

CAPÍTULO IV:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1. INTRODUCCIÓN AL COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS

4.1.1. Generalidades

La finalidad del análisis global de pórticos es obtener la distribución de los esfuerzos y los correspondientes desplazamientos de la estructura sometida a una carga dada. Para conseguir este propósito es necesario adoptar modelos adecuados, basados en varias suposiciones que incluyen tanto el comportamiento geométrico de la estructura y sus elementos como el comportamiento de las secciones y las uniones.

Una vez calculados los esfuerzos y los desplazamientos, es necesario realizar varias comprobaciones en la estructura y en sus componentes (elementos y uniones). Estas comprobaciones dependen del tipo de análisis realizado y del tipo de verificación de las secciones (es decir, el criterio de estado límite último) adoptado.

En general la comprobación ante cada EL se realiza en dos fases: determinación de los efectos de las acciones (esfuerzos y desplazamientos de la estructura) y comparación con los correspondientes estados límites. Son admisibles los siguientes procedimientos:

- 1) Los basados en métodos incrementales que, en régimen no lineal, adecuen las características elásticas de secciones y piezas al nivel de esfuerzos actuantes.
- 2) Los que se basan en métodos de cálculo en capacidad. Por ejemplo para el dimensionado de las uniones se puede partir no de los esfuerzos del análisis global sino de los máximos esfuerzos que les transmitan las piezas a conectar.

4.1.2. Concepto estructural

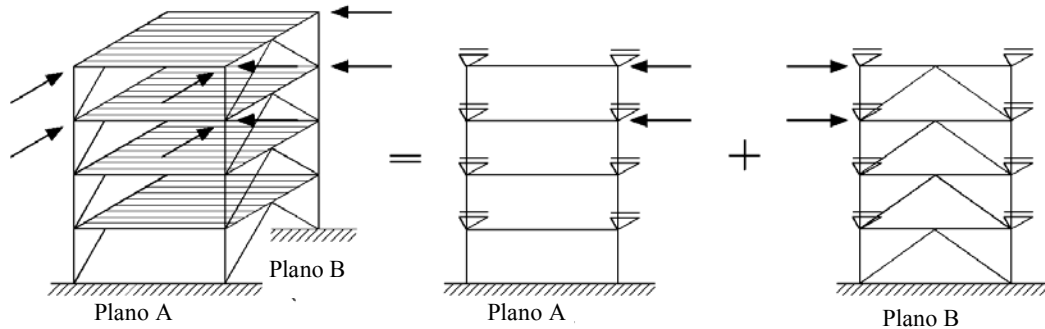
La forma de la estructura debe basarse en las funciones que vaya a desempeñar. Se precisa clasificar los elementos estructurales en categorías:

1. **Elementos principales:** incluyendo los pórticos principales, sus uniones y sus cimentaciones, que constituyen la vía para transmitir las cargas horizontales y verticales que actúan sobre el edificio al terreno.
2. **Elementos secundarios:** como vigas secundarias o correas, que transmiten las cargas a los elementos principales.
3. **Otros elementos:** elementos que sólo transmiten cargas a los elementos principales o secundarios. Por ejemplo, cierres, cubiertas, tabiques divisorios, etc.

En los casos donde las tres categorías de elementos estén sujetas a diferentes requisitos de seguridad, deberán modelizarse de forma separada si fuera necesario.

4.1.3. Comportamiento espacial

Una alternativa al análisis de la estructura principal como un pórtico tridimensional puede ser el análisis como dos series de pórticos planos independientes trabajando en dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí, como se muestra en la figura, siempre que cada pórtico plano tenga suficiente arriostramiento en dirección transversal al propio plano para asegurar su estabilidad lateral.



4.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

4.2.1. Hipótesis

El análisis se lleva a cabo de acuerdo con hipótesis simplificadoras mediante modelos, congruentes entre sí, adecuados al estado límite a comprobar y de diferente nivel de detalle, que permitan obtener esfuerzos y desplazamientos en las piezas de la estructura y en sus uniones entre sí y con los cimientos. Se tendrá en cuenta que:

1. Los elementos y uniones deben ser modelizados para el análisis global de forma que reproduzcan propiamente el comportamiento previsto bajo la carga pertinente.
2. La geometría básica del pórtico debe ser representada por los ejes de las piezas.
3. En general es suficiente representar las piezas mediante elementos lineales situados en sus ejes, sin tener en cuenta el solapamiento debido al ancho real de las piezas.
4. Alternativamente, se puede considerar en los nudos el ancho de todas o algunas piezas que confluyan.

En las comprobaciones frente a ELS se utilizarán normalmente modelos elásticos y lineales. Para los ELU se podrán emplear modelos elásticos o cualquier procedimiento que dé como resultado un conjunto de esfuerzos en equilibrio con las acciones consideradas para la clase de sección transversal que se disponga en las piezas.

En todos los casos es necesario considerar el efecto de las posibles no linealidades de tipo geométrico o de otro tipo.

4.2.2. Modelos de piezas

1. Las piezas de acero se representarán mediante modelos uni o bidimensionales de acuerdo a sus dimensiones relativas. Si la relación entre las dos dimensiones fundamentales de la pieza es ≤ 2 , deberán usarse modelos bidimensionales.
2. Las luces de cálculo de las piezas unidimensionales serán las distancias entre ejes de enlace. En piezas formando parte de entramados o pórticos estos ejes coinciden con las intersecciones de la directriz de la pieza con las de las adyacentes. En piezas embutidas en apoyos rígidos de dimensión importante en relación con su canto, puede situarse idealmente el eje en el interior del apoyo a medio canto de distancia respecto del borde libre.
3. En el análisis global de la estructura las piezas se representarán considerando sus secciones brutas, salvo en secciones de clase 4.
4. La rigidez en torsión de las piezas puede ser ignorada en el análisis en los casos en que no resulte imprescindible para el equilibrio.

4.2.2. Modelos de uniones

1. Los modelos de enlace entre dos o más piezas deben representar adecuadamente la geometría, la resistencia y la rigidez de la unión.
2. Según su resistencia, las uniones pueden ser articulaciones, de resistencia total o de resistencia parcial.
3. Según su rigidez, las uniones pueden ser articuladas, rígidas o semirrígidas, según que su rigidez a la rotación sea nula, total o intermedia.
4. Los métodos de análisis global utilizados y las hipótesis adoptadas respecto al comportamiento de las uniones deben ser coherentes. De modo que cuando se lleve a cabo un análisis global elástico se considerará el comportamiento de la unión solo en función de su rigidez. Si se realiza un análisis global elastoplástico se deberá considerar el comportamiento de la unión según su resistencia y rigidez y en caso de llevar a cabo un análisis global rígido-plástico, para modelar el comportamiento de las uniones bastará considerar su resistencia.
5. Las uniones semirrígidas entre cada dos barras se podrán modelar como un resorte que une los ejes de las barras que concurren en el nudo.

4.3. IMPERFECCIONES A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS

Cuando la rigidez de la estructura frente a las acciones horizontales no esté garantizada será necesario llevar a cabo un análisis en 2º orden que tenga en cuenta su deformación y la influencia de ésta en los esfuerzos, en lugar del simple análisis en primer orden que considera la estructura en su posición inicial (sin influencia de las deformaciones). Además el análisis de 2º orden de las estructuras reales debe considerar los efectos de las tensiones residuales sobre la respuesta no lineal de los materiales, las inevitables imperfecciones geométricas, las excentricidades y los defectos de fabricación y montaje

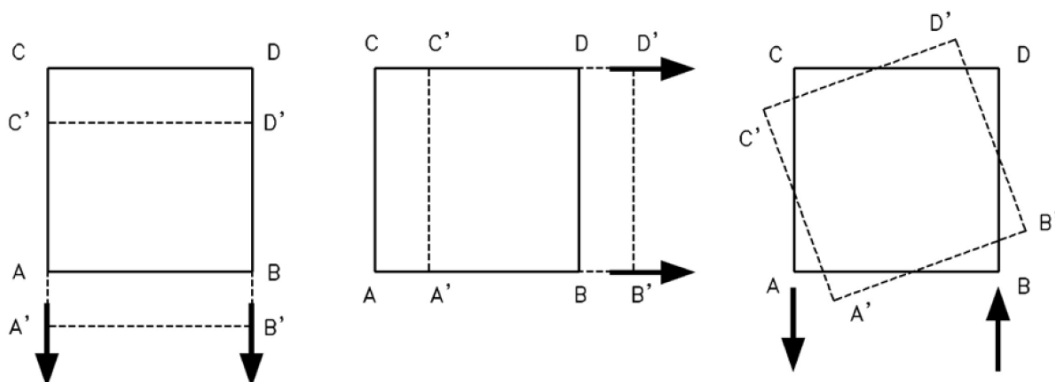
En general, estos efectos se incorporan en los análisis estructurales adoptando unas imperfecciones geométricas equivalentes. Concretamente se deben considerar:

1. Imperfecciones globales de la estructura en el análisis global de estructuras.
2. Imperfecciones en el análisis de los sistemas de arriostramiento.
3. Imperfecciones en el análisis local de los elementos aislados.

Estas imperfecciones serán incluidas en los análisis estructurales para el control de los ELU, no afectando, en cambio, a los controles de los ELS. El uso de imperfecciones geométricas equivalentes permite, en la mayoría de los casos, resolver con suficiente aproximación el problema de la inestabilidad global de estructuras y/o elementos, sin recurrir al método general de análisis no lineal en teoría de 2º orden. Si se considera más conveniente, las imperfecciones geométricas equivalentes pueden sustituirse por fuerzas equivalentes, transversales a la directriz de los elementos comprimidos.

4.3.1. Imperfecciones en el análisis global de la estructura

La geometría del modelo de cálculo deberá ser el resultado de incorporar a la geometría teórica de la estructura, las imperfecciones geométricas equivalentes, establecidas de forma que produzcan los efectos más desfavorables. En general, es necesario estudiar la posibilidad de pandeo global de la estructura en su plano y fuera de él, aunque de forma no simultánea. Además En aquellas estructuras de baja rigidez global torsional será, asimismo, necesario controlar la posibilidad de un pandeo generalizado por torsión, asimétrico, como consecuencia de aplicar las imperfecciones en sentido contrario sobre dos caras opuestas de la estructura.



Posibles formas de inestabilidad, por translación o torsión, de una estructura

Para obtener las imperfecciones laterales globales equivalentes de una estructura porticada se considera un desplome lineal en altura dado por:

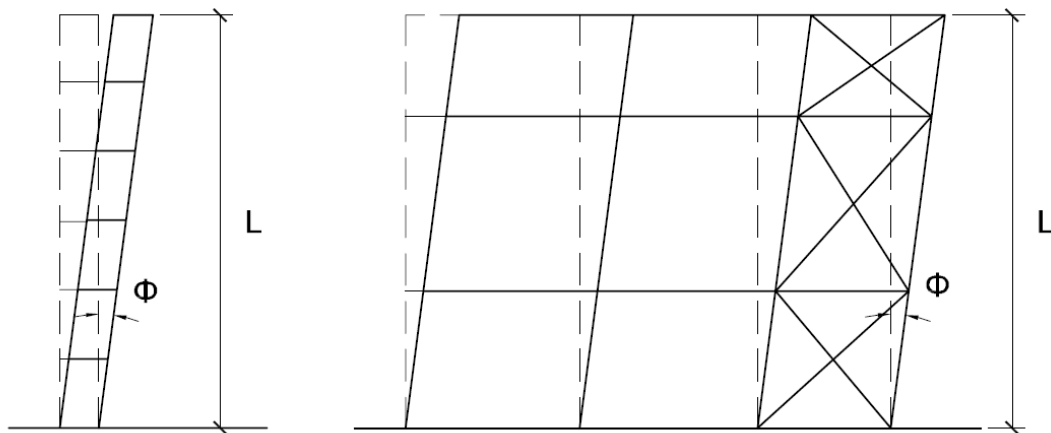
$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi_0 = \frac{1}{200} \\ \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{con} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0 \\ \alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \end{array} \right.$$

siendo:

ϕ_0 Valor de base de la imperfección lateral: $\phi_0 = 1/200$

α_h Coeficiente reductor para la altura 'h' (en metros) de la estructura

α_m Coeficiente reductor para el número de alineaciones, 'm', de pilares comprimidos
En 'm' sólo se contabilizan los elementos solicitados por una compresión, $N_{Ed} \geq 50\%$ de la media por elemento, en el plano de pandeo e hipótesis de carga considerados.



En estructuras porticadas de edificación, la imperfección lateral global ϕ podrá omitirse, para una cierta hipótesis de carga y modo de pandeo, si se verifica

$$\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \geq 0,15,$$

siendo:

H_{Ed} Suma de las acciones horizontales solicitantes, incluyendo las fuerzas horizontales equivalentes de las imperfecciones geométricas globales.

V_{Ed} Resultante de las acciones verticales totales, en la base del edificio.

Planteamiento del CT-DB-SE-A

Para estructuras porticadas es suficiente a efectos de estabilidad tomar un desplome lineal en altura, de valor $L/200$, en cada dirección analizada, si en esa dirección hay sólo dos soportes y una altura, y un desplome de $L/400$ si hay al menos cuatro soportes y tres alturas. Para situaciones intermedias puede tomarse el valor $L/300$, siendo L la altura total del edificio si es constante, y la altura media si es ligeramente variable.

4.3.2. Imperfecciones de los elementos para el análisis global

En el análisis de la inestabilidad global de las estructuras traslacionales, deberá ser considerada, además de la imperfección global de la estructura asociada al desplome, la influencia de las imperfecciones a nivel local de las barras cuando éstas sean esbeltas y se cumplan las dos condiciones siguientes:

1. Que al menos uno de los dos nudos extremos del elemento no se pueda considerar como articulado.
2. Que su esbeltez adimensional, en el plano de pandeo considerado, calculada como barra biarticulada en sus extremos, sea tal que:

$$\bar{\lambda} > 0,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} \quad \text{siendo} \quad \begin{cases} \bar{\lambda} & \text{Esbeltez adimensional del elemento en el plano} \\ N_{Ed} & \text{Valor de cálculo de la compresión del elemento} \end{cases}$$

Esta condición equivale a que el axil de cálculo del elemento, N_{Ed} , para la hipótesis de carga analizada sea superior al 25% de su carga crítica de Euler, N_{cr} . En dichos casos puede adoptarse una curvatura inicial equivalente en los elementos comprimidos afectados, con forma parabólica de segundo grado y una flecha máxima e_0 , tal que:

Tipo de curva de pandeo	Método de análisis global de la estructura	
	Análisis global elástico	Análisis global plástico
	e_0	e_0
a_0	$L/350$	$L/300$
a	$L/300$	$L/250$
b	$L/250$	$L/200$
c	$L/200$	$L/150$
d	$L/150$	$L/100$

donde L es la longitud del elemento.

Planteamiento del CT-DB-SE-A

Cuando algún pilar presente un coeficiente de reducción por pandeo, χ menor de 0,85 el modelo de pórtico deberá incluir las imperfecciones locales de dichos pilares además de las globales. Las imperfecciones locales serán de forma senoidal y amplitud e_0 relativa a la longitud indicada en la tabla 5.8 del CT. En estos casos el pandeo de los pilares para el plano considerado queda ya representado en el modelo global.

Tabla 5.8 Imperfecciones locales de barra, e_0/L

Curva de pandeo (según figura 6.3)	a_0	a	b	c	d
Análisis global elástico	1/350	1/300	1/250	1/200	1/150
Análisis global plástico	1/300	1/250	1/200	1/150	1/100

4.3.3. Sistema de fuerzas equivalentes a las imperfecciones

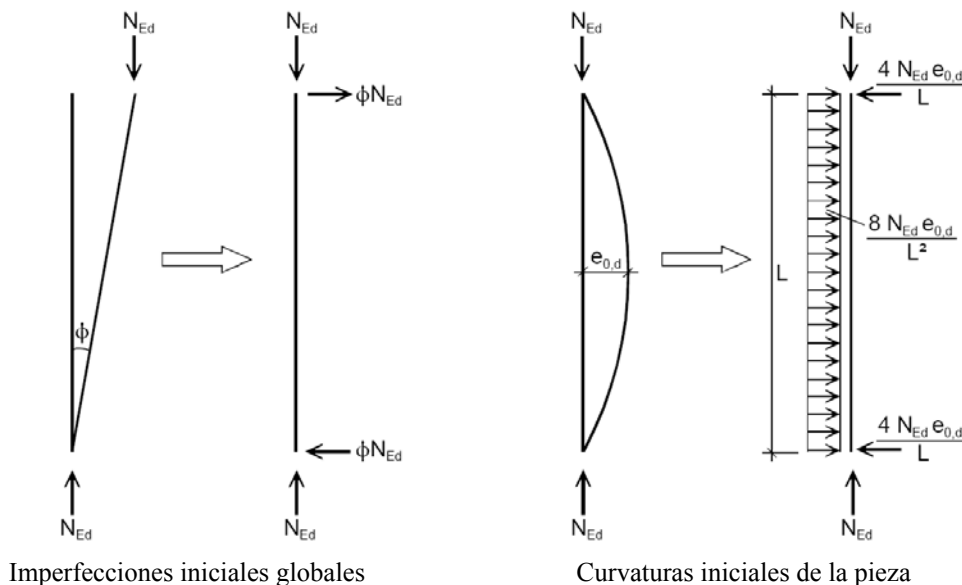
Los efectos de las imperfecciones laterales globales y de las curvaturas iniciales en los elementos comprimidos pueden asimilarse a unos sistemas de fuerzas transversales autoequilibradas equivalentes, proporcionales a las cargas verticales aplicadas en la hipótesis de carga correspondiente, y estimadas como sigue para cada elemento:

* Para el caso de defectos iniciales de desplome de elementos comprimidos:

$$H_{td} = \phi N_{Ed}$$

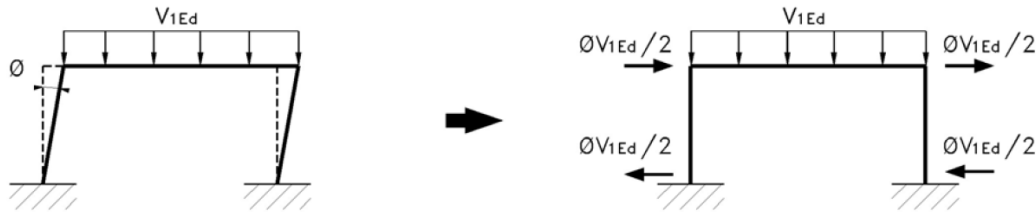
* Para curvaturas iniciales en piezas comprimidas cuando haya que considerarlas

$$q_{td} = \frac{8 \cdot N_{Ed} \cdot e_{0,d}}{L^2}; \quad H_{td} = \frac{4 \cdot N_{Ed} \cdot e_{0,d}}{L}$$

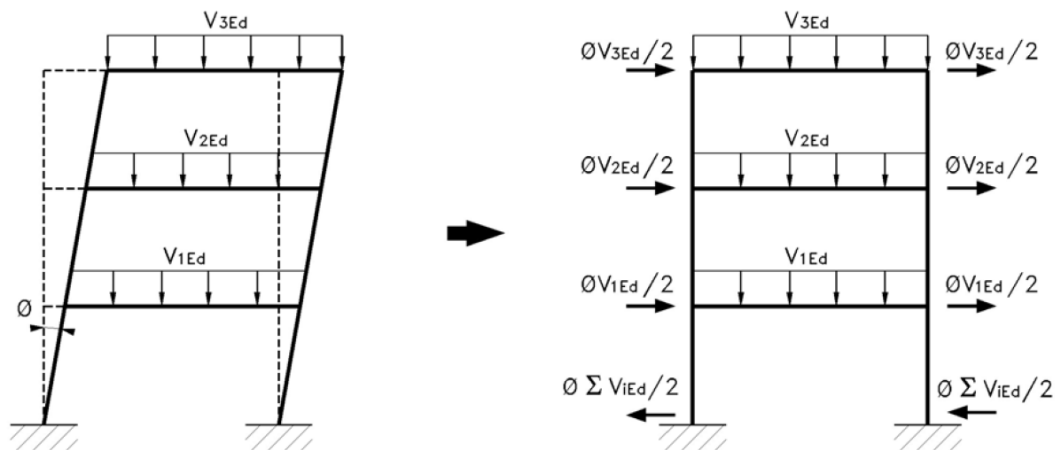


Ejemplos:*1. Pórtico de edificación de una altura*

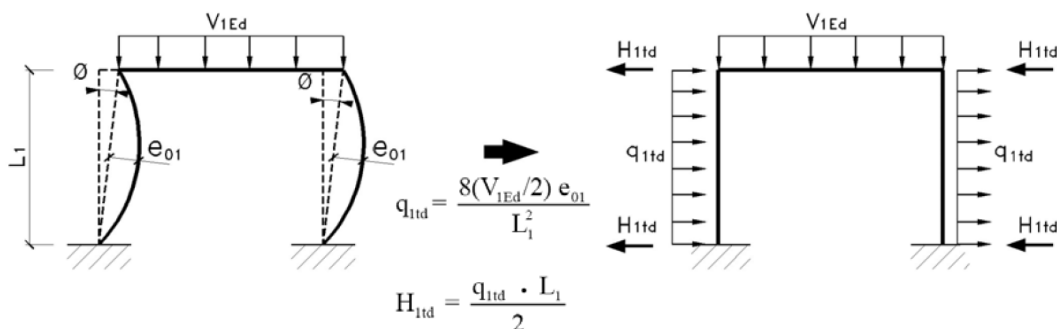
Las dos fuerzas transversales equivalentes por defectos de verticalidad ($\phi V_{1Ed}/2$) se aplican a la altura del dintel y son proporcionales a la carga vertical V_{1Ed} sobre el dintel.

*2. Pórtico de edificación de varias plantas*

Las dos fuerzas transversales equivalentes ($\phi V_{iEd}/2$) se aplican en los nudos de cada nivel de forjado de piso y de cubierta, resultando proporcionales al valor de las cargas verticales V_{iEd} aplicadas sobre la estructura en dicho nivel.

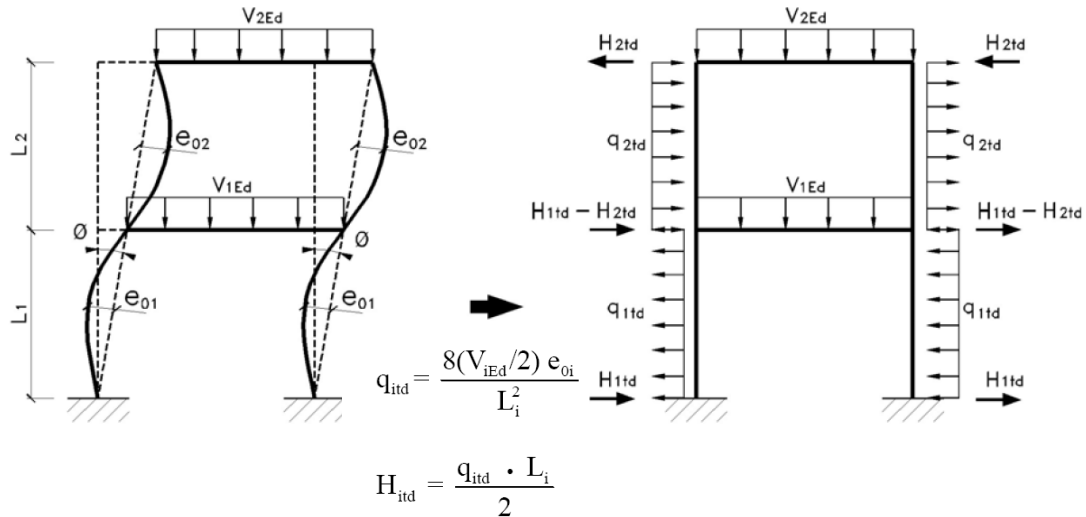
*3. Fuerzas equivalentes a las curvaturas iniciales en pórtico de una planta*

Cuando haya que considerarlas, se aplicarán de acuerdo con la deformada principal de pandeo correspondiente a la hipótesis de carga analizada.



4. Fuerzas equivalentes a las curvaturas iniciales en porticos de varias plantas

Cuando haya que considerarlas, se aplicarán para cada elemento de acuerdo con la deformada principal de pandeo en cada piso correspondiente a la hipótesis de carga analizada. Téngase en cuenta la deformada en sintonía para los pisos adyacentes.



4.3.4. Imperfecciones en el análisis de sistemas de arriostramiento

Los efectos de las imperfecciones también deben incorporarse en el análisis de los sistemas de arriostramiento que se utilizan para asegurar la estabilidad lateral de las piezas sometidas a flexión o compresión. Se asumirá que la pieza a estabilizar presenta una curvatura inicial equivalente e_0

$$e_0 = \alpha_m \cdot \frac{L}{500}$$

siendo

L Luz del sistema de arriostramiento.

α_m Coeficiente reductor del número de elementos a considerar. Puede estimarse según:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad \text{en donde } m \text{ es el número de piezas a arriostrar.}$$

4.3.5. Sistema de fuerzas equivalentes sobre los arriostramientos

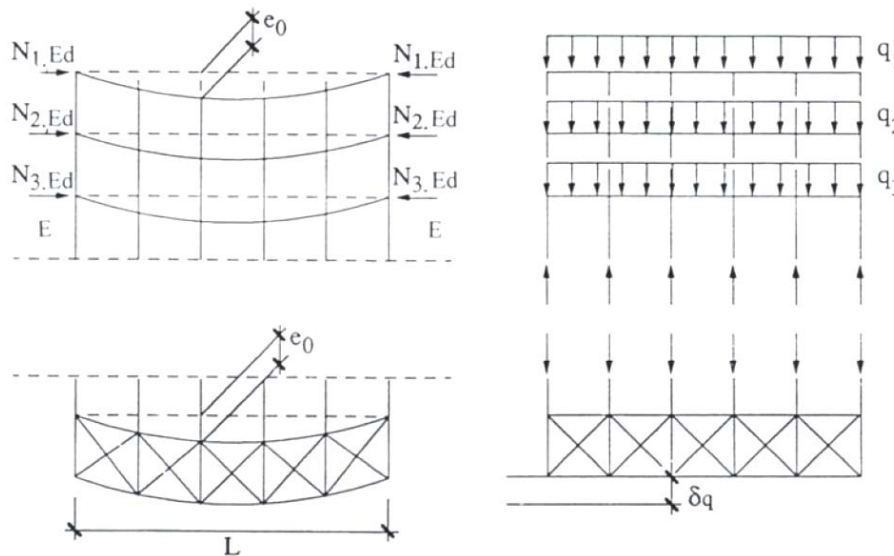
Los efectos de las imperfecciones presentes en las piezas a estabilizar, pueden sustituirse por un sistema de fuerzas equivalentes de estabilización de valor:

$$q = \sum N_{Ed} \cdot 8 \cdot \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}$$

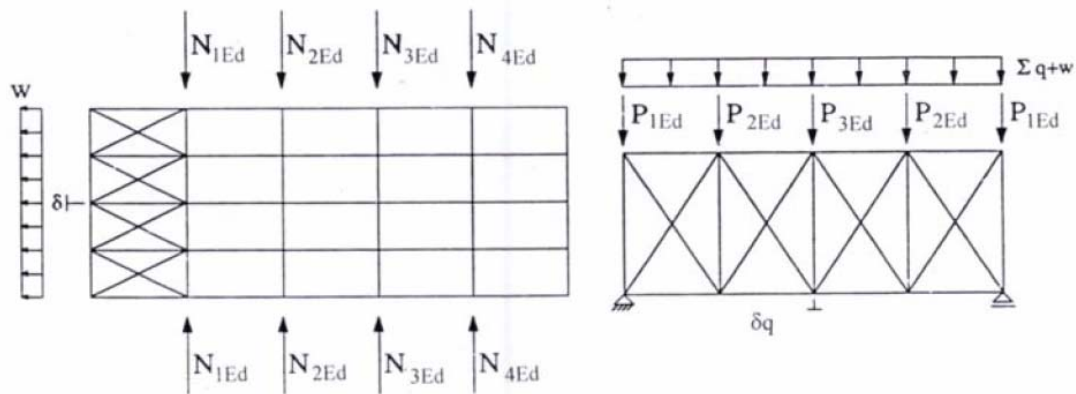
siendo

δ_q Flecha del sistema de arriostramiento obtenida tras un proceso iterativo a partir de un cálculo elástico en primer orden bajo la acción de las fuerzas q y de las eventuales acciones exteriores que solicitan al arriostramiento.

N_{Ed} Valor máximo del esfuerzo normal que solicita cada pieza a estabilizar, supuesto uniforme sobre la longitud L del sistema de arriostramiento. En el caso de esfuerzos no uniformes, esta hipótesis queda del lado de la seguridad.



Imperfecciones sobre el sistema de arriostramiento



Fuerzas equivalentes incluyendo acciones exteriores

En el análisis de la estabilidad lateral de los cordones comprimidos de piezas sometidas a flexión, la fuerza axial a considerar en las expresiones anteriores será: $N_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h}$ siendo M_{Ed} el momento de cálculo actuando sobre la viga y h el canto de la viga.

En piezas de sección constante, M_{Ed} será el momento en la sección más solicitada.

En piezas de sección variable se adoptará el N_{Ed} correspondiente a la sección en la que el cociente M_{Ed}/h sea máximo.

Planteamiento del CT-DB-SE-A

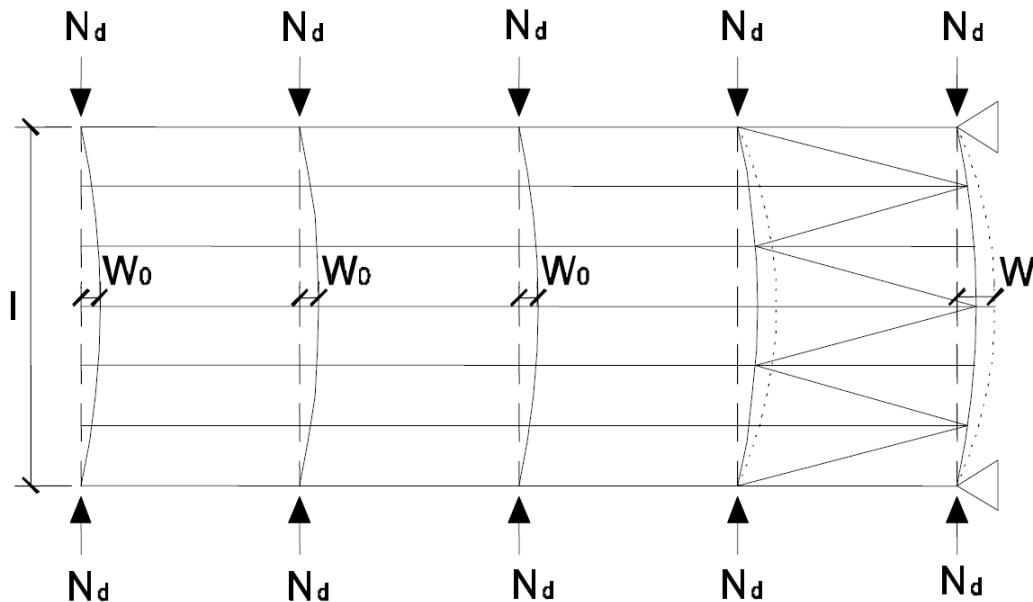
En los cálculos relativos a los elementos de arriostramiento de estructuras porticadas, se deberá tener en cuenta la inclinación inicial ϕ para todos los pilares que deban ser estabilizados por dichos elementos. Cuando la estabilidad se asegure por medio de vigas o triangulaciones que enlazan las piezas comprimidas con determinados puntos fijos, las fuerzas laterales que se deberán tener en cuenta en los cálculos se obtienen a partir de flecha inicial w_0 en las piezas a estabilizar. Además, también se tendrán en cuenta las imperfecciones de los propios arriostramientos. La flecha inicial w_0 se obtiene de:

$$w_0 = \frac{L}{500} \cdot k_r \leq 60mm$$

$$k_r = \sqrt{0,2 + \frac{1}{n_r}} \leq 1$$

n_r : número de elementos a estabilizar

Las fuerzas laterales debidas a N_{Ed} y w_0 pueden incrementarse de manera sustancial por las imprecisiones de ejecución y la deformación w del sistema de arriostramiento.



Cada elemento de arriostramiento de un cordón comprimido o pieza comprimida, deberá dimensionarse para que sea capaz de resistir una fuerza lateral equivalente al 1,5% de la máxima compresión que solicite a la pieza o cordón a estabilizar.

4.4. ESTABILIDAD LATERAL DE LAS ESTRUCTURAS

4.4.1. Efectos de la geometría deformada de la estructura

Los esfuerzos en los elementos de una estructura se pueden obtener mediante un análisis en primer orden, lo que implica utilizar la geometría inicial de la estructura (no deformada) o bien un análisis en segundo orden teniendo en cuenta la deformación de la estructura y su influencia en los esfuerzos cuando sea significativa.

La magnitud de la influencia de los efectos de segundo orden en la respuesta estructural depende básicamente de su rigidez lateral. Por ello el edificio debe disponer de los elementos necesarios para materializar una trayectoria clara de las fuerzas horizontales, de cualquier dirección en planta, hasta la cimentación. El control de la estabilidad lateral de una estructura suele, en general, garantizarse por medio de:

1. La propia rigidez de los sistemas estructurales de nudos rígidos
2. Sistemas de arriostramiento lateral triangulados
3. Sistemas de arriostramiento lateral mediante pantallas o núcleos rígidos
4. Por combinación de algunos de los esquemas estructurales precedentes

siempre y cuando se den las condiciones:

1. Sean bien proyectados considerando su trabajo en conjunto, mediante una adecuada interacción con la estructura principal y su conexión a la cimentación.
2. Se asegure la permanencia durante el periodo de servicio del edificio
3. Se considere los posibles esfuerzos que el sistema de arriostramiento puede generar sobre la estructura al coaccionar su libre deformación.
4. Se asegure la resistencia de los medios de conexión a la estructura.

Los elementos del esquema resistente de arriostramiento se diseñaran con la resistencia adecuada a los esfuerzos, y con la rigidez suficiente para satisfacer los estados límites de servicio establecidos y garantizar cuando sea necesario la intraslacionalidad.

4.4.2. Clasificación de estructuras intraslacionales y traslacionales

Una estructura puede clasificarse como intraslacional cuando su rigidez lateral es suficiente para que la influencia de los efectos de segundo orden sea despreciable en su respuesta estructural. De este modo el análisis global puede llevarse a cabo según la teoría de primer orden. Una estructura se considera **intraslacional** si se cumple:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad (\text{Análisis elástico}); \quad \alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \quad (\text{Análisis plástico})$$

siendo:

F_{cr} Carga vertical total crítica elástica, de pandeo global basada en la rigidez inicial.

F_{Ed} Carga vertical total de cálculo que actúa sobre la estructura

α_{cr} Factor de amplificación a multiplicar la configuración de cargas de cálculo para provocar la inestabilidad elástica en el modo de pandeo global considerado.

*Simplificación para estructuras porticadas

En el caso particular de pórticos de una altura con dinteles planos, o de poca pendiente, así como el caso de estructuras aporticadas planas de edificación, con nudos rígidos, el criterio de intraslacionalidad anterior puede suponerse satisfecho si se verifica en cada planta. El factor de amplificación α_{cr} se obtiene para cada planta a partir de:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \cdot \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)$$

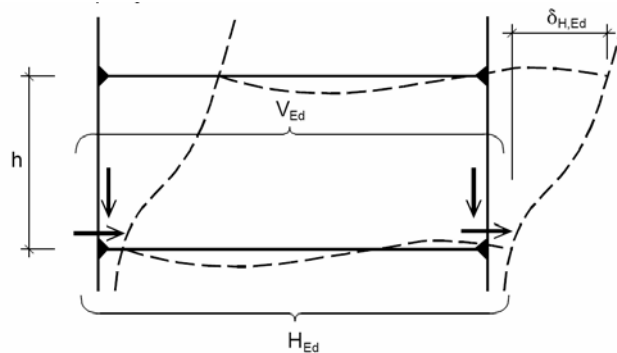
siendo:

H_{Ed} Fuerza horizontal total, estimada en el nivel inferior de cada planta, resultante de cargas horizontales por encima de ese nivel, incluyendo efectos de imperfecciones.

V_{Ed} Fuerza vertical total, estimada en el nivel inferior de cada planta, resultante de cargas verticales por encima de ese nivel.

h Altura de la planta considerada.

$\delta_{H,Ed}$ Desplazamiento horizontal relativo entre el nivel superior e inferior de la planta, bajo la acción de las cargas y de las acciones equivalentes de las imperfecciones.



La aplicación del criterio simplificado supone que:

1. La estructura tiene vigas conectando todos los pilares en cada planta.
2. En pórticos con dinteles inclinados, la pendiente no supera a 1:2 (26°).
3. El esfuerzo de compresión en dinteles, sea pequeño, tal que:

$$\bar{\lambda} < 0,3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} \quad \text{esta condición equivale a que se cumpla } N_{cr} > 11,11 \cdot N_{Ed}$$

4. El control de la intraslacionalidad se llevará a cabo para todas las hipótesis.

4.4.3. Clasificación de estructuras arriostradas y no arriostradas

Una estructura puede clasificarse como arriostrada cuando su rigidez lateral está garantizada a través de un sistema de arriostramiento que permita despreciar la influencia de los efectos de segundo orden en su respuesta estructural y por tanto su análisis global puede llevarse a cabo según la teoría en primer orden.

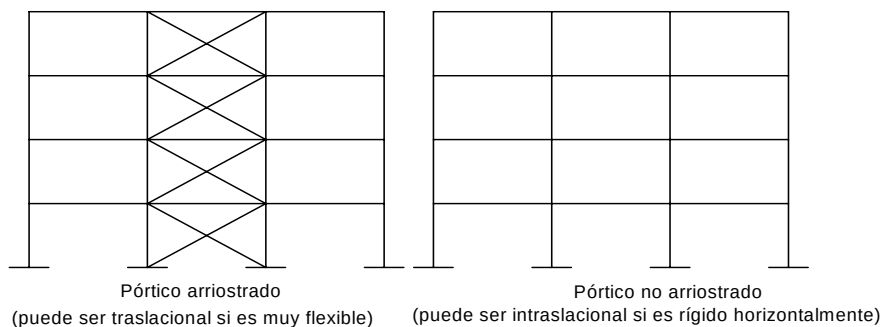
Cuando un sistema de arriostramiento rigidiza varias estructuras, o subestructuras, la aplicación de los criterios de intraslacionalidad deberá hacerse de modo simultáneo para el arriostramiento vinculado a todas las estructuras arriostradas por él.

El sistema de arriostramiento deberá dimensionarse para hacer frente a:

1. Los efectos de las imperfecciones tanto del propio sistema de arriostramiento como de todas las estructuras a las que arriostra.
2. Las fuerzas horizontales que soliciten a las estructuras a las que arriostra.
3. Las fuerzas horizontales y verticales que actúan directamente sobre el propio sistema de arriostramiento.

Planteamiento del CT-DB-SE-A

Se dice que una **estructura está arriostrada** de manera eficaz en una dirección cuando el esquema resistente frente a las acciones horizontales se base en sistemas triangulados o en pantallas o núcleos de hormigón que aportan al menos el 80% de la rigidez frente a los desplazamientos horizontales en dicha dirección. En este caso es admisible suponer que todas las acciones horizontales son resistidas exclusivamente por el sistema de arriostramiento y, además, considerar la estructura como **intraslacional**.



No debemos asociar siempre el concepto de arriostramiento con el de intraslacionalidad dado que se puede dar una estructura arriostrada tal que el sistema de arriostramiento no proporcione la rigidez suficiente frente a las cargas horizontales y que sea por tanto traslacional. De modo inverso podríamos encontrarnos un pórtico sin arriostramiento pero con suficiente rigidez horizontal para ser considerado como intraslacional.

Análisis de traslacionalidad según el CT-DB-SE-A

Un modo de evaluar la influencia de los desplazamientos en la distribución de esfuerzos y, por tanto, de caracterizar la condición de **traslacionalidad**, aplicable a estructuras de pórticos planos, consiste en realizar un primer análisis en régimen elástico lineal y obtener, para cada planta, el coeficiente r (coeficiente inverso de α_{cri})

$$r = \frac{V_{Ed}}{H_{Ed}} \cdot \frac{\delta_{H,d}}{h}$$

siendo

H_{Ed} Valor de cálculo de las cargas horizontales totales (incluyendo las debidas a imperfecciones) en la planta considerada y en todas las superiores. Este valor coincide con el cortante total en los pilares de la planta

V_{Ed} Valor de cálculo de las cargas verticales totales en la planta considerada y en todas las superiores. Este valor coincide con el axil total en los pilares de la planta

h Altura de la planta

$\delta_{H,d}$ Desplazamiento horizontal relativo de la planta (del forjado de techo al de suelo)

Si en alguna de las plantas resultase $r > 0,1$, la estructura debe considerarse traslacional y, entonces, el análisis global de la estructura deberá considerar los efectos de los desplazamientos en alguna de las formas siguientes:

1. Análisis en segundo orden. Para el dimensionado posterior de los pilares se tomarán como longitudes de pandeo las correspondientes al modo intraslacional.
2. Análisis elástico y lineal pero multiplicando todas las acciones horizontales sobre el edificio por el coeficiente de amplificación: $\frac{1}{1-r}$. Opción válida si $r < 0,33$.

Para el dimensionado de los pilares se tomarán como longitudes de pandeo las correspondientes al modo intraslacional. Las reacciones en la cimentación se obtendrán a partir del citado modelo reduciendo las componentes de fuerza horizontal en el valor del coeficiente de amplificación, de modo que resulten equivalentes a la resultante horizontal de las acciones de cálculo no amplificadas.

4.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

4.5.1. Principios básicos

En toda estructura con rigidez lateral insuficiente para ser considerada intraslacional o arriostrada, en base a los criterios establecidos previamente, deberá ser verificada su estabilidad lateral global, según métodos que consideren tanto los efectos de segundo orden como las imperfecciones geométricas equivalentes, definidas con anterioridad.

En función del tipo de estructura y del método de análisis global a realizar, el modo de considerar los efectos de segundo orden y de las imperfecciones puede abordarse por alguno de los métodos siguientes:

1. Análisis global en segundo orden considerando imperfecciones iniciales globales y en la geometría de las piezas. En este caso en las comprobaciones de resistencia de las piezas no se considerarán los efectos de pandeo ya incluidos en el modelo.
2. Análisis global en segundo orden considerando sólo las imperfecciones iniciales globales, seguido de un control de los efectos de la inestabilidad en los elementos comprimidos aislados. En este caso en las comprobaciones de resistencia individual de las piezas se considerarán los efectos de pandeo en la pieza aislada.

Hay que tener presente que la verificación de la estabilidad lateral global de una estructura no exime del control de la misma según eventuales modos de inestabilidad intraslacionales, ya que, en algunos casos, los esfuerzos en ciertos elementos (soportes o dinteles) pueden ser superiores a las solicitaciones según modos de inestabilidad traslacionales. Por ello, cualquier pieza comprimida (soporte o dintel) deberá siempre controlarse ante su posible pandeo local, tanto en el plano de la estructura como en el normal al mismo, considerando adecuadamente las vinculaciones en ambos extremos del elemento, y los posibles efectos no lineales de la traslacionalidad de la estructura.

4.5.2. Análisis global elástico

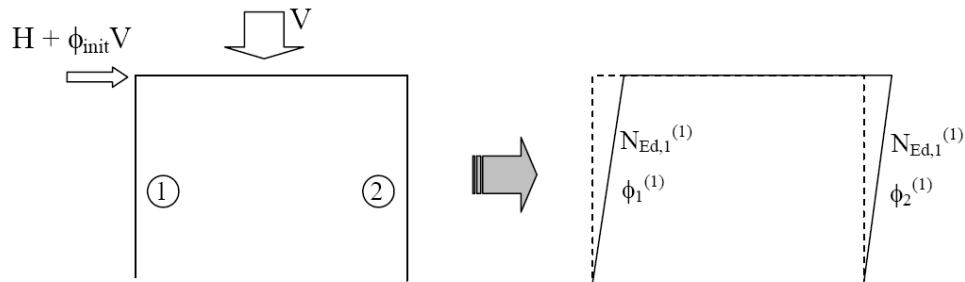
Los análisis elásticos en segundo orden, bajo la acción de las cargas exteriores y las imperfecciones geométricas equivalentes, son aplicables a cualquier tipo de estructura traslacional. En general son métodos iterativos que incorporan los efectos de 2º orden, a través de la actualización paso a paso de la geometría de la estructura deformada. Los pasos de cálculo del método iterativo pueden resumirse de la forma siguiente:

- 1) Realizar un análisis elástico de 1º orden del pórtico con las cargas aplicadas ($V+H$) y las imperfecciones laterales iniciales ($\phi_{init} \cdot V$), si son relevantes. Del análisis se obtienen la fuerza de compresión $N_{Ed,i}^{(1)}$ y ángulo de traslación $\phi_i^{(1)}$ para cada pieza comprimida.

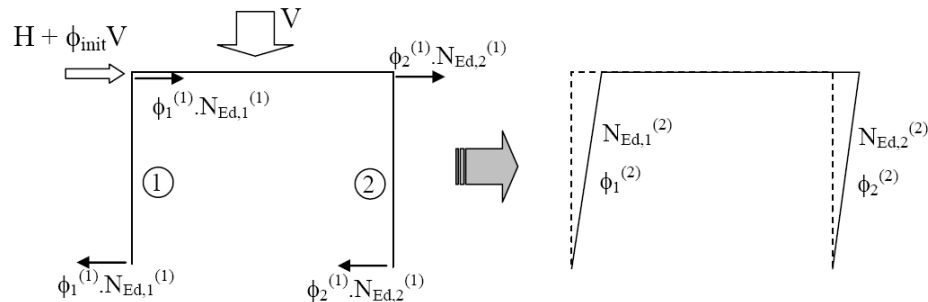
- 2) Obtener las fuerzas opuestas ($\phi_i^{(1)} \cdot N_{Ed,i}^{(1)}$) para cada pieza comprimida, que deben aplicarse en las direcciones que amplifican los ángulos de desplazamiento lateral.
- 3) Realizar un nuevo análisis elástico de 1º orden del pórtico, con todas las fuerzas aplicadas ($V+H$), las imperfecciones laterales iniciales ($\phi_{init} \cdot V$) si fuesen relevantes, y todas las fuerzas traslacionales ($\phi_i^{(1)} \cdot N_{Ed,i}^{(1)}$) aplicadas en los extremos de cada pieza comprimida. Los resultados que se deben considerar del análisis son: la fuerza de compresión $N_{Ed,i}^{(2)}$ y ángulo de traslación $\phi_i^{(2)}$ para cada pieza comprimida.
- 4) Volver al paso 2) hasta lograr la convergencia de los desplazamientos $\phi_i^{(n)} \approx \phi_i^{(n-1)}$

Generalmente, son suficientes 3 iteraciones, para alcanzar una convergencia bastante aceptable. Al final del proceso, las fuerzas y los momentos internos, así como los desplazamientos, se pueden considerar como los obtenidos del análisis de 2ºorden.

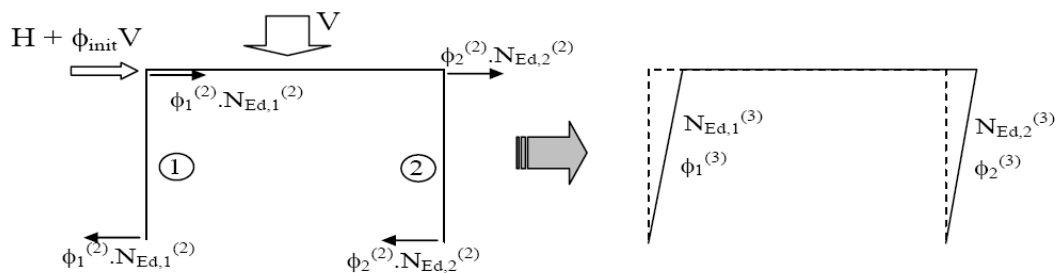
Iteración 1



Iteración 2



Iteración 3



Método del momento traslacional amplificado

De modo alternativo puede realizarse un análisis elástico en 1º orden, con las acciones exteriores y las imperfecciones geométricas equivalentes, amplificando los esfuerzos debidos estrictamente a la deformación lateral, por el coeficiente siguiente:

$$\left(\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \right) \quad \boxed{\text{En el CT: } \frac{1}{1-r} \cdot \text{Válida si } r < 0,33}$$

siendo:

α_{cr} Factor de amplificación a multiplicar la configuración de cargas de cálculo para provocar la inestabilidad elástica en el modo de pandeo global considerado.

Este método simplificado sólo resulta aplicable a:

1. Pórticos de edificación de una sola planta, si se cumple que $\alpha_{cr} \geq 3,0$.
2. Pórticos regulares de edificación de varias plantas, si $\alpha_{cr} \geq 3,0$ y todas las plantas presentan condiciones similares de:
 - Distribución de cargas verticales
 - Distribución de cargas horizontales
 - Rigideces laterales de pórtico en relación a las acciones horizontales

También se puede proceder a amplificar por el mencionado coeficiente las acciones horizontales (p.e. las debidas al viento) y las cargas horizontales equivalentes ϕV_{Ed} debidas a las imperfecciones laterales y obtener los esfuerzos finales ya amplificados.

4.5.3. Análisis global plástico

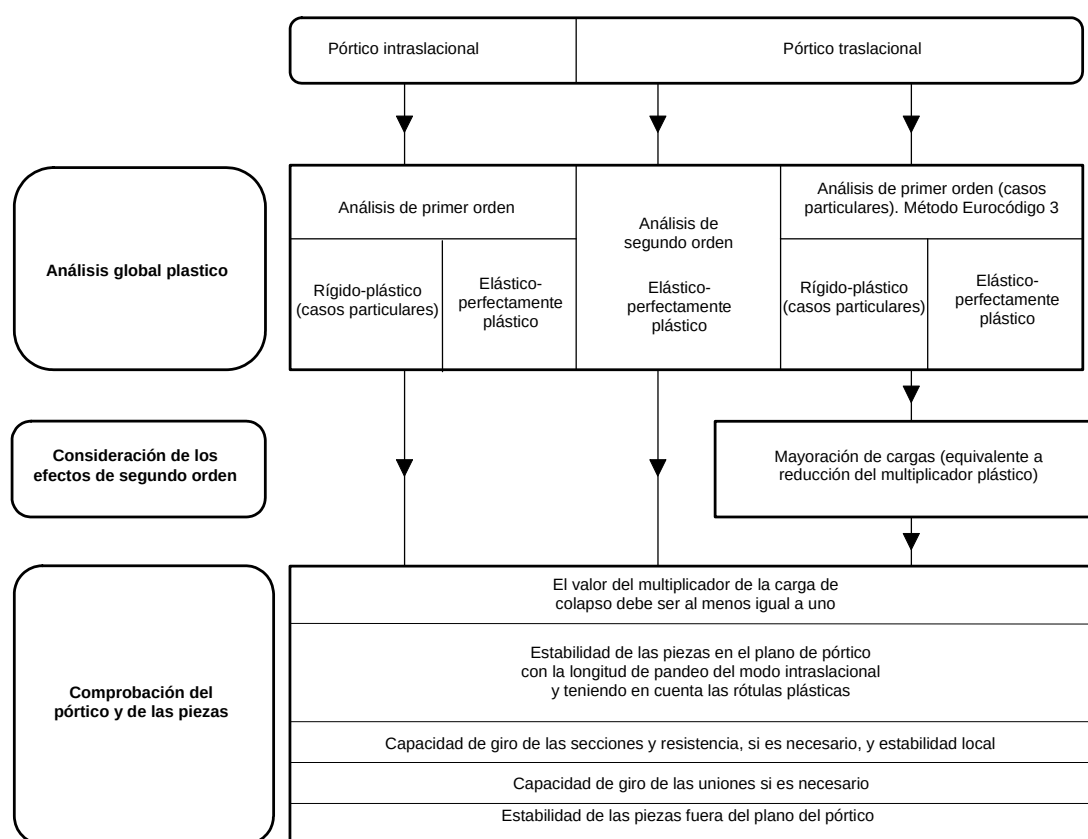
Los métodos plásticos de análisis son válidos si se cumplen las siguientes condiciones:

1. El acero cumple los siguientes requerimientos específicos:
 - El cociente entre la resistencia a tracción mínima garantizada f_u y el límite elástico mínimo garantizado f_y cumple que $f_u/f_y \geq 1,2$
 - El alargamiento en rotura en una longitud de $5,65\sqrt{A_0}$ no es menor del 15% (siendo A_0 el área de la sección transversal inicial)
 - La deformación última e_u en el ensayo de tracción correspondiente a f_u es al menos 20 veces la deformación e_y correspondiente al límite elástico f_y .
2. Se dispondrán arriostramientos laterales en todos los puntos en los que se formen rótulas plásticas. El arriostrado se dispondrá a una distancia del punto de formación de la rótula teórica, no mayor que la mitad del canto del elemento en dichos puntos.

3. La estructura poseerá la suficiente capacidad de rotación en los lugares donde se ubican las rótulas plásticas, tanto si se trata de secciones intermedias de las piezas (Clase 1 o Clase 2 si no se requiere gran capacidad de giro) o de las uniones. En definitiva se debe asegurar el cumplimiento de las condiciones de ductilidad.

El análisis global plástico puede llevarse a cabo utilizando un análisis rígido-plástico cuando no es preciso considerar los efectos de la geometría deformada, suponiendo que las deformaciones plásticas se concentran en las rótulas plásticas o mediante un análisis elasto-plástico que en ocasiones puede ser idealmente elástico-perfectamente plástico.

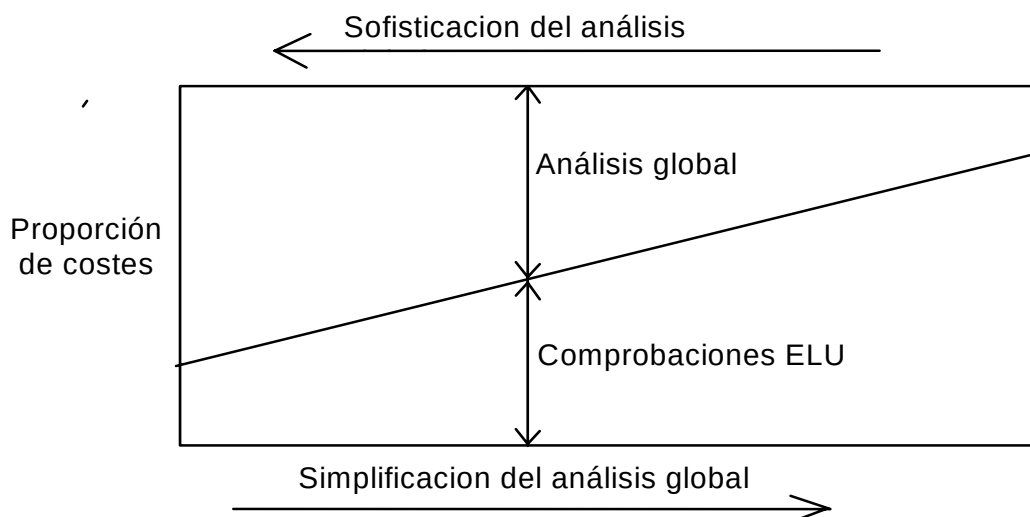
La figura siguiente resume las diferentes posibilidades de llevar a cabo el análisis global plástico y las comprobaciones relevantes con referencia al Eurocódigo 3 Parte 1-1. Para más detalle ver lecciones 4 a 8 del proyecto SSEDTA. www.ssedta.com.



4.5.4. Consideraciones sobre la elección del tipo de análisis

Una vez que se ha establecido la configuración del pórtico, se lleva a cabo un diseño preliminar de las características de las piezas y las uniones. Puede hacerse un análisis preliminar para clasificar el pórtico como traslacional o intraslacional. De modo alternativo, se puede suponer una clasificación que será comprobada después. Basándose en esta información, se puede elegir un método apropiado de análisis global para determinar los esfuerzos. El análisis de primer orden es adecuado para la mayoría de los pórticos típicos aunque siempre se puede realizar un análisis de segundo orden, elástico o plástico (con ciertas condiciones de clasificación de las piezas y uniones).

Las comprobaciones de diseño a realizar después del análisis dependen de la sofisticación de la herramienta de cálculo utilizada. Por ejemplo, si se utiliza análisis de segundo orden, generalmente no hay necesidad de comprobar la estabilidad del pórtico y las piezas en el propio plano. La elección del análisis global no sólo dependerá de los requisitos de los códigos de diseño, sino también de elecciones particulares, dependiendo de situaciones específicas, software disponible, etc. Se puede encontrar un equilibrio entre el coste destinado al análisis global y el requerido en las restantes comprobaciones de Estados Límite Último.



Balance de coste entre análisis global y comprobaciones en ELU