

## Robustez Estructural

Las estructuras de edificación deben soportar acciones de diseño relacionadas a su uso previsto y al medio en el cual se implantan. Dichas acciones fueron vistas en una sección anterior dedicada a la revisión de las cargas previstas para edificación.

Sin embargo, las estructuras de edificación también deben soportar acciones accidentales, las cuales surgen de uso inesperado, del mal uso o directamente de accidentes resultantes del uso regular de la misma. Entre las acciones accidentales podemos enumerar:

- 1) Explosión. Ejemplos:
  - a. resultado de la ignición de un escape de gas.
  - b. falla de equipo presurizado.
- 2) Impacto. Ejemplos:
  - a. resultado de un fallo en un vehículo
  - b. como resultado de un objeto que cae desde una altura.
- 3) Fuego. Ejemplos:
  - a. resultado de un incendio en una cocina o garage.
- 4) Error Humano.
  - a. un error en una maniobra con un vehículo o equipo.

Todas las acciones anteriores pueden tener como resultado un daño estructural localizado, el cual no debería progresar o propagarse por la estructura. Aquí surge el concepto de “consecuencias desproporcionadas a la causa original”. Es decir, una acción accidental que genera en primera instancia un daño localizado, pero que luego dicho daño se propaga por la estructura y termina alcanzando una región de tamaño desproporcionado respecto del daño original.

En clase se discuten tres casos clásicos de daños desproporcionados a la causa original. En el sitio de EVA podrán encontrar referencias para leer en profundidad sobre estos casos:

- Ronan Point, UK
- Kansas City Hyatt Regency, USA
- Oklahoma City Federal Building, USA

Como resultados de los casos presentados, las normas de diseño estructural de edificaciones fueron actualizadas de manera de incluir reglas y criterios que minimizaran las chances que estas tragedias se repitieran. Las normas incorporaron secciones de Integridad Estructural o de Robustez Estructural.

A continuación, se presenta el enfoque europeo asociado a este concepto.

En la norma EN 1997-1-7, correspondiente a acciones accidentales, podemos encontrar la definición de Robustez:

*“Robustez: la habilidad de una estructura de resistir eventos como fuego, explosiones, impacto o consecuencias de errores humanos, sin sufrir daños de extensión desproporcionada respecto de los de la causa original.”*

Es claro que se deben diseñar estructuras que tengan robustez en el sentido de la definición anterior. Lograr dicha robustez depende en gran medida de consideraciones de detallado de las estructuras, de forma de introducir o habilitar redundancia y caminos de carga alternativos.

También es claro que lograr lo anterior presentará distintos desafíos dependiendo de la tecnología constructiva que se esté considerando:

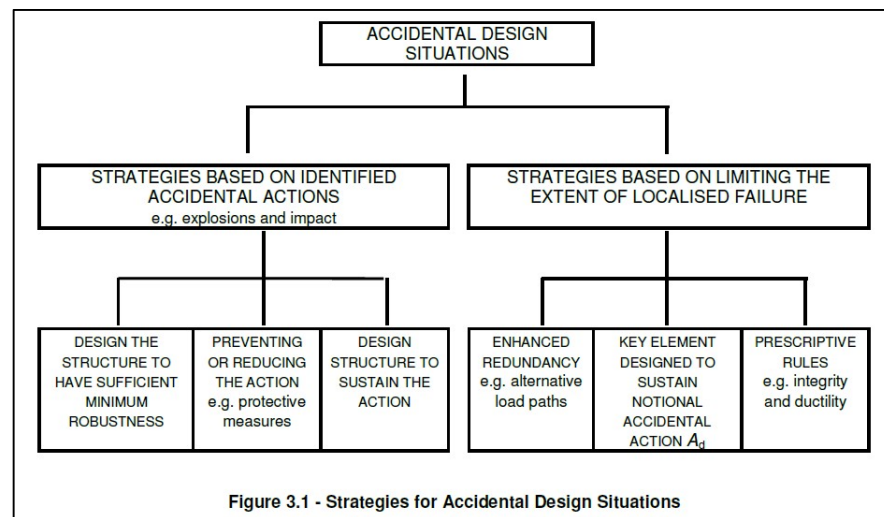
- Estructuras de hormigón in-situ, son naturalmente dúctiles, con pesos muertos elevados y con un grado apreciable de redundancia. Presenta un desafío menor en general.
- hormigón prefabricado, son estructuras con menor redundancia, con peso muerto apreciable y con componentes modulares donde la integridad depende de las conexiones que se realicen. Pueden presentar un desafío grande.
- Estructuras metálicas, son estructuras de baja redundancia, con pesos muertos menores y con componentes modulares que dependen de conexiones resistentes para poder redistribuir cargas. Pueden presentar un desafío apreciable.

En la norma EN 1990, se indica dentro de los requerimientos básicos (cl. 2.1):

*(4) P A structure shall be designed and executed in such a way that it will not be damaged by events such as: explosion, - impact, and the consequences of human errors, to an extent disproportionate to the original cause.*

Dicha norma refiere al lector a la norma EN 1991-1-7 mencionada anteriormente. Esta norma de acciones accidentales busca dar estrategias y reglas para salvaguardar edificios y otras obras de ingeniería civil de acciones accidentales identificables y no identificables.

La norma EN 1991-1-7 acepta distintos enfoques para satisfacer el requerimiento de robustez. En particular, clasifica los enfoques dependiendo de que la acción accidental sea identificable o no.



A modo de ejemplo de casos donde la acción es identificable y se diseña la estructura para resistir dicha acción:

- Soportes de viaductos próximos al tráfico inferior. En Uruguay la DNV de MTOP tiene cargas accidentales que se deben aplicar a soportes de viaductos si estos no están protegidos y se encuentran próximos al tráfico inferior. (Ver documento ETCM de DNV/MTOP).
- Barreras de contención de tráfico sobre puentes. En Uruguay, la DNV de MTOP indica cargas de impacto de vehículos contra barreras de contención que deben ser verificadas en situación accidental. (Ver documento ETCM de DNV/MTOP).

- Mástiles atirantados. Se prevé en el diseño de mástiles atirantados la situación accidental de rotura de riendas y las acciones dinámicas resultantes sobre el mástil (ver norma TIA-222-h o norma EN 1993-3-1).

La norma EN 1991-1-7 clasifica las estructuras de edificación según la consecuencia del colapso o salida de servicio de estas. Dependiendo de la severidad de las consecuencias es razonable exigir medidas más onerosas del punto de vista del diseño para controlar el riesgo de daños desproporcionados en caso de accidente.

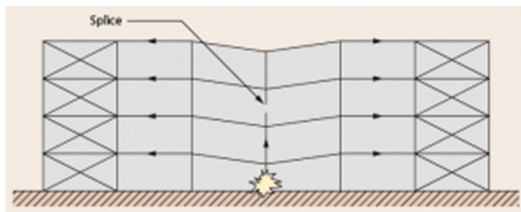
Consequence class	Example of categorisation of building type and occupancy
1	Single occupancy houses not exceeding 4 storeys. Agricultural buildings. Buildings into which people rarely go, provided no part of the building is closer to another building, or area where people do go, than a distance of $1\frac{1}{2}$ times the building height.
2a Lower Risk Group	5 storey single occupancy houses. Hotels not exceeding 4 storeys. Flats, apartments and other residential buildings not exceeding 4 storeys. Offices not exceeding 4 storeys. Industrial buildings not exceeding 3 storeys. Retailing premises not exceeding 3 storeys of less than 1 000 m <sup>2</sup> floor area in each storey. Single storey educational buildings All buildings not exceeding two storeys to which the public are admitted and which contain floor areas not exceeding 2000 m <sup>2</sup> at each storey.
2b Upper Risk Group	Hotels, flats, apartments and other residential buildings greater than 4 storeys but not exceeding 15 storeys. Educational buildings greater than single storey but not exceeding 15 storeys. Retailing premises greater than 3 storeys but not exceeding 15 storeys. Hospitals not exceeding 3 storeys. Offices greater than 4 storeys but not exceeding 15 storeys. All buildings to which the public are admitted and which contain floor areas exceeding 2000 m <sup>2</sup> but not exceeding 5000 m <sup>2</sup> at each storey. Car parking not exceeding 6 storeys.
3	All buildings defined above as Class 2 Lower and Upper Consequences Class that exceed the limits on area and number of storeys. All buildings to which members of the public are admitted in significant numbers. Stadia accommodating more than 5 000 spectators Buildings containing hazardous substances and /or processes

Los edificios que se trabajan usualmente en el curso de Proyecto Estructural son Clase 2b, dado que suelen ser residenciales y con números de pisos que excede 4 pero no mayores a 15.

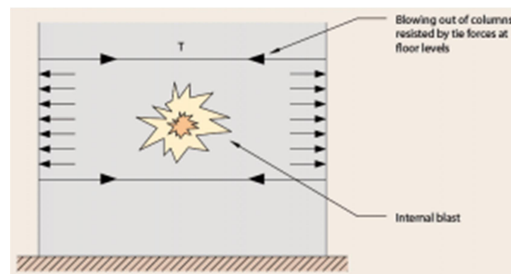
Estas estructuras admiten según EN 1991-1-7 dos enfoques distintos para garantizar la robustez estructural de estructuras de edificación Clase 2b sujetas a acciones accidentales de origen no identificado (ver Anexo A).

A. Reglas de atado horizontal y vertical.

Se requieren tirantes mínimos horizontales y verticales en la estructura que permitan generar caminos de carga alternativos en caso de daños localizados.



*Acción Catenaria*



*Sujeción de Columnas*

B. Remoción figurada de columnas.

Se requiere determinar si la remoción figurada de cada una de las columnas resulta en un daño localizado aceptable (la norma define un área máxima aceptable). En caso de no satisfacerse el requisito de daño máximo, se debe diseñar esa columna como un “Elemento Clave” el cual debe poder soportar una presión de 34 kN/m<sup>2</sup>.

En estructuras de hormigón armado satisfacer los requisitos de atado es muy accesible para estructuras armadas y detalladas apropiadamente, con lo cual se presenta como el enfoque preferido para dichos casos.

La norma EN 1991-1-7 da criterios de atado para estructuras de edificación en general (i.e. hormigón en sitio, prefabricado o acero):

- Tirantes Horizontales (EN 1997-1-7, cl. A5)
- Tirantes Verticales (EN 1997-1-7, cl. A6)

Cabe notar que la norma EN 1992-1-1 tiene requisitos específicos de atado para estructura de edificación de hormigón (Sección 9.10). En dicho capítulo se presentan primero algunas consideraciones generales (cl. 9.10):

- En edificios con juntas de expansión cada bloque debe tener su sistema de atado independiente.
- En el diseño de tirantes, el acero se toma con su resistencia característica ( $f_{yk}$ ) y debe resistir las cargas de tracción que define en clausulas 9.10.2.
- La armadura dispuesta en columnas, vigas, losas puede considerarse como la que provee la resistencia de atado (es decir se determinan cuantías mínimas y no suplementarias a aquellas determinadas por análisis estructural).

En clase se discuten los criterios de atado contenidos en las secciones:

- Tirantes Horizontales Perimetrales (cl. 9.10.2.2)
- Tirantes Horizontales Internos (cl. 9.10.2.3)
- Tirantes Horizontales a Columnas (cl. 9.10.2.4)
- Tirantes Verticales (cl. 9.10.2.5)
- Continuidad y anclaje de tirantes (cl. 9.10.3)