

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS INDUSTRIALES DE ACERO

OSCAR DE BUEN LOPEZ DE HEREDIA (I)

ESTRUCTURAS REGULARES DE UN NIVEL

Estructuras sin grúas móviles En la mayor parte de las estructuras industriales se requieren áreas grandes libres de columnas, pero la operación de las plantas industriales permite casi siempre colocar columnas relativamente cercanas unas de otras a lo largo de los ejes longitudinales, dejando claros libres grandes entre esos ejes.

Por ejemplo, en la planta esquemática de la Fig. 1 se pueden colocar columnas en los ejes A, B y C separadas a no más de 5 ó 6 m, mientras que las distancias L_1 y L_2 entre esos ejes son del orden de 30 ó 40 m, o aún mayores?

La altura total de la estructura es con frecuencia pequeña y las cargas que soporta reducidas, pues en muchos casos sólo se necesita una cubierta ligera, sobre columnas de 6 a 8 m de altura; la cubierta es inclinada, con la pendiente necesaria para desalojar el agua de lluvia, y se utilizan en ella materiales de poco peso, casi siempre lámina, de asbesto-cemento, acero o aluminio.

En estructuras de este tipo suelen emplearse marcos rígidos en la dirección transversal, y la resistencia ante fuerzas horizontales longitudinales se logra por medio de sistemas de contraventeo verticales, colocados en los ejes A, B y C en el ejemplo de la Fig. 1, combinados en ocasiones con los contraventeos horizontales de techo, que sirven también para proporcionar estabilidad lateral a los marcos rígidos.

Cuando se usa esta estructuración el diseño de los marcos rígidos transversales queda regido casi siempre por las cargas verticales o por la combinación de éstas con viento; dada la poca altura de la estructura y la naturaleza de las cargas que soporta, los efectos sísmicos no suelen ser críticos.

En cambio, es frecuente que sí lo sean en el diseño de los contraventeos verticales de los ejes longitudinales, ya que la operación de la planta limita el número de entre ejes en los que han de colocarse, sobre todo en los ejes intermedios (B, en la fig. 1); las restricciones en los ejes laterales son en general menores, sobre todo cuando coinciden con -

(I) Profesor del Area de Estructuras y Jefe de la División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ingeniero Consultor.

fachadas del edificio.

Puede darse el caso, inclusive, de que todos los efectos producidos por sismo longitudinal tengan que ser resistidos -- por elementos colocados en los ejes laterales, ante la imposibilidad o inconveniencia de poner contraventeos en los intermedios; cuando ésto sucede, debe diseñarse un sistema de contraventeo horizontal, en el techo del edificio, que transmita las fuerzas sísmicas a los ejes laterales, pues la cubierta no tiene ni la rigidez ni la resistencia necesarias para trabajar como diafragma.

Las fuerzas horizontales longitudinales se resisten en ocasiones por medio de marcos rígidos, de alma llena o triangulados, colocados en posiciones estratégicas en los ejes longitudinales; aunque son más costosos que los contravientos cruzados, tienen la ventaja de no impedir la circulación dentro de la nave a través de las crujías en las que están colocados, -- por lo que su uso es con frecuencia apropiado.

Los contravientos tipo a (fig. 2) se utilizan en ejes longitudinales intermedios y los tipo b en los laterales, en zonas donde no haya puertas; al mismo tiempo que resisten las -- fuerzas horizontales longitudinales proporcionan soporte lateral a las columnas, incrementando su capacidad de carga.

En estos casos se acostumbra utilizar diagonales de relación de esbeltez muy elevada, con poca resistencia a la compresión, por lo que se asigna a la diagonal en tensión la tarea de resistir la fuerza horizontal completa. Esta solución, que puede no ser correcta en estructuras de varios niveles, ha demostrado ser adecuada en los sistemas estructurales que se están discutiendo.

El contraventeo tipo c es un marco rígido triangulado, como el de la fi. 2, o hecho con secciones de alma llena.

Debe ponerse un cuidado especial en la trasmisión de las -- fuerzas sísmicas a las crujías contraventeadas, lo que se logra por medio de puntales colocados en los ejes longitudinales y, si es necesario, contraventeos horizontales en el nivel de la cubierta.

En la fig. 3 se muestra uno de los muchos arreglos posibles; en él, las fuerzas sísmicas son transmitidas por los puntales hasta la crujía provista de contraventeo horizontal y, a través de éste, al contraventeo o marco rígido vertical.

No se muestran en la figura los elementos horizontales adicionales que se necesitan para que las armaduras de techo trabajen de manera adecuada.

Cuando el diseño de los marcos rígidos transversales queda regido por sismo (lo que, como ya se ha mencionado, es poco frecuente en estructuras como las discutidas hasta ahora) pueden utilizarse factores de ductilidad semejantes a los recomendados para edificios urbanos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las características de la estructura, en lo que se refiere a claros y cargas, llevan casi siempre al empleo de marcos rígidos con cabezales formados por armaduras, de alma abierta, y que aún en los casos en que se emplean trabes de alma llena es casi imposible obtener secciones económicas que tengan las relaciones ancho/grueso en almas y patines características de las secciones compactas. Por estas razones, las deformaciones plásticas que preceden al colapso y las redistribuciones de momentos correspondientes son, en general, de muy pequeña importancia.

Puede obtenerse cierta ductilidad obligando a que antes de la falla se formen articulaciones plásticas en las columnas, lo que se logra sobrediseñando ligeramente las armaduras; estas articulaciones tienen menos capacidad de rotación que las que aparecen en vigas, a causa de la fuerza normal en las columnas.

Lo que se acaba de decir no es aplicable a cierto tipo de estructuras fabriles formadas por marcos rígidos, sencillos o continuos y de claros pequeños o medios, que se diseñan económicamente utilizando métodos plásticos y que poseen, por tanto, amplia capacidad de deformación plástica y de redistribución de momentos; el diseño de este tipo de estructuras rara vez queda regido por sismo.

Los contraventeos colocados en los ejes longitudinales deben diseñarse con factores de ductilidad pequeños, cercanos a uno, tanto por sus características propias como porque la estructura sin contraventeos no suele ser capaz de resistir ningún porcentaje importante de la fuerza sísmica longitudinal. Ha de ponerse especial cuidado en el diseño del anclaje del contraventeo.

Aunque poco comunes en nuestro medio, en ocasiones son convenientes las estructuras en las que todo el sistema de techo está libremente apoyado en las columnas; este tipo de estructuración es eficiente en fábricas en las que se llevan a cabo procesos industriales que evolucionan con rapidez, lo que obliga a efectuar modificaciones y ampliaciones frecuentes en la estructura. El contraventeo, tanto horizontal como vertical, necesario ahora para resistir fuerzas horizontales y proporcionar estabilidad lateral en las dos direcciones, tiene que diseñarse con mucho cuidado. Las columnas (y sus cimentaciones) presentan también algunos problemas especiales, pues trabajan fundamentalmente en voladizo.

Estructuras con grúas móviles. Un segundo tipo importante de estructuras fabriles es el constituido por sistemas semejantes a los discutidos hasta ahora, pero en los que se requiere emplear grúas móviles de elevada capacidad de carga.

Para el diseño de estas estructuras conviene considerar dos casos, que difieren uno del otro en la frecuencia con que las grúas trabajan a su capacidad máxima. En ocasiones se emplean la mayor parte del tiempo para mover cargas pequeñas, y sólo de vez en cuando se utiliza toda su capacidad; esto sucede cuando las grúas no forman parte del proceso de operación de la planta y se utilizan principalmente para montar o desmontar el equipo que hay en ella (en plantas termoeléctricas y en salones de prensas de industrias metalmeccánicas, por ejemplo). En cambio, en otros casos las grúas funcionan continuamente con carga máxima, como sucede en algunas instalaciones de la industria siderúrgica.

Las grúas ocasionan dos modificaciones en la estructura, que tienden a que el sismo se vuelva crítico. En primer lugar, las cargas aumentan importantemente, sobre todo cuando hay varias grúas que trabajan al mismo tiempo; en segundo, crece la altura de la estructura, ya que las grúas han de trabajar por encima del equipo que deberán mover y, además, se requieren columnas verticales debajo y arriba de ellas.

En la Fig. 4 se muestra un corte esquemático y una planta parcial, al nivel de las trabes carril, de una estructura de dos crujiás con dos grúas móviles en cada una de ellas.

Puesto que las grúas se desplazan a lo largo de la nave y el carro del que cuelga la carga se mueve a lo ancho, en un instante dado las cuatro grúas pueden aplicar sus descargas máximas en la misma columna. En estas condiciones es muy probable que el diseño del marco que soporta la mayor parte del peso de las grúas sí quede regido por la combinación de cargas verticales y sísmicas.

Se plantean aquí varios problemas que deben resolverse si se quiere obtener una solución segura y no excesivamente costosa.

Uno de ellos es el de cómo se distribuyen las fuerzas horizontales transversales ocasionadas por el frenaje y cabeceo de las grúas, así como las acciones sísmicas debidas a la masa de las mismas, entre los marcos que las están soportando y los paralelos a ellos. Aunque ha sido costumbre diseñar cada marco para que resista por sí solo las acciones mencionadas, es evidente que este procedimiento, aunque seguro, puede llevar a resultados demasiado conservadores, puesto que no se tiene en cuenta que los marcos situados junto al crítico le ayudan a re-

sistir las fuerzas horizontales, ya que están ligados con él -- por medio de los contraventeos del techo. La menor o mayor importancia del trabajo de conjunto depende de la rigidez relativa de los marcos y de los elementos que los ligan entre sí. -- Aunque se han efectuado algunos estudios tendientes a resolver este problema, hasta donde el autor de este trabajo sabe sólo se han referido a cargas estáticas y no han sido suficientes para proporcionar reglas, ni siquiera aproximadas, que permitan establecer relaciones económicas entre los diversos parámetros que definen el comportamiento de la estructura. Tampoco se han hecho estudios dinámicos, ni se cuenta con medios para establecer valores de los factores de ductilidad. Mientras se obtiene la información necesaria para efectuar diseños más racionales, que se requiere urgentemente para obtener soluciones económicas en un problema frecuente en un país que se encuentra en la etapa de desarrollo del nuestro, puede determinarse la manera en que se distribuyen las fuerzas horizontales entre varios marcos utilizando métodos de análisis elástico considerando cargas estáticas, y los elementos de contraventeo horizontal deben diseñarse con factores de ductilidad pequeños y con coeficientes de seguridad mayores que el resto de la estructura.

Otro problema de mucha importancia, que tampoco se ha resuelto todavía, es el que se refiere a las combinaciones de cargas que han de utilizarse en el diseño y a los coeficientes de seguridad (o factores de carga) correspondientes a cada una de ellas.

La probabilidad de que las cuatro grúas se encuentren en la posición indicada en la Fig. 4 depende del proceso industrial en que intervengan y es seguramente pequeña, pero menor aún es la probabilidad de que en ese instante haya un sismo de intensidad máxima. El problema se complica todavía más al considerar efectos, simultáneos o no, de impacto, frenaje y cabeceo.

Es claro que el diseño de estas estructuras se puede simplificar y racionalizar utilizando estados límite de servicio y resistencia y factores de carga correspondientes, pero falta mucho para poder aplicar este método de una manera racional, pues se carece de la mayor parte de la información necesaria para ello. Es este otro campo que debe estudiarse con urgencia. -- Mientras tanto, el diseño ha de basarse en las condiciones de carga más desfavorables que se juzguen probables de acuerdo con el proceso de operación de la planta y en coeficientes de seguridad o factores de carga escogidos teniendo en cuenta la posibilidad, alta o baja, de que se presenten esas condiciones.

En la elección de los factores de carga o de los coeficientes de seguridad hay que actuar con prudencia, pero sin perder de vista los costos muy elevados, e innecesarios, a los que puede llegarse si el diseño se basa en la combinación de solici

taciones más desfavorable, sin incluir de alguna manera la probabilidad, tal vez muy baja, de que se presente.

En este problema se advierten con claridad las ventajas de utilizar un diseño basado en estados límite, que permite utilizar diversos factores de carga para los diferentes combinaciones de solicitaciones, facilita ajustes futuros de los factores de resistencia cuando se cuente con información adicional, permite introducir en el diseño resultados de investigaciones sobrecargas y su variación, y proporciona un marco de referencia para manejar condiciones de carga poco frecuentes, que no estén consideradas en las especificaciones.

ESTRUCTURAS IRREGULARES DE VARIOS NIVELES

Hasta ahora se han discutido estructuras industriales regulares, formadas en la mayoría de los casos por una sucesión de marcos transversales, todos iguales o muy parecidos, ligados -- entre sí por los elementos de contraventeo, y que soportan los largueros para la lámina de techo y los recubrimientos de las paredes. Las cargas son en general reducidas, con excepción de las grúas móviles, que son causa de que las estructuras mencionadas se hayan dividido en dos grupos.

Un tercer grupo es el constituido por las estructuras complejas, con estructuraciones irregulares y varios niveles que generalmente no se conservan en toda la construcción, sino varían de unas zonas a otras.

Para entender el por qué de la complejidad de muchas estructuras industriales debe tenerse en cuenta que, más que en cualquier otra actividad, la estructura, además de servir como soporte de los elementos que aíslan a la maquinaria y a los operarios del medio ambiente, desempeña un papel activo en el proceso que se lleva a cabo dentro del edificio. El ingeniero mecánico o industrial que diseña la maquinaria y el proceso utiliza la estructura como parte de esa maquinaria cuando le conviene hacerlo, y es enemigo acérrimo de ella cuando le estorba. El ingeniero estructurista debe ceder en muchas ocasiones, aceptando sistemas que no son los más convenientes desde el punto de vista estrictamente estructural, pues es preferible hacer una inversión inicial mayor si conduce a una operación más eficiente y económica.

Todo ésto lleva con frecuencia a problemas que se salen de los casos contemplados en las especificaciones para diseño.

La filosofía en la que se basa el diseño sísmico moderno -- proviene del estudio analítico de estructuras simétricas y regulares propias de edificios para departamentos u oficinas y de la observación de su comportamiento durante sismos reales inten

sos. Esto ha llevado a recomendar que los análisis se efectúen utilizando métodos elásticos y que los resultados de esos análisis se empleen en el diseño, elástico también, después de reducirlos a valores menores que los calculados por medio de factores de ductilidad. Con los coeficientes sísmicos y los factores de ductilidad recomendados se pretende reducir la probabilidad de falla a niveles muy bajos, pero se acepta que se presenten daños en elementos no estructurales durante sismos de periodo de recurrencia reducido.

Esta filosofía de diseño puede ser apropiada para edificios del tipo de los mencionados arriba (aunque, en opinión del que habla, debería indicarse explícitamente en los reglamentos, lo que nunca se hace), pero no lo es necesariamente en edificios industriales, ya que pueden producirse pérdidas de operación su mamente elevadas a causa de daños no muy importantes en la estructura o en elementos no estructurales; este es el caso, por ejemplo, en muchos de los edificios de una planta siderúrgica. Además, las ductilidades supuestas, del orden de 4, son muy difíciles de demostrar en estructuras asimétricas complejas.

Las fuerzas horizontales producidas por un temblor afectan no solo a la estructura, sino también a la maquinaria y equipo, servicios y acabados arquitectónicos. Cada uno de esos elemen tos debe estar restringido vertical y horizontalmente y sus deflexiones deben ser compatibles, aspecto de especial importancia, que debe ser examinado con todo cuidado, cuando se esperen respuestas diferentes e interacción de modos de vibrar.

Lo mismo que en edificios urbanos, pueden emplearse sistemas estructurales de dos tipos diferentes, o una combinación de ambos. Las estructuras del primer tipo están formadas por marcos rígidos en todos los niveles, mientras que los elementos re sistentes de las del segundo son marcos contraventeados, también en todos los niveles. La complejidad de las estructuras industriales obliga con frecuencia a combinar los dos tipos, utilizando marcos rígidos y contraventeados en un mismo edificio y aún, en ocasiones, a tener en un mismo marco unos entresijos con contraventeo y otros sin él.

Los contraventeos pueden ser en X o en K, o tener otras con figuraciones. Deben diseñarse de manera que trabajen en ten sión y en compresión, para que la fuerza sísmica sea resistida por las dos diagonales de cada tablero; se logra así mayor rigi dez que cuando trabaja solo la de tensión y se reducen las de formaciones permanentes de las diagonales que, al acumularse du rante ciclos sucesivos de carga y descarga, podrían llegar a ocasionar desplazamientos laterales y efectos de segundo orden excesivos.

En general, el análisis de estructuras complejas ha de efec

tuarse por métodos elásticos utilizando programas de computadora que permitan idealizarlas como sistemas tridimensionales, para considerar las rigideces de los diversos elementos que las constituyen con la mayor exactitud posible, y teniendo en cuenta el efecto de diafragma de los pisos, que con frecuencia existen solo en zonas limitadas, y que pueden requerir refuerzos especiales. Deben tenerse en cuenta también efectos de segundo orden, principalmente en el diseño de las columnas, al menos en estructuras esbeltas, y la influencia en la respuesta de las dimensiones reales de las juntas, cuando vigas, columnas, o ambas, son de gran peralte; no debe, pues, utilizarse la teoría convencional en la que las uniones se consideran como la intersección de dos líneas, sino incluir sus dimensiones en el modelo matemático empleado para el análisis (Fig. 5).

El factor de ductilidad ha de escogerse con cuidado y de manera conservadora, en vista de la poca información con que se cuenta para estas estructuras. Además, resulta difícil satisfacer los requisitos necesarios para que la respuesta sea dúctil (las relaciones ancho/grueso de almas y patines, sobre todo de las primeras, suelen ser muy elevadas) y poco se sabe sobre el comportamiento de conexiones viga-columna cuando sus dimensiones están lejos de las usuales en edificios urbanos, dado que éstas han sido las estudiadas en laboratorios, y las especificaciones de diseño provienen de esos estudios.

El comportamiento de todos los elementos secundarios ligados a pisos o a vigas o columnas ha de ser examinado con mucho cuidado, especialmente cuando su frecuencia natural de vibración es cercana a la del edificio, y a todos los anclajes debérseles una cierta longitud libre, necesaria para obtener la ductilidad adecuada; esto, que es importante en los anclajes de equipo y otros apéndices (Fig. 6), es fundamental en las anclas que ligan la estructura con la cimentación. Puede lograrse utilizando detalles del tipo del mostrado en la Fig. 7.

CONEXIONES

Las conexiones deben diseñarse, detallarse y construirse -- con gran cuidado, sobre todo cuando requieren soldaduras de penetración en placas gruesas, susceptibles de problemas de desgarro laminar ("lamellar tearing"). Para evitar este fenómeno se escogen detalles que eviten que aparezcan fuerzas elevadas; ocasionadas por la contracción de las soldaduras, en la dirección del espesor de las placas, ya que pueden ocasionar grietas a causa de la baja ductilidad del acero en esa dirección y a posibles inclusiones de escorias que reducen su resistencia. En la Fig. 8 se muestran dos juntas en esquina: en la primera la contracción de la soldadura ocasiona esfuerzos en la dirección del grueso de la placa horizontal, lo que no sucede en la segunda; desde el punto de vista del fenómeno que se está estu-

diando este detalle es, pues, preferible al primero.

DESPLAZAMIENTOS LATERALES

Lo mismo que en edificios de otros tipos, también en estructuras fabriles deben mantenerse los desplazamientos laterales - producidos por las fuerzas sísmicas por debajo de límites que - aseguren un comportamiento adecuado de elementos no estructurales, maquinaria y equipo, y reduzcan los efectos de segundo orden producidos por la interacción carga vertical-desplazamiento lateral.

Los desplazamientos laterales admisibles suelen ser mayores que en edificios urbanos, pues con frecuencia no hay muros divisorios de ninguna clase y los exteriores son de lámina.

En las especificaciones de diseño no suelen indicarse valores permisibles, pero se ha señalado que los desplazamientos laterales producidos por viento o sismo en columnas que soportan grúas móviles no deben exceder de valores comprendidos entre -- $1/200$ y $1/400$ de la altura, y que pueden requerirse limitaciones más estrictas cuando la operación de las grúas es especialmente sensible a esos desplazamientos.

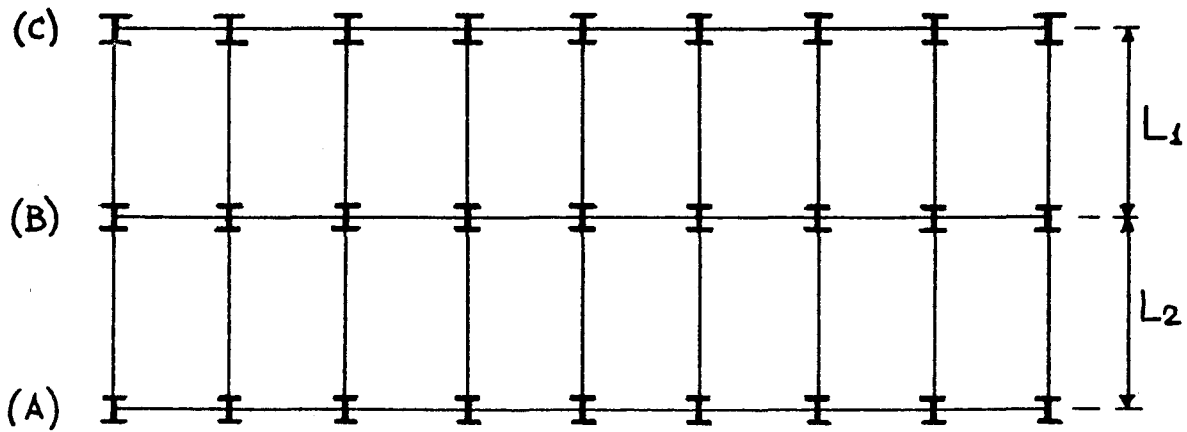


FIG. 1

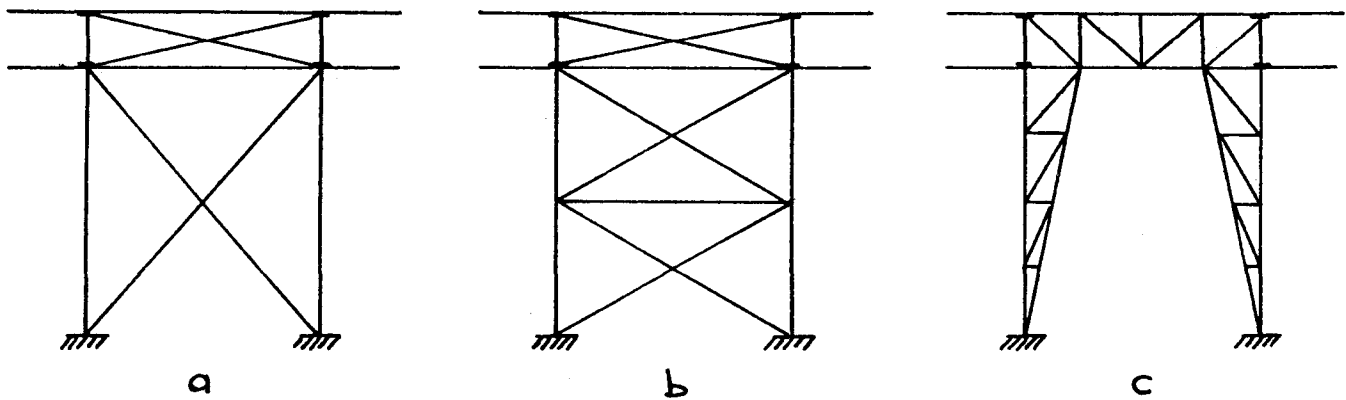


FIG. 2

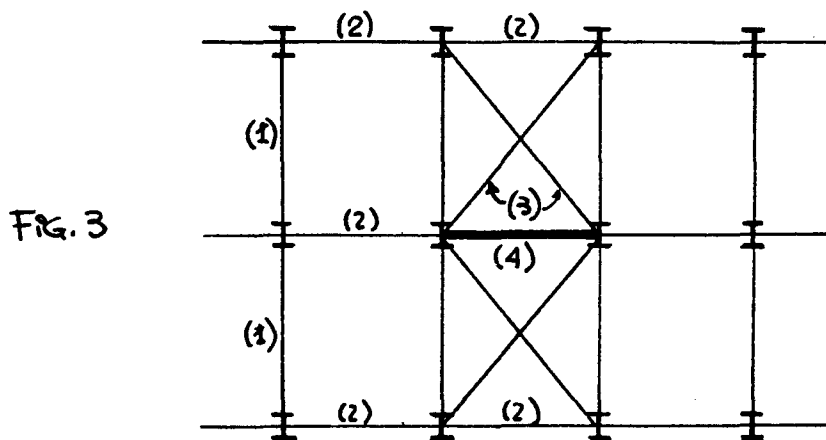


FIG. 3

- (1) ARMADURAS DE TECHO
- (2) PUNTALES CORRIDOS
- (3) CONTRAVIENTOS HORIZONTALES
- (4) CRUJIA CONTRAVIENTEADA VERTICALMENTE

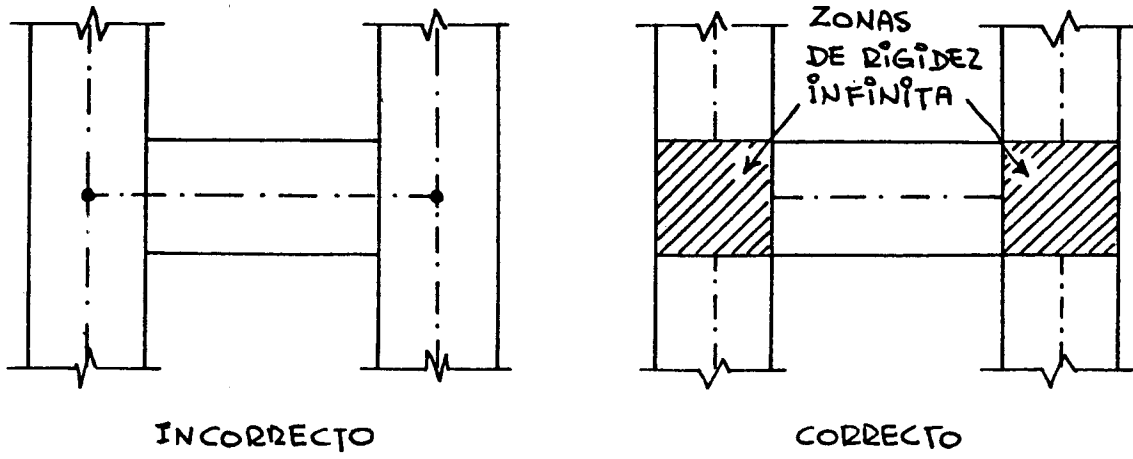


FIG. 5

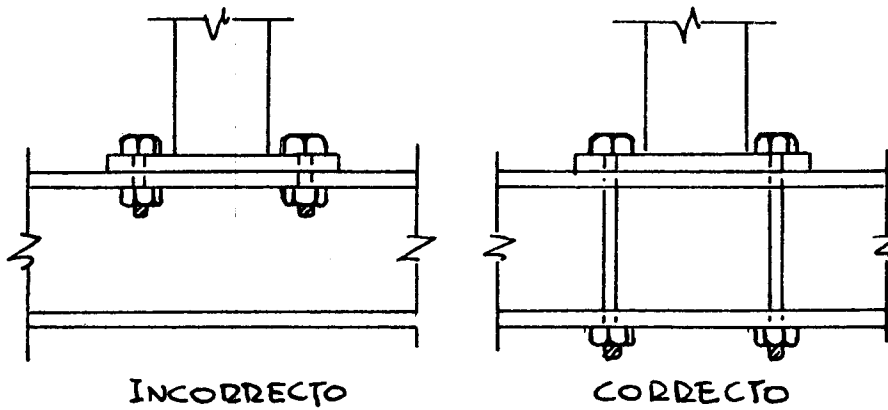


FIG. 6

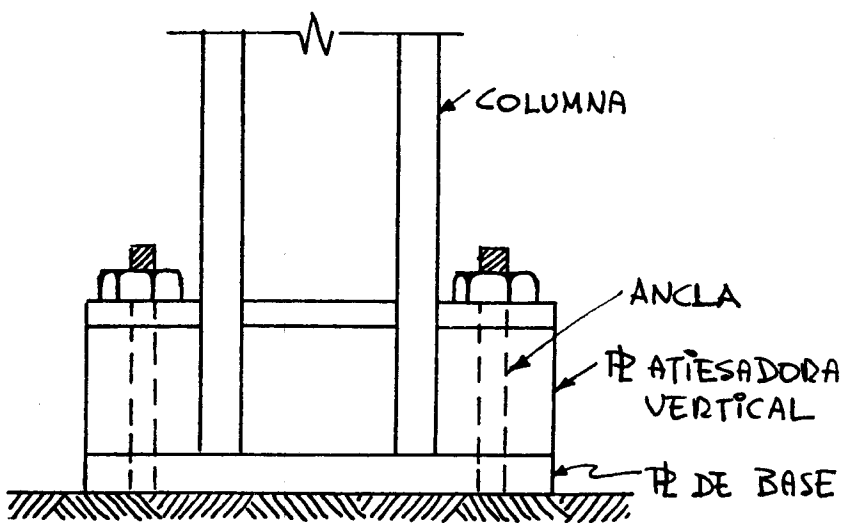
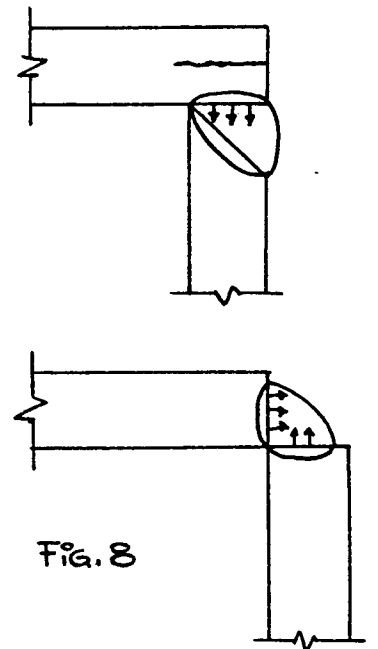


FIG. 7



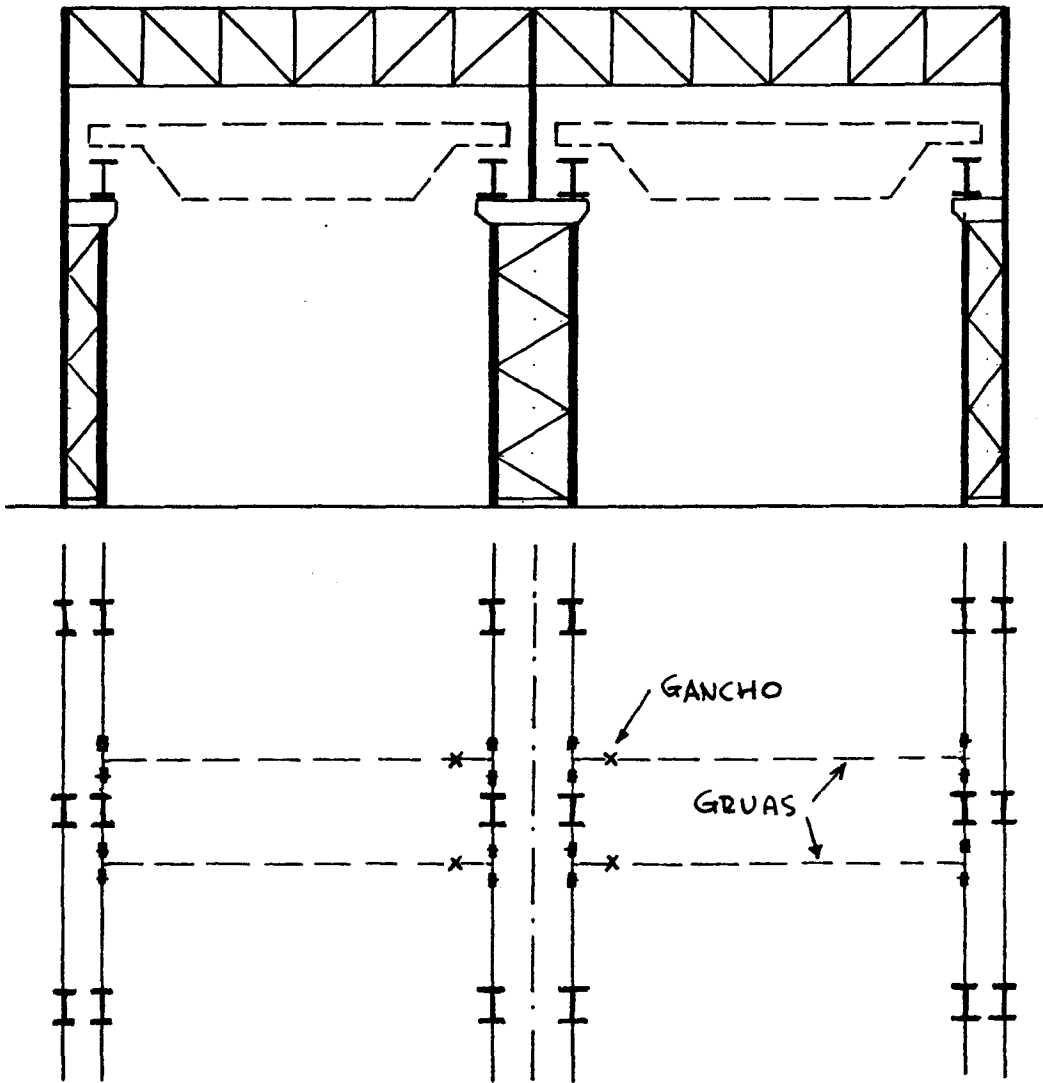


Fig. 4