

## CAPÍTULO XIII. PROYECTO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS FRENTE AL SISMO

### **Artículo 49.º Generalidades**

En este capítulo se relacionan algunos aspectos particulares del proyecto y la ejecución de estructuras metálicas frente a acciones sísmicas que complementan las disposiciones de tipo general contenidas en la norma de construcción sismorresistente NCSE-02, aprobada por Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, y las específicas aplicables a tipos particulares de construcciones (puentes, depósitos, tuberías,..).

El capítulo se dirige especialmente al proyecto y ejecución de aquellas partes de las estructuras que forman el sistema resistente ante las acciones sísmicas.

Las normas vigentes de Construcción Sismorresistente establecen espectros elásticos de respuesta que pueden ser modificados teniendo en cuenta la capacidad de la estructura de comportarse de forma dúctil, es decir, de forma estable en régimen plástico. Cuando en el proyecto de la estructura se define la sollicitación a partir del espectro elástico, sin reducción alguna por ductilidad, no es necesario el empleo de otras disposiciones que las de carácter general (aplicables a construcciones situadas en zonas de baja o nula sismicidad) contenidas en la presente Instrucción y las contenidas en el Artículo 50 siguiente. La utilización de espectros de cálculo reducidos obliga, en cambio, a la estricta observancia de las condiciones detalladas en el presente capítulo, condiciones más restrictivas que las generales.

### **Comentarios**

Los aspectos de proyecto dependientes del tipo particular de construcción, como pueda ser la definición del espectro a aplicar en puentes, la modelización del efecto del contenido en estructuras de contención (estimación de las masas en depósitos), quedan en general fuera del alcance del capítulo. No obstante, se incluyen algunas prescripciones de proyecto relativas a un tipo particular de construcción, la de edificios, porque se refieren a aspectos (como el efecto de los cerramientos y particiones en la rigidez de la estructura) que afectan más directamente a las edificaciones con estructura metálica que a las que disponen de estructura de hormigón.

El segundo párrafo del artículo se refiere básicamente al caso particular de edificación, en la que es frecuente el empleo de configuraciones estructurales isostáticas (uniones simples entre vigas y pilares) rigidizadas por núcleos o pantallas de hormigón armado (Figura .a), núcleos o pantallas cuyo proyecto no queda recogido en el presente capítulo. Aunque, convencionalmente, la estructura del edificio se defina como metálica, la parte resistente ante acciones horizontales es

una estructura de hormigón y debe ser comprobada mediante la correspondiente Instrucción. La única comprobación requerida para la estructura metálica es, en estos casos, la relativa a la capacidad de deformación (que normalmente vendrá dada por la capacidad de giro de las uniones). Idéntica comprobación se requiere en los elementos no proyectados como resistentes ante acciones horizontales de las estructuras resueltas en su totalidad mediante elementos metálicos (Figura 49.1.b).

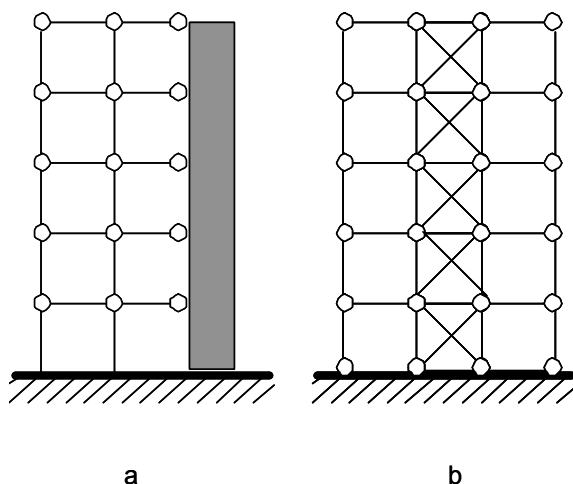


Figura 49.1

Los últimos párrafos del artículo hacen referencia al objeto directo del presente capítulo: la especificación de las reglas particulares que permiten el proyecto de estructuras en el rango anelástico. En el proyecto de estructuras en zonas sísmicas son posibles tres planteamientos diferentes:

Estructuras que disponen de sistemas de aislamiento:

No quedan cubiertas por la presente Instrucción

Estructuras proyectadas en el rango elástico:

En la determinación de esfuerzos y desplazamientos se supone el comportamiento elástico de la estructura. La sollicitación responde, por tanto, al espectro elástico, sin reducción alguna por ductilidad.

Es el tipo de cálculo utilizado normalmente en la comprobación de la estructura en servicio (según se define en el siguiente artículo), aunque también se puede emplear en las comprobaciones de seguridad.

Estructuras proyectadas en el rango anelástico:

En el proyecto se comprueba la estabilidad de la estructura en el rango plástico mediante la definición de una jerarquía de capacidades de forma que durante la actuación del sismo se producen rótulas a flexión, o alargamientos plásticos en axil en los lugares previstos, lugares a los que se designará como zonas de disipación de la energía. Como planteamiento práctico, se admite un cálculo elástico ante cargas inferiores a las que solicitarían la estructura si ésta realmente se mantuviese en el rango elástico.

En zonas de sismicidad moderada es normalmente adecuado el proyecto en régimen elástico tanto para las comprobaciones de seguridad como de servicio, sin reducción alguna del espectro. Si, en el sentido opuesto, la aceleración de cálculo es importante, en la comprobación de la seguridad resulta adecuado estudiar el equilibrio entre el ahorro que, en términos globales

representa la reducción de cargas por ductilidad y el coste, también en términos globales, que representa el asegurar la ductilidad requerida.

## **Artículo 50.º Bases de proyecto**

Las bases de proyecto para las estructuras sometidas a acciones sísmicas son las que se establecen en el Título 1ª, Bases de proyecto, de esta Instrucción. En el artículo 13º, combinación de acciones, se define la expresión de la combinación en la que participa la acción sísmica.

En el caso de construcciones particulares (puentes, depósitos, tuberías,...) pudiera ocurrir que la correspondiente norma específica requiera la comprobación de la estructura frente ante combinaciones diferentes a la definida en esta Instrucción o, incluso, ante más de una combinación.

Como valores representativos cuasipermanentes de las acciones variables se tomarán los indicados en el Capítulo 3 de la presente Instrucción o los definidos en las normas específicas aplicables a tipos particulares de construcciones.

### **Comentarios**

En general las construcciones en zonas sísmicas han de satisfacer dos criterios:

#### Seguridad:

La estructura se mantendrá estable en caso de eventos importantes, de baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la construcción, manteniendo incluso alguna capacidad residual. No obstante, se admite la aparición de daños que puedan conllevar la necesidad de demoler la construcción.

#### Servicio:

Los daños producidos en la construcción por eventos de menor importancia, con una probabilidad relativamente elevada de producirse durante la vida útil de la construcción, serán limitados, de forma que la construcción pueda seguir prestando el servicio para el que fue proyectada.

En algunos tipos de construcciones, como las de edificación convencional, normalmente se admite como suficiente la comprobación frente a uno sólo de los criterios, el de seguridad, criterio que se supone más exigente que el de servicio. Es el planteamiento expuesto en el Título 1ª, Bases de proyecto, de esta Instrucción y en el correspondiente de la norma NCSE.

Para otro tipo de construcciones, como los puentes, se exige en cambio la comprobación frente a ambos criterios.

### **50.1. Estados límite**

Se tomarán explícitamente en consideración como estados límite últimos los correspondientes a los efectos de los desplazamientos que pueden causar daños graves, como los producidos en el choque entre construcciones aledañas (o entre partes separadas de una misma construcción) o la pérdida de apoyo. Las comprobaciones correspondientes se basarán en la estimación del ancho de junta o la entrega necesarias para evitar estos efectos sin entrar en la evaluación de sus consecuencias.

En general, para la estimación del ancho de junta o la entrega necesarias, se seguirán las prescripciones de la norma NCSE-02 y de las Instrucciones de carácter específico aplicables.

En edificación, y en el caso particular de juntas entre distintos cuerpos de un mismo edificio (caso de las juntas de dilatación) que separen construcciones de características similares (con períodos fundamentales semejantes en la dirección del sismo considerado), el ancho de junta se puede estimar como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los desplazamientos de cada bloque.

En el caso de los puentes, se considerarán explícitamente los estados límite último correspondientes al choque entre el tablero y el estribo y el correspondiente a la pérdida de apoyo de aquél en pilas y estribos.

### Comentarios

En el caso de sismo, y a diferencia de lo habitual al considerar otras solicitaciones, la evaluación de los desplazamientos no sólo responde a una exigencia de servicio sino que afecta de forma directa a la seguridad. Es por tanto necesaria una estimación conservadora de los desplazamientos que requerirá en muchos casos la formulación de un modelo de la estructura diferente al empleado en la evaluación de los esfuerzos. Igualmente, en los casos de estructuras sujetas a normas específicas que exijan la comprobación en servicio (puentes, por ejemplo) será necesaria la evaluación de los desplazamientos también ante el evento de servicio, definido por un espectro diferente.

La reducción del valor de la junta indicada en el articulado se aplica únicamente al caso de juntas, normalmente de dilatación, entre construcciones semejantes (Figura 50.1.a) y, naturalmente, no se debe considerar en el caso de las juntas sísmicas proyectadas para separar construcciones irregulares en planta (Figura 50.1.b) tal y como se definen en la Instrucción NCSE-02. En estos últimos casos el período de los distintos bloques será, en general, muy distinto y por tanto no es aplicable la reducción comentada.

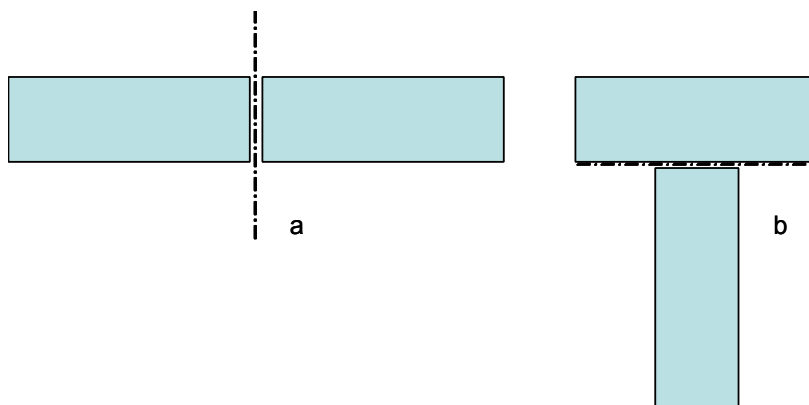


Figura 50.1

### 50.2. Acciones

Cuando la acción sísmica se especifique mediante un espectro de respuesta, éste deberá corresponder al de la vigente norma NCSE-02 o, en el caso particular de construcciones a las que por sus características especiales (Período fundamental fuera del rango habitual) no les sea adecuada la aplicación del citado espectro (puentes, depósitos,...), a las Instrucciones específicas aplicables. En algunos de estos casos será necesario el empleo de espectros diferentes en las comprobaciones de seguridad y de servicio.

Cuando la acción sísmica se especifique mediante registros temporales, generados numéricamente o correspondientes a terremotos reales, se demostrará su compatibilidad con los espectros correspondientes, y se seguirán las especificaciones de la Instrucción aplicable en lo relativo al número de registros y a la duración de los mismos.

En la presente Instrucción no se contemplan otras definiciones de la acción sísmica.

Como factores reductores del espectro elástico se utilizarán los prescritos por NCSE.

Cualquier valor conservador que se pueda demostrar (mediante, por ejemplo, cálculos plásticos elementales) de la relación entre los multiplicadores de carga “ $\alpha$ ” correspondientes a las situaciones de colapso y de primera plastificación (Figura 50.2), puede utilizarse para reducir el espectro elástico en el caso de pórticos de nudos rígidos o arriostrados de forma incompleta (los ejes de las barras no concurren en los nudos). Es decir, se admite el incrementar el valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad “ $\mu$ ” prescrito por la norma NCSE en la relación  $\alpha_u/\alpha_y$ .

Como limitación, no se aplicarán valores del citado cociente superiores a:

Tipo estructural	Valor máximo del cociente $\alpha_u/\alpha_y$
Pórticos de nudos rígidos y una altura	1,1
Pórticos de nudos rígidos y varias alturas	1,2
Pórticos de nudos rígidos, varias alturas y varias alineaciones de pilares	1,3
Estructuras arriostradas mediante triangulaciones incompletas	1,1

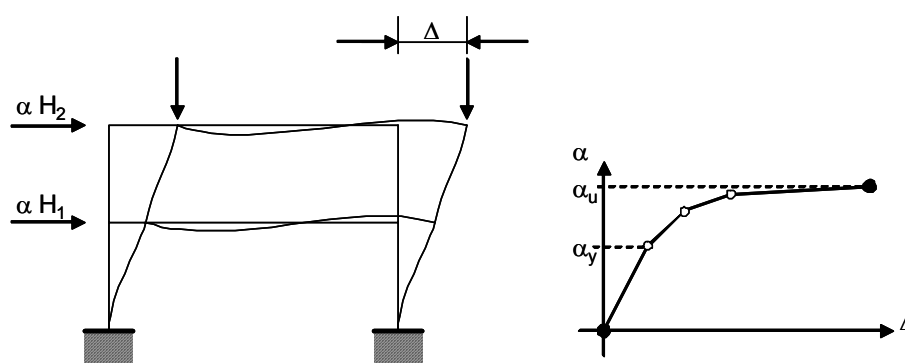


Figura 50.2

### Comentarios

La propia norma NCSE-02 admite explícitamente el empleo de espectros diferentes en el caso de estructuras con periodo fundamental alto, caso frecuente en puentes, depósitos, antenas, etc. En estos casos será preferible utilizar espectros que contemplen una rama cuadrática de caída de la aceleración (desplazamiento constante) para periodos altos.

Los espectros correspondientes a los terremotos de seguridad y de servicio son, en general diferentes, tanto en escala como en forma. Esto es, la diferencia entre las solicitaciones respectivas no se limita, como en el caso de muchas otras acciones, a un simple cambio de escala.

La limitación de los valores del cociente  $\alpha_u/\alpha_y$  no se aplican al caso en que dicho cociente haya sido obtenido a partir de un cálculo incremental completo de tipo “empuje progresivo” (push-over).

## **Artículo 51.º Análisis estructural**

La evaluación esfuerzos y desplazamientos se basará en la modelización realista del comportamiento de la construcción en su conjunto. Si existiesen, se considerará la colaboración a la rigidez de los elementos no estructurales (en el caso de los edificios, cerramientos, particiones, escaleras, etc).

Cuando no sea posible una evaluación precisa del efecto de dichos elementos en la rigidez de la construcción, bien porque su comportamiento no se conozca con suficiente precisión o bien porque puedan sufrir alteraciones a lo largo de la vida de la construcción, se adoptarán valores conservadores.

Lo anterior conducirá en general a la realización de más de un análisis. Los esfuerzos se evaluarán mediante modelos en los que la rigidez no sea inferior a la real. En la evaluación de los desplazamientos, en cambio, se utilizarán valores de rigidez no superiores a los reales.

Las masas a considerar en cada modelo serán coherentes con las cargas consideradas en las hipótesis correspondientes y, en el caso de depósitos, pilas sumergidas, etc. responderán a un modelo aceptable de interacción fluido-estructura (por ejemplo, masas impulsiva y convectiva en depósitos). En el caso de edificios, las masas correspondientes a las sobrecargas de uso podrán reducirse en un 10%.

En el caso de construcciones en las que los elementos no estructurales se distribuyan se forma asimétrica en planta (edificio con cierre de medianería en uno de sus lados y fachada ligera en el opuesto) o irregular en alzado (planta baja comercial), el modelo estructural habrá de considerar explícitamente el efecto adverso de tales circunstancias (modos de torsión y concentración de la exigencia de ductilidad respectivamente).

La estimación de la importancia de los efectos de segundo orden se efectuará conforme al criterio especificado en la norma NCSE-02:

$$\theta = \frac{P_k \cdot d_k}{V_k \cdot h_k} < 0,10$$

Con los significados allí relacionados.

Cuando no se verifique la condición anterior pero se cumpla que  $\theta \leq 0,20$ , entonces los efectos de la amplificación pueden estimarse multiplicando la respuesta estructural (en las variables consideradas, esfuerzos o desplazamientos) por el cociente  $1/(1-\theta)$ .

En ningún caso el coeficiente  $\theta$  será mayor de 0,3.

### **Comentarios**

## Instrucción EAE. Capítulo XIII

En el caso de los edificios, la respuesta al terremoto depende en gran medida de los elementos no estructurales, por lo que un análisis basado únicamente en el modelo de la estructura puede conducir a estimaciones no conservadoras.

Como, por otra parte, la evaluación realista del efecto de estos elementos nunca es fácil, y en muchos casos imposible, es necesario recurrir a estimaciones conservadoras que complican el cálculo. Así, en la estimación de los esfuerzos es necesario asegurar que el período con el que se entra en el espectro no es superior al real, ya que entonces la aceleración espectral de cálculo no sería conservadora (la ordenada espectral es siempre decreciente con el período). En el lado opuesto, al evaluar los desplazamientos es necesario entrar en el espectro con períodos no inferiores al real, ya que el espectro de desplazamientos es siempre creciente.

Una estimación razonable del período fundamental a utilizar en la evaluación de los esfuerzos podría ser la proporcionada por las fórmulas indicadas en la norma NCSE-02 o en la bibliografía específica, expresiones de ajuste de los resultados obtenidos en la medida del período de edificios reales. Si en el cálculo se utilizan programas comerciales, se podrían modificar las características de los materiales al objeto de ajustar el período calculado por el programa (basado normalmente en el análisis modal de la estructura).

Si, con independencia de lo anterior, los elementos no estructurales se distribuyen de forma asimétrica será preciso considerar su localización al analizar la construcción. Si en el cálculo se utilizan programas comerciales, ya no bastaría con la modificación global de las características mecánicas de los materiales y probablemente sería preciso añadir barras equivalentes a la rigidez de la diagonal comprimida del paño, siguiendo las fórmulas de equivalencia habituales.

Para la estimación de los desplazamientos se podría utilizar el período obtenido a partir del análisis modal numérico de la estructura (procedimiento habitual de los programas comerciales).

Naturalmente, la citada duplicidad de los modelos no es necesaria cuando se puede demostrar que los elementos estructurales no participan en la respuesta de la estructura en agotamiento, bien porque se hayan tomado las medidas necesarias para aislarlos, bien porque su rigidez se degrade de forma controlada (sin llegar en ningún momento a introducir rigidizaciones espúreas que impliquen efectos de tipo de planta débil).

La reducción en el valor de las masas correspondientes a las sobrecargas de uso obedece a la participación reducida de muchas de estas masas en el movimiento del edificio (ya que, al no estar rígidamente unidas a éste, deslizan).

### **Artículo 52.º                      Materiales**

Cuando en el proyecto no se considere reducción alguna del espectro no serán precisas otras condiciones sobre los materiales que las expuestas en el Título 3º de la presente Instrucción.

Si se considera alguna reducción por ductilidad, se requerirán en general condiciones más restrictivas sobre los materiales. En este caso:

- Para los aceros estructurales serán de aplicación las condiciones relacionadas en la norma NCSE-02. En concreto, los aceros cumplirán las prescripciones del artículo 27 de la presente Instrucción, en especial los relativos a la ductilidad y a la prevención del fallo por desgarro laminar.
- Para las secciones serán de aplicación las condiciones relacionadas en NCSE-02. En concreto, las relativas a la simetría y a la clase de la sección.
- Los tornillos serán, preferentemente, de calidades 8.8 ó 10.9.

## Comentarios

Aunque las condiciones relacionadas en el articulado tan sólo son exigibles en las zonas de la estructura previstas como zonas de disipación de energía (aquellas en las que se concentran las deformaciones en el rango plástico), la inevitable incertidumbre respecto a la localización y la extensión de tales zonas, así como los problemas derivados del empleo de materiales distintos en una misma obra, hacen aconsejable el ampliar el uso de los materiales que cumplan las exigencias expuestas a las áreas o elementos en los que no resultan teóricamente necesarios.

Se insiste en la importancia, claramente expuesta en la norma NCSE, de no permitir ninguna modificación en las calidades de proyecto de los materiales, y ello, con independencia de que el cambio conlleve una mejora de calidad.

## Artículo 53.º Elementos estructurales

### 53.1. Generalidades

En un esquema estructural convencional de barras unidas por sus extremos, las zonas disipativas se proyectarán situadas en las barras, toda vez que, en general, las uniones no admiten una deformación estable de valor suficiente como para disipar energía de forma significativa. Las uniones se situarán, en lo posible, alejadas de las zonas disipativas. Si ello no fuera posible, se proyectarán siguiendo planteamientos en capacidad, y con un factor adecuado de sobre-resistencia.

Se admite que los empalmes entre secciones idénticas, realizados mediante soldadura a tope de penetración total, presentan la suficiente sobre-resistencia sin necesidad de comprobación numérica.

## Comentarios

Un ejemplo claro de lo expuesto en el articulado viene dado por la unión entre tramos sucesivos de pilares, que conviene situar en una altura intermedia entre plantas al objeto de alejarla de la zona de disipación que, normalmente, se situará en los extremos de las vigas.

Las uniones que forzosamente se sitúen aledañas a una zona disipativa, (unión viga-pilar en el ejemplo anterior) se comprobarán frente a los momentos plásticos de las secciones unidas multiplicados por el factor de sobre-resistencia especificado en la norma NCSE-02.

### 53.2. Vigas

Las secciones de los elementos flectados cumplirán las prescripciones de NCSE respecto a simetría y clase.

Se comprobará el arriostamiento lateral de las vigas en condiciones de agotamiento.

Se comprobará que la capacidad a flexión en las zonas disipativas no sufre merma significativa por efecto del axil o cortante concomitantes. Para ello se utilizarán las expresiones:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5 \quad \text{donde: } V_{Ed} = V_{Ed,G} + V_{Ed,M}$$

Siendo:

$M_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$  y  $V_{Ed}$  los esfuerzos de cálculo.

$M_{pl,Rd}$ ,  $N_{pl,Rd}$ ,  $V_{pl,Rd}$  las resistencias de las secciones

$V_{Ed,G}$  los esfuerzos cortantes debidos a las acciones no sísmicas

$V_{Ed,M}$  los esfuerzos cortantes debidos a las acciones no sísmicas

En general será:

$$V_{Ed,M} = \frac{M_{pl,Rd,A} + M_{pl,Rd,B}}{L}$$

Donde el subíndice A, B se refiere a cada extremo de la viga y L es su luz (entre rótulas).

### 53.3. Soportes

Los soportes se comprobarán a compresión ante la combinación más desfavorable de esfuerzos axiales y flectores.

En la estimación de los momentos actuantes se considerarán los coeficientes de sobre-resistencia pertinentes.

### 53.4. Pórticos

Cuando la estructura se organice en pórticos éstos cumplirán las prescripciones establecidas en el Capítulo V, Análisis estructural, de la presente Instrucción y en apartado 4.6.4 de la norma NCSE.

Los únicos tipos de pórticos admisibles en estructuras situadas en zonas sísmicas son rígidos y arriostrados. No se admite el proyecto de pórticos semi-rígidos, duales o mixtos, que combinen las rigideces de sistemas resistentes diferentes.

En el caso de los pórticos arriostrados se adoptarán las medidas constructivas necesarias para que los elementos de la triangulación no soporten las cargas permanentes.

### Comentarios

En el contexto de la presente Instrucción se empleará la terminología indicada en la Figura 53.4.a y siguientes. Se define:

Pórtico rígido:

La rigidez ante acciones horizontales viene dada por la rigidez a flexión de vigas y pilares unidos mediante uniones de rigidez total. La disipación se produce por formación de rótulas plásticas en los extremos de las vigas y en la base de los pilares

Pórtico arriostrado. Triangulación completa:

La rigidez ante acciones horizontales viene dada por la rigidez ante esfuerzos axiales de las barras que forman la celosía. Como tipos particulares cabe señalar:

Triangulaciones de diagonales traccionadas:

Las diagonales se proyectan con una rigidez a flexión limitada que permite suponer que pandean cuando se someten a compresión. La estructura permanece estable con la única colaboración de las diagonales que, para cada sentido de actuación de las acciones horizontales, permanecen traccionadas. Es el caso de las triangulaciones en Cruz de San Andrés con diagonales formadas por angulares, redondos de pequeño diámetro, etc. Aunque no se consideren en proyecto, es conveniente acotar la esbeltez de las diagonales.

Triangulaciones de diagonales traccionadas y comprimidas:

Las diagonales se proyectan con una rigidez a flexión suficiente como para soportar un esfuerzo axial de compresión de valor significativo. Cuando el pandeo de las barras comprimidas implica la pérdida de estabilidad de la estructura (caso de los arriostramientos en V) la estructura no se considerará disipativa. En caso contrario (caso de los arriostramientos en X), la estructura puede considerarse disipativa

Pórtico con sistemas duales:

La rigidez ante acciones horizontales viene dada por la yuxtaposición de los sistemas rígido y arriostrado (Figura 53.4.b).

Pórtico con sistemas mixtos:

La rigidez ante acciones horizontales viene dada tanto por la rigidez a flexión de las barras como por la rigidez de los paños de fábrica, hormigón adecuadamente conectados a la estructura (Figura 53.4.b).

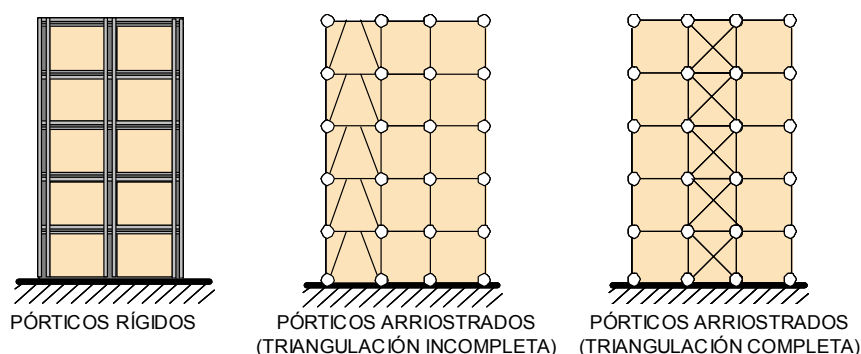


Figura 53.4.a

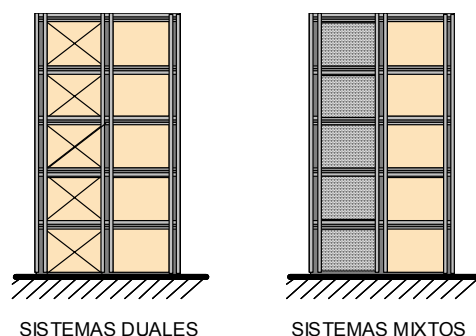


Figura 53.4.b

El no permitir el proyecto con pórticos semi-rígidos, mixtos o duales obedece a la dificultad de modelizar su comportamiento de forma segura. Así, en el caso de los pórticos duales es difícil asegurar la compatibilidad de ambos mecanismos resistentes, triangulación y resistencia a flexión. Normalmente, los recuadros triangulados son mucho más rígidos que los de nudos rígidos y no tienen la capacidad suficiente de deformación como para trabajar conjuntamente con ellos (las diagonales rompen sin haber alcanzado el alargamiento necesario para que el pórtico rígido entre en carga).

Naturalmente, lo anterior sólo es aplicable al caso de proyecto en régimen anelástico.

## Artículo 54.º Uniones

En el proyecto de las uniones, y especialmente en el caso de aquellas que se sitúen o limiten una zona de disipación, se evitarán aquellos detalles que:

- Producen efectos de concentración de tensiones (entallas geométricas o metalúrgicas) cuidando especialmente el acuerdo adecuado entre ángulos entrantes, el tamaño suficiente de las groetas, limitando al mínimo el cruce de cordones, etc.
- Requieren la existencia de deformaciones plásticas de valor elevado (por ejemplo, por conformado de elementos de espesor importante).
- Introduzcan tensiones residuales de valor elevado (cordones de soldadura de tamaño innecesariamente grande, coacciones durante el soldeo,...)
- Favorecen la aparición de fallos por desgarro laminar.
- Dificultan en exceso la ejecución y el control.

El empleo de uniones de elementos de pequeño espesor mediante tornillos autorroscantes y similares se limitará al proyecto de estructuras no dúctiles o bien a las situadas en zonas no disipativas.

En general, no se admitirá el proyecto de uniones semi-rígidas entre elementos que formen parte del esquema resistente a sismo.

En las zonas disipativas no se permitirá la existencia de elementos que transmitan esfuerzos en dirección del espesor.