



## Diseño Sísmico de Edificios

### 1. Comparación entre Fuerzas Sísmicas y de Viento

Una de las primeras y más impactantes comparaciones presentadas es la magnitud relativa entre las fuerzas sísmicas y las fuerzas de viento. Para un edificio de ejemplo de 10 pisos (20 x 25m, altura total 30m, Peso 5000t, Período  $T = 0.8$  seg), se calcula una fuerza sísmica basal ( $V$ ) de 5000t y una carga de viento ( $W_u$ ) de 240t en la cara mayor (25 x 30m).

• **Hecho Clave:** "La Fuerza Sísmica / Fuerza Viento =  $5000/240 = 20$  veces!!!" Esto subraya que, para el diseño en zonas sísmicas, la carga sísmica es el factor dominante a considerar, superando con creces la carga de viento.

### 2. Estrategias de Diseño Sismorresistente

Las estrategias para manejar la energía de un terremoto en una estructura se dividen en dos categorías principales:

#### 2.1. Energía que "Ingresa" a la Estructura:

Cuando la energía sísmica entra al edificio, las estrategias son:

1. **Resistir con la estructura:** Implica un "Respuesta Elástica" del edificio, donde los elementos se mantienen dentro de su rango elástico.

2. **Disipar con la estructura:** Permite una "Respuesta Inelástica", donde la estructura disipa energía a través de deformaciones plásticas controladas.

3. **Disipar con dispositivos:** Consiste en "Aumentar Amortiguamiento" mediante el uso de dispositivos externos como Amortiguadores de Masa Sintonizada (TMD).

#### 2.2. Energía que "No Ingresa" a la Estructura:

La estrategia principal para evitar el ingreso de energía es el "Aislamiento Sísmico".

• **Concepto:** Esta técnica busca desacoplar el edificio del movimiento del suelo, reduciendo significativamente las fuerzas transmitidas a la superestructura.

### 3. El "Control del Daño" como Nueva Obligación del Diseñador

El diseño sismorresistente moderno va más allá de prevenir el colapso. Se introduce el concepto de "NUEVAS" OBLIGACIONES DEL DISEÑADOR: "→ CONTROL DEL DAÑO |".

• **Implicaciones:** Un terremoto puede causar daño estructural y no estructural, y la estructura sufrirá grandes desplazamientos por deformaciones inelásticas. El control del daño se aborda en dos fases:

1. **PROYECTO:** A través de la "Regularidad. Detallado. Control Deformación".

2. **CONSTRUCCIÓN:** Mediante la "Dirección Técnica. Control Ejecución".

• **Relación con la Disipación:** Las estrategias de disipación de energía, especialmente la respuesta inelástica, son fundamentales para el control del daño. Permiten que la estructura se deforme de manera controlada y disipe la energía, evitando fallas frágiles y el colapso, aunque pueda haber daño.



#### 4. Comportamiento Dinámico del Edificio

La reacción de un edificio ante un sismo está intrínsecamente ligada a su comportamiento dinámico:

- **Inercia:** La fuerza sísmica es una fuerza inercial ( $F = m \cdot A$ ). "Inercia:  $F = \text{masa} \times \text{Aceleración} \rightarrow \text{colapsa por el peso}$ ". Una gran masa, al ser acelerada, genera fuerzas inerciales significativas.
- **Período y Resonancia:** Son cruciales en el diseño sísmico.
  - **Período Natural ( $T_0$ ,  $T$ ):** Es el tiempo que tarda la estructura en oscilar libremente.
  - **Resonancia:** Si el período natural del edificio coincide con las "Frecuencias del terremoto", se produce resonancia, lo que amplifica drásticamente las vibraciones y los esfuerzos. El objetivo es "Sintonizar" el edificio para evitar esta coincidencia.
  - **Ejemplos Notorios:** El colapso del Puente Tacoma y los problemas del Puente Milenium Bridge son ejemplos clásicos de los efectos devastadores de la resonancia. El Taipei 101 utiliza un TMD para contrarrestar este efecto.
- **Modelo Dinámico Equivalente y Espectro de Respuesta:** Se utilizan modelos dinámicos para simplificar el análisis. Un "Espectro de Respuesta" es un gráfico que muestra la respuesta máxima (aceleración, velocidad, desplazamiento) de osciladores de un grado de libertad con diferentes períodos ante un registro sísmico específico. Es fundamental para determinar las demandas sísmicas de diseño, permitiendo a los ingenieros entender cómo diferentes estructuras reaccionarán a un sismo dado. El "Espectro de Diseño" es una curva suavizada y simplificada de aceleraciones utilizada para el diseño sísmico reglamentario.

#### 5. Mecanismo de Plastificación

El mecanismo de plastificación es una estrategia clave en el diseño sismorresistente para la disipación de energía inelástica.

- **Rótulas Plásticas:** Son "Puntos de Disipación de Energía" donde la estructura se deforma inelásticamente de manera controlada. Actúan como "fusibles" estructurales.
- **Importancia:** Su diseño permite "Protección de fallas Frágiles" y asegura que la energía sísmica se disipe sin un colapso repentino.
- **Diseño Ideal:** Deben formarse "Rótulas estables (histéresis)" y es crucial "Evitar mecanismos de piso (piso débil)", lo que significa que la plastificación no debe concentrarse en un solo piso. Un principio fundamental es "Viga débil – Columna Fuerte" para garantizar que las vigas plastifiquen antes que las columnas, preservando la estabilidad vertical.
- **Factores de Comportamiento ( $R$  y  $C_d$ ):** Estos factores, dependientes del "Tipo Estructural" (ej. Estructura Dual: Pórtico – Tabique, Tabique Acoplado con vigas), cuantifican la capacidad de la estructura para plastificar y disipar energía, lo que permite reducir las fuerzas sísmicas de diseño.

#### 6. Diseño Sísmico Convencional y Distribución de Fuerzas

El diseño sísmico convencional implica varios pasos y consideraciones:

- **Propiedades Dinámicas:** Se consideran las propiedades dinámicas del edificio, el "Espectro Elástico y Reducción", el "Coeficiente Sísmico (Riesgo)", el "Corte Sísmico Basal ( $V = C \cdot W$ )", y la "Distrib. de Fuerzas en altura ( $F_{si} = V \cdot [m_i \cdot h_i / \sum (m_j \cdot h_j)]$ )".



- **Diafragmas (Rígidos o Flexibles):** La "Deformabilidad de Diafragmas" es crucial para la "Distribución en planta" de las fuerzas sísmicas.

- **Diafragma Rígido:** "El diafragma NO se deforma". Distribuye las fuerzas por "Rigidez Relativa" de los elementos verticales.

- **Diafragma Flexible:** "El diafragma SI se deforma". Distribuye las fuerzas por "Área o Ancho Tributario".

- **Corte y Torsión:** Se deben considerar tanto el corte como la torsión, especialmente si la torsión es significativa.

## 7. Factores de Comportamiento y Control de Deformaciones

Los factores de comportamiento son esenciales para un diseño sísmico económico y seguro.

- **Reducción de Fuerzas:** " $V_e$  = Corte elástico (Respuesta Elástica)" es la fuerza teórica si la estructura fuera puramente elástica. " $V_s$  = Corte de diseño (Reglamento)" es el corte elástico reducido por factores de comportamiento. La diferencia radica en que  $V_e$  se reduce para obtener  $V_s$ , considerando la capacidad de la estructura de disipar energía inelásticamente y su sobrerresistencia.

- **Componentes de Reducción:**

- **Rd (Factor de Reducción por Ductilidad):** Considera la capacidad de la estructura para disipar energía a través de deformaciones inelásticas.

- **Wo (Factor de Reducción por Sobrerresistencia):** Contempla que la "resistencia real del sistema estructural" es mayor que la resistencia de diseño, debido a factores como "Tensiones reales material", "Endurecimiento post-fluencia", "Factores de reducción f" y "Cuantías mínimas".

- **R (Factor de Reducción global):** Es el factor total que combina la ductilidad y la sobrerresistencia.

- **Control de Deformaciones:** Es fundamental controlar los "desplazamientos laterales y la distorsión de piso". El "reglamento INPRES-CIRSOC 103 establece los valores de  $\theta_{lim}$ " para asegurar que las deformaciones se mantengan dentro de límites aceptables para el control del daño.

## 8. Predimensionado según INPRES-CIRSOC 103

El documento también aborda el predimensionado inicial de elementos estructurales, basándose en la norma INPRES-CIRSOC 103:

- **Corte Basal y Área Mínima Estructural Necesaria:** Se calcula " $V_o = C \cdot W$ " y luego el "A.M.E.N. (Área Mínima Estructura Necesaria) =  $V_o / v$ ", donde " $v$ " es la tensión de corte de referencia según el tipo estructural (ej., Tabique de  $H^0 A^0 = 100 \text{ t/m}^2$ , Pórtico de  $H^0 A^0 = 60 \text{ t/m}^2$ ).

- **Distribución en Planta:** Se considera la "Mínima excentricidad" y se utilizan "Anchos equivalente de  $H^0$ " para representar elementos de diferentes materiales (como acero o triangulaciones) como secciones equivalentes de hormigón armado para el análisis del "Centro de Rigidez" y baricentro de áreas estructurales.



## I. Cuestionario de Preguntas Cortas

Responda cada pregunta en 2-3 oraciones.

1. **Comparación Viento-Sismo:** ¿Cómo se comparan las fuerzas sísmicas y las de viento en magnitud para el edificio de ejemplo presentado?
2. **Estrategias de Diseño Sismorresistente (Ingreso de Energía):** Mencione las tres estrategias principales para manejar la energía que "ingresa" a la estructura durante un terremoto.
3. **Estrategias de Diseño Sismorresistente (No Ingreso de Energía):** Describa la estrategia principal para evitar que la energía sísmica "no ingrese" a la estructura.
4. **Control del Daño:** ¿Cuáles son las dos "nuevas" obligaciones del diseñador para controlar el daño estructural y no estructural?
5. **Reacción del Edificio - Inercia:** Explique brevemente cómo la inercia influye en la reacción de un edificio ante un sismo.
6. **Reacción del Edificio - Período y Resonancia:** ¿Qué relación existe entre el período natural de un edificio, las frecuencias del terremoto y el fenómeno de resonancia?
7. **Espectro de Respuesta:** ¿Qué información proporciona un espectro de respuesta para un terremoto y cómo se relaciona con el diseño sísmico?
8. **Mecanismo de Plastificación:** ¿Cuál es la importancia de los puntos de disipación de energía, o rótulas plásticas, en el mecanismo de plastificación?
9. **Factores de Comportamiento:** Explique la diferencia entre  $V_e$  (corte elástico) y  $V_s$  (corte de diseño) en el contexto de la reducción de fuerzas sísmicas.
10. **Diafragma Rígido vs. Flexible:** ¿Cuál es la principal diferencia en la distribución de fuerzas sísmicas en planta entre un diafragma rígido y uno flexible?



## II. Clave de Respuestas del Cuestionario

1. **Comparación Viento-Sismo:** Las fuerzas sísmicas son significativamente mayores que las de viento. Para el ejemplo, la fuerza sísmica es aproximadamente 20 veces mayor que la fuerza de viento en la cara más grande.
2. **Estrategias de Diseño Sismorresistente (Ingreso de Energía):** Las tres estrategias son: resistir con la estructura (respuesta elástica), disipar con la estructura (respuesta inelástica) y disipar con dispositivos (aumentar el amortiguamiento).
3. **Estrategias de Diseño Sismorresistente (No Ingreso de Energía):** La estrategia principal para evitar que la energía no ingrese a la estructura es el aislamiento sísmico, que desacopla el edificio del movimiento del suelo.
4. **Control del Daño:** Las "nuevas" obligaciones son el control del daño, que se logra a través de la regularidad, el detallado y el control de la deformación en el proyecto, y la dirección técnica y el control de la ejecución en la construcción.
5. **Reacción del Edificio - Inercia:** La inercia es la resistencia de la masa del edificio a los cambios en su estado de movimiento. Una gran masa, al ser acelerada por un sismo ( $F = m \cdot A$ ), genera grandes fuerzas inerciales que pueden llevar al colapso si no se resisten adecuadamente.
6. **Reacción del Edificio - Período y Resonancia:** Si el período natural ( $T_0$ ) del edificio se alinea con las frecuencias dominantes del terremoto, se produce el fenómeno de resonancia, lo que amplifica drásticamente las vibraciones y los esfuerzos en la estructura.
7. **Espectro de Respuesta:** Un espectro de respuesta muestra la respuesta máxima (aceleración, velocidad o desplazamiento) de osciladores de un grado de libertad con diferentes períodos ante un registro sísmico específico. Es fundamental para determinar las demandas sísmicas de diseño.
8. **Mecanismo de Plastificación:** Las rótulas plásticas son puntos de disipación de energía controlados en la estructura. Su diseño permite que la energía sísmica se disipe mediante deformaciones inelásticas sin colapso frágil, protegiendo otros elementos estructurales.
9. **Factores de Comportamiento:**  $V_e$  (Corte elástico) representa la fuerza sísmica si la estructura se comportara de forma puramente elástica.  $V_s$  (Corte de diseño) es el corte elástico reducido por factores de comportamiento ( $R$ ), que consideran la ductilidad y sobrerresistencia de la estructura para permitir un diseño más económico sin colapso.
10. **Diafragma Rígido vs. Flexible:** Un diafragma rígido (no se deforma) distribuye las fuerzas sísmicas entre los elementos resistentes en proporción a sus rigideces relativas. Un diafragma flexible (sí se deforma) distribuye las fuerzas por área o ancho tributario.



### III. Preguntas de Ensayo

1. Analice las implicaciones del "Control del Daño" como una "nueva obligación del diseñador" en el diseño sismorresistente. Compare esta perspectiva con un diseño puramente elástico y explique cómo las estrategias de disipación de energía se relacionan con el control del daño.
2. Describa el concepto de "Período y Resonancia" en la dinámica de estructuras sismorresistentes. Explique cómo el conocimiento del período natural de un edificio y las frecuencias de un terremoto influyen en el diseño, y mencione ejemplos de cómo este fenómeno ha afectado estructuras reales.
3. Compare y contraste las tres principales estrategias para manejar la energía que "ingresa" a la estructura (resistencia elástica, disipación inelástica, disipación con dispositivos) con la estrategia de "aislamiento sísmico" para evitar que la energía "no ingrese" a la estructura. Incluya las ventajas y desventajas de cada enfoque.
4. Explique detalladamente el "Mecanismo de Plastificación" como estrategia de diseño sismorresistente. Describa qué son las rótulas plásticas, dónde deben formarse idealmente, y cómo se relaciona este concepto con la protección contra fallas frágiles y la evitación de mecanismos de piso débil.
5. Analice el impacto de los "Factores de Comportamiento" ( $R_d$ ,  $W_o$ ,  $R$ ) en el diseño sísmico convencional. Explique cómo estos factores permiten reducir las fuerzas sísmicas elásticas a fuerzas de diseño reglamentarias, y describa los diferentes componentes que contribuyen a la reducción por sobrerresistencia.





#### IV. Glosario de Términos Clave

- **Aislamiento Sísmico:** Estrategia de diseño que busca desacoplar la estructura del movimiento del suelo para reducir la cantidad de energía sísmica que ingresa al edificio.
- **Amortiguamiento:** Propiedad de un sistema que disipa energía durante la vibración, reduciendo la amplitud de las oscilaciones.
- **Carga de Viento ( $W_u$ ,  $W$ ):** Fuerza ejercida por el viento sobre la superficie de una estructura, calculada con factores de mayoración para diseño.
- **CIRSOC 103 (INPRES-CIRSOC 103):** Norma o reglamento argentino para el diseño sismorresistente de edificios.
- **Control del Daño:** Concepto fundamental en el diseño sismorresistente moderno que busca limitar el alcance del daño estructural y no estructural durante un sismo, garantizando la seguridad y funcionalidad post-sismo.
- **Corte Basal ( $V$ ):** La fuerza sísmica horizontal total que actúa en la base de una estructura. Se calcula a partir del peso del edificio y la aceleración sísmica.
- **Corte de Capacidad ( $V_y$ ):** El corte basal que la estructura puede resistir cuando se ha desarrollado completamente su mecanismo de plastificación (totalmente plastificada).
- **Corte de Diseño ( $V_s$ ):** La fuerza cortante basal utilizada en el diseño, que resulta de reducir el corte elástico por los factores de comportamiento.
- **Corte Elástico ( $V_e$ ):** La fuerza cortante basal teórica que la estructura experimentaría si se comportara de manera puramente elástica durante un sismo.
- **Diafragma Flexible:** Un elemento horizontal (generalmente una losa) que se deforma significativamente bajo cargas laterales y distribuye las fuerzas sísmicas a los elementos verticales en proporción a sus áreas o anchos tributarios.
- **Diafragma Rígido:** Un elemento horizontal (generalmente una losa de hormigón armado) que se considera infinitamente rígido en su propio plano y distribuye las fuerzas sísmicas a los elementos verticales en proporción a sus rigideces relativas.
- **Disipación de Energía:** Proceso mediante el cual la energía sísmica que ingresa a una estructura es absorbida y transformada en otras formas de energía (como calor) a través de deformaciones inelásticas o dispositivos especiales, reduciendo así la demanda de fuerzas.
- **Distorsión de Piso ( $\theta$ ):** La relación entre el desplazamiento lateral relativo entre dos pisos consecutivos y la altura de ese piso, un indicador clave del daño estructural.
- **Ductilidad:** Capacidad de un material o estructura para deformarse significativamente más allá del límite elástico sin pérdida sustancial de resistencia. Es crucial para la disipación de energía sísmica.
- **Espectro de Diseño:** Una curva suavizada y simplificada de aceleraciones de respuesta que se utiliza para el diseño sísmico, basada en las características sísmicas de una región (zona sísmica).
- **Espectro de Respuesta:** Un gráfico que muestra la aceleración, velocidad o desplazamiento máximo de un oscilador de un grado de libertad en función de su período natural y amortiguamiento, ante un registro sísmico específico.
- **Factores de Comportamiento ( $R$ ,  $R_d$ ,  $W_o$ ,  $C_d$ ):** Coeficientes de reducción utilizados en el diseño sísmico para considerar la capacidad de la estructura de disipar energía a través de deformaciones inelásticas (ductilidad) y su sobrerresistencia.



- **R (Factor de Reducción global):** Factor de reducción total.
- **Rd (Factor de Reducción por Ductilidad):** Factor que considera la capacidad de disipación de energía por comportamiento inelástico.
- **Wo (Factor de Reducción por Sobrerresistencia):** Factor que considera la resistencia real de la estructura es mayor que la resistencia de diseño.
- **Cd (Factor de Amplificación de Desplazamientos):** Factor utilizado para estimar desplazamientos inelásticos a partir de desplazamientos elásticos reducidos.
- **Fuerza Sísmica (F):** La fuerza inercial generada en una estructura debido a la aceleración del terreno durante un terremoto ( $F = m \cdot a$ ).
- **Inercia ( $F = m \cdot A$ ):** Resistencia de un cuerpo a cambiar su estado de movimiento. En un sismo, la masa del edificio genera fuerzas inerciales proporcionales a su aceleración.
- **Mecanismo de Plastificación:** Patrón de formación de rótulas plásticas en una estructura diseñado para asegurar una disipación de energía controlada y evitar el colapso.
- **Mecanismo de Piso Débil:** Condición indeseable en la que la plastificación y concentración de deformaciones se produce en un único piso de la estructura, lo que puede llevar al colapso de ese piso.
- **Modelo Dinámico Equivalente:** Una simplificación de la estructura real, representándola como una serie de masas concentradas y resortes, utilizada para el análisis dinámico.
- **Período Natural ( $T_o$ ,  $T$ ):** El tiempo que tarda una estructura en completar un ciclo de oscilación libre sin amortiguamiento. Es una propiedad fundamental que determina cómo reacciona un edificio a las fuerzas sísmicas.
- **Plastificación:** Proceso en el cual un material o elemento estructural alcanza su límite elástico y comienza a deformarse inelásticamente, disipando energía.
- **Pórticos:** Estructuras formadas por vigas y columnas unidas rígidamente, que resisten las cargas laterales por flexión y corte en sus elementos.
- **Predimensionado:** Estimación preliminar de las dimensiones de los elementos estructurales basada en criterios simplificados, antes del análisis detallado.
- **Resonancia:** Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de excitación (ej. un terremoto) coincide con una de las frecuencias naturales de vibración de una estructura, lo que resulta en una amplificación significativa de la respuesta.
- **Rótula Plástica:** Una sección de un elemento estructural donde se concentra la deformación inelástica bajo cargas elevadas, actuando como un "fusible" para disipar energía.
- **Sa (Aceleración Espectral):** La aceleración sísmica leída del espectro de respuesta o diseño para un período determinado, expresada como fracción de la gravedad (g).
- **Tabiques (Muros Estructurales):** Elementos estructurales verticales de gran rigidez en su plano, diseñados para resistir fuerzas laterales (sísmicas y de viento) principalmente a través de la acción de muro en voladizo.
- **TMD (Tuned Mass Damper - Amortiguador de Masa Sintonizada):** Un dispositivo instalado en estructuras altas para reducir las vibraciones excesivas causadas por el viento o sismos, mediante la resonancia de una masa secundaria.
- **Zona Sísmica (Zona 1, 3, 4):** Clasificación geográfica de una región según su nivel de peligrosidad sísmica, lo que influye en los parámetros de diseño.