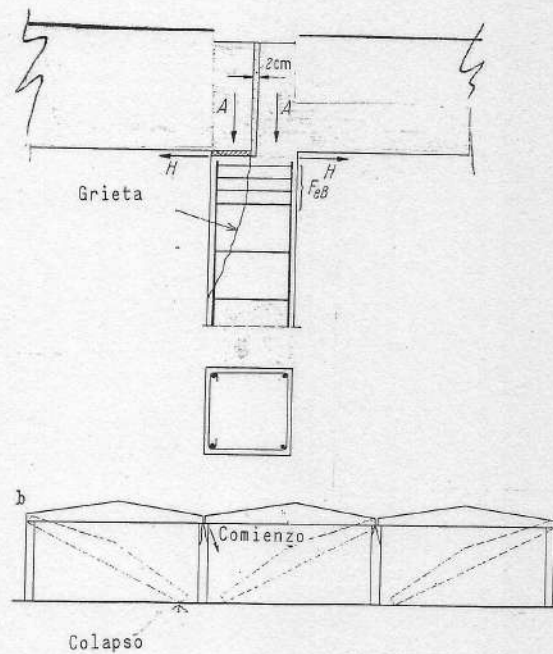


Figura 56.

BIBLIOGRAFIA

1. H. RUHLE, Die Herstellung statisch unbestimmter Systeme durch nachtragliche Verbindung von Stahlbetorfertigteilen - Beton- und Stahlbetonbau 49 (1954) p.32.
2. U. Karlsruhe, Notas sobre Prefabricación. (Institut für Stahlbetonbau leitung o Prof. Dr. Ing F. P. Müller).
3. WITTA EDUARD, Kraftschlüssige Verbindungen und ihre Rückwirkungen auf das Bauwerk, Betonwerk Fertigeil Heft 11/75, p.527.
4. MACLEOD IAN, Handbook of Concrete Engineering, Ed. by M. Fintel, Cap. 13. Van Nostrand.
5. KONING, Hochhäuser aus Stahlbeton Beton - Kalender 1976.
6. BIRKELAND, P. W. BIRKELAND, H.W., Connections in Precast Concrete Construction, Journal of the American Concrete Institute, V63 Nº.3, p.345 - 368.
7. Normas Alemanas DIN 8560, DIN 4099 y DIN 4100/2.
8. Norma Alemana DIN 1045.
- 9a. HANSELW, WINTER G., Lateral Stability of Reinforced Concrete Beams Journal ACI Vol. 56 (1959), p.193.
- b. MEHLHORN G., Nährungsverfahren zur Abschätzung der kipstailität Vorgespannter Träger, Betonund Stahlbetonbau 1/1974, p.7.
- c. RAFLA, K., Hilfsdiagramme zur Vereinfachung der kippuntersuchung von Stahlbetonbalken Beton - und Stahlbetonbau 2/73, p.43.
10. Código de las Construcciones de Concreto Reforzado ACI 318-77 (traducción del ICPC).
11. MEHMEL UND BECKER, Zur Schubbemessung des kurzen kragarms, Bauingenieur 6/1965.
12. Koncz, Manual de la Prefabricación Vo.1, p.93.
13. BONZEL, BUB, FUNK, Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen Band I.
14. KONING G., EISERT H. D., Anwendungseispiele zu DIN 1045.
15. KORDINA K., Das Verhalten von Stahlbeton und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff Beton, 1963 Hefte 1 y 2.
16. MULLER, F. P. (Hrsq) Erdbebensicherung von Bauwerken. Seminar am 8./9. Oktober 1974. U. zu Karlsruhe.
17. T. Y Lin, F. kulka, Yang Neunstöckiges Bürohaus aus vorgespannten Fertigteilen in Kalifornien U.S.A. (Edificio de 9 pisos para oficinas, hecho con prefabricados pretensados en California) Beton und Stahlbetonbau Mai 1964.
19. MAST, R. "Seismic Desing of 24-Story Building with Precast Elements". PCI Journal Jul-Aug. 1972.
20. ENGLEKIRK, R. "Development of a Precast Concrete Ductile Frame" PCI Journal. Nov-Dic 1979.
21. Mejía C., Luis Gonzalo "Aplicabilidad del refuerzo para colapso progresivo a estructuras prefabricadas en zonas sísmicas". ICPC, Ag. 1981, Medellín.