
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO	Ingeniería Sismorresistente - Guía de estudio: ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO	 FACULTAD DE INGENIERIA en acción continua...
	Francisco J. Crisafulli	
	Actualizado: Abril 2024	No de hojas: 27

1. INTRODUCCIÓN

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot en el año 1932 y luego desarrollados por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. En forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento ξ .

El concepto de los espectros comenzó a gestarse gracias a una idea Kyoji Suyehiro, Director del Instituto de Investigaciones de la Universidad de Tokyo, quien en 1920 ideó un instrumento de respuesta de los mismos ante la ocurrencia de un terremoto. Unos años después, Hugo Benioff publicó un artículo en el que proponía un instrumento similar al de Suyehiro, destinado a medir el desplazamiento registrado por diferentes péndulos con los cuales se podría determinar el valor máximo de respuesta y construir una curva (lo que hoy conocemos como espectro de desplazamiento elástico) cuya área sería un parámetro indicador de la destructividad del terremoto. Finalmente, fue Maurice Biot en el Instituto Tecnológico de California, quien propuso formalmente la idea de espectros de respuesta elástica.

Para explicar en forma conceptual el procedimiento de construcción de un espectro de respuesta consideremos una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples con diferentes periodos de vibración, T , y con igual factor de amortiguamiento, ξ (ver Figura 1)¹. Si sometemos todos estos osciladores a la acción de un mismo terremoto (utilizando un registro de aceleraciones, $\ddot{u}_g(t)$), cada uno de ellos exhibirá una respuesta diferente, la cual puede representarse, por ejemplo, a través de la historia de desplazamientos, $u(t)$ y de sus derivadas, velocidad y aceleración. Una vez que hemos calculado la respuesta de los osciladores es posible determinar el máximo (en valor absoluto, dado que el signo no tiene importancia) de cada uno de estos parámetros de respuesta y volcarlos en un gráfico en función del periodo de vibración, para obtener así un espectro de respuesta. Es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro. En la Figura 1 se representa el espectro de respuesta en términos de aceleración \ddot{u} .

¹ En este documento el periodo natural de vibración se indica como T (y la frecuencia circular del oscilador se representa como ω_n). Esta notación es la usual en los reglamentos para el periodo de vibración.

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de estructuras. Debemos aclarar, sin embargo, que los espectros de respuesta omiten información importante dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

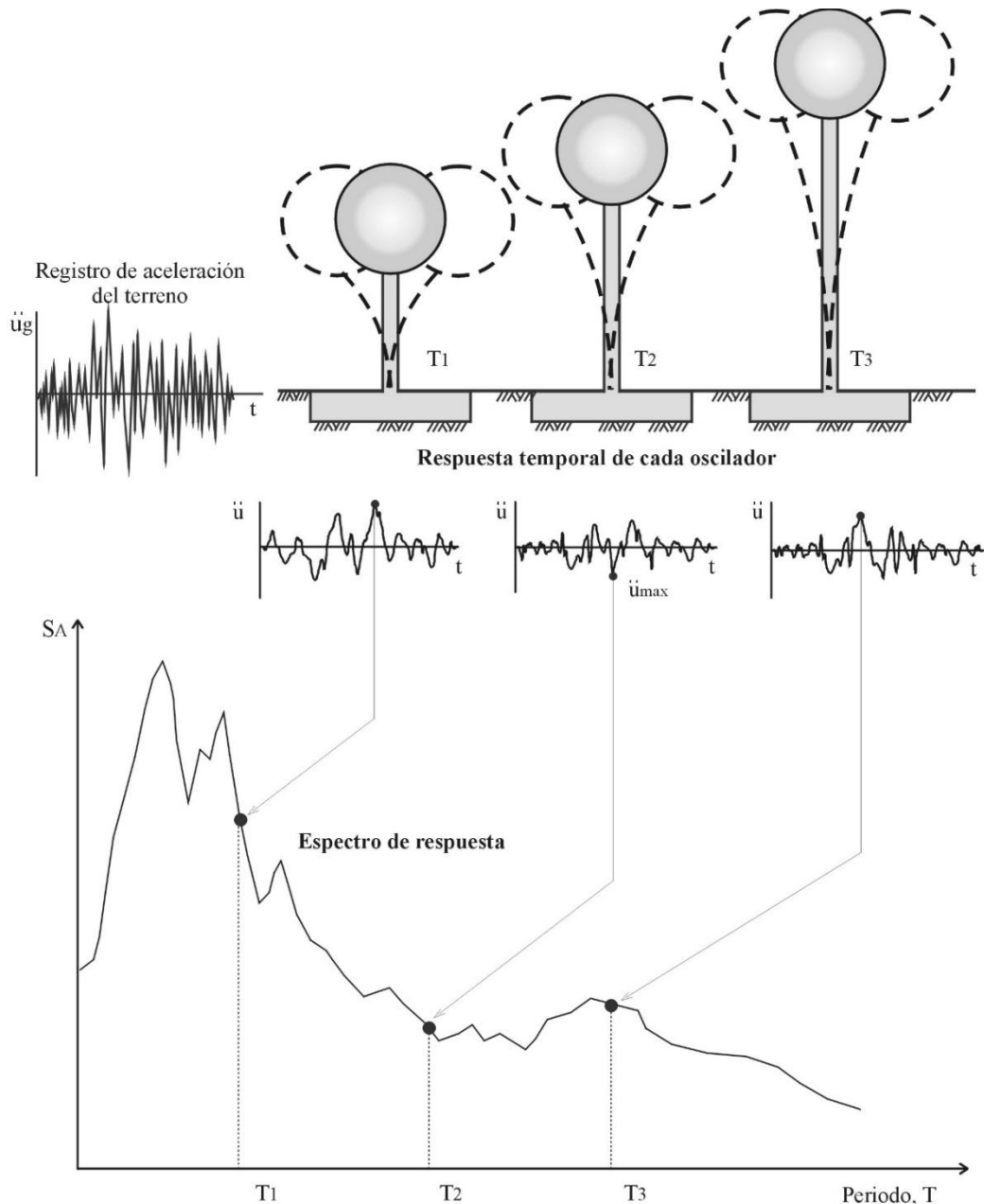


Figura 1. Gráfico indicativo del método de determinación del espectro de respuesta.

La realización de un espectro de respuesta requiere de la ejecución de numerosos cálculos, dado que es necesario resolver la ecuación de equilibrio dinámico para determinar la historia (variación en el tiempo) de desplazamientos, velocidad y aceleraciones para una gran cantidad de

estructuras con diferentes periodos de vibración, T , y factores de amortiguamiento ξ . En la actualidad, esto no representa un problema de importancia por la gran capacidad de cálculo de las computadoras modernas, las cuales pueden realizar un espectro de respuesta elástica en décimas de segundo. Sin embargo, cuando estos tipos de gráficos se desarrollaron en su etapa inicial, hace varias décadas, la situación era muy diferente. Como anécdota, es interesante mencionar que Housner calculaba los espectros mediante un procedimiento gráfico que requería aproximadamente de un día de trabajo para calcular un punto del espectro. Posteriormente, se desarrolló un método más rápido usando un péndulo de torsión (“computadora analógica”) que permitía determinar los espectros mediante una analogía matemática entre los dos fenómenos. En este caso, el tiempo requerido para calcular un punto del espectro se redujo a unos 15 minutos.

2. TIPOS DE ESPECTROS

Como mencionamos anteriormente, el concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos. En este documento analizaremos los tipos de espectros más comunes, mediante los que se representan distintos valores máximos de la respuesta estructural originada por la acción sísmica.

2.1 Espectros de respuesta elástica

Representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto, que incluye un amplio contenido de frecuencias.

2.2 Espectros de respuesta inelástica

Son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico. Como ejemplo, podemos mencionar los espectros de ductilidad. Estos espectros representan la ductilidad requerida por un terremoto dado en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia.

La ductilidad es una propiedad del material, del elemento estructural o de un sistema completo que mide su capacidad de deformarse en rango inelástico sin disminuir su resistencia. Este parámetro se calcula como la relación entre el desplazamiento (o deformación) máxima dividido el desplazamiento (o deformación) de fluencia. Así por ejemplo, si la relación fuerza-desplazamiento de un sistema estructural está representada por la curva que se muestra en la Figura 2, la ductilidad se define como $\mu = u_{max}/u_y$. La ductilidad puede expresarse a nivel del material (en este caso se define a partir de las deformaciones específicas), a nivel de comportamiento seccional (por

ejemplo, para el caso de una sección sometida a flexión: ductilidad de curvatura) o a nivel de toda la estructura (ductilidad de desplazamiento).

El concepto de ductilidad está asociado a la capacidad que presenta el sistema estructural para disipar energía, sin embargo, no existe una relación directa entre ambos. Al respecto, consideremos una estructura que se somete a una cierta acción de modo tal que la curva fuerza-desplazamiento es la indicada en la Figura 2. Si la estructura se deforma, hasta llegar al desplazamiento u_{max} , (siguiendo la trayectoria O-A-B) en este proceso se absorbe energía de deformación representada por el área O-A-B-C. Si ahora descargamos la estructura, que se deformó previamente en rango inelástico, parte de la deformación se recupera (componente elástica), y otra parte permanece como deformación plástica remanente (ver en Figura 2 el desplazamiento u_p). El área B-C-D, representa la energía elástica recuperada, mientras que el área encerrada bajo la curva (área rayada O-A-B-D) representa la energía disipada por el sistema debido al comportamiento inelástico.

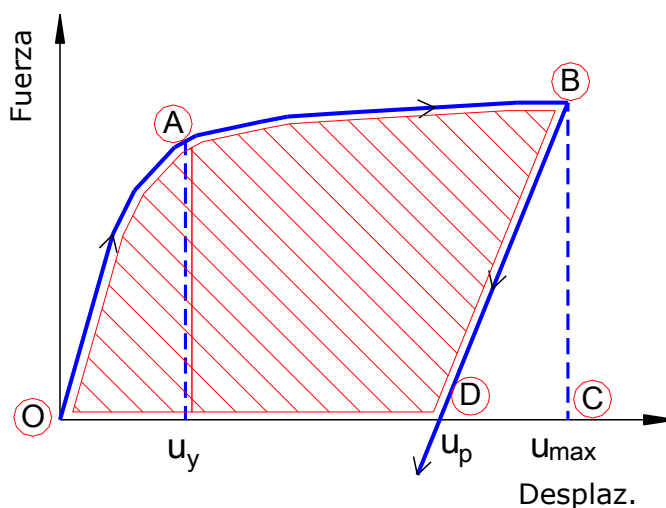


Figura 2. Relación fuerza-desplazamiento de un sistema inelástico.

Debemos considerar, sin embargo, que la energía disipada está vinculada directamente al comportamiento cíclico de la estructura o material y no existe una relación directa entre ductilidad y energía disipada. Así por ejemplo, en la Figura 3 comparamos la respuesta cíclica de dos estructuras, una con ciclos estables, curva 1, y la otra con ciclos que presentan estrechamiento (efecto que se denomina usualmente *pinching*, en inglés), curva 2. De esta comparación concluimos que ambas estructuras presentan ductilidades prácticamente iguales, mientras que su capacidad de disipar energía es significativamente diferente.

También, se pueden calcular espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad o distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura. Es importante aclarar que los modelos histeréticos definen la relación entre la fuerza restitutiva F_s y el desplazamiento u . En una estructura lineal y elástica se verifica que $F_s = k u$, siendo k la rigidez, mientras que en sistemas inelásticos, la fuerza F_s es una función no-lineal de u y de la historia de desplazamientos.

experimentados previamente (fenómeno de histéresis). En este último caso, la relación $F_s - u$ es mucho más compleja y se define mediante modelos histéricos como los indicados en las Figura 4.

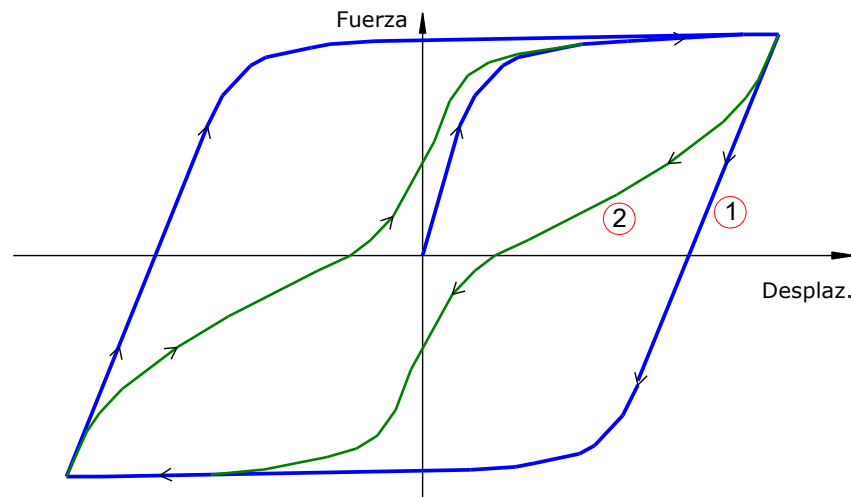


Figura 3. Comparación de la respuesta de dos sistemas estructurales con distinta capacidad de disipación de energía.

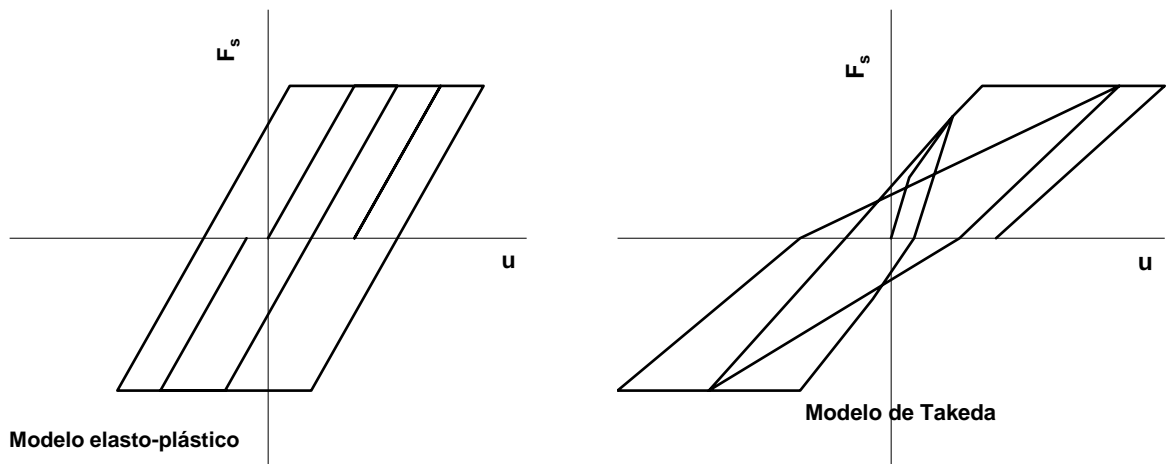


Figura 4. Ejemplos de modelos de histéresis.

2.3 Espectros de diseño

Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descritos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen

generalmente mediante procedimientos estadísticos, cuya descripción detallada escapa al alcance de este trabajo.

Es muy importante que distingamos entre espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar. En la sección 4 se presentan los espectros de diseño definidos por la reglamentación argentina. Se han desarrollado otros tipos de espectros, como los espectros de piso, que son de utilidad para ciertas aplicaciones específicas. Al final de este trabajo, en la sección 5, se presenta una breve descripción de dicho espectro.

3. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA

En esta sección desarrollaremos con mayor profundidad el concepto de espectro de respuesta elástica y analizaremos la metodología utilizada para su evaluación, la cual se fundamenta en conceptos fundamentales de la dinámica estructural.

3.1 Procedimiento de cálculo

Para calcular un espectro de respuesta elástica es necesario determinar la respuesta de numerosos osciladores simples, con distintos periodos de vibración, T_n , considerando la aceleración del terreno, $\ddot{u}_g(t)$, originada por un terremoto determinado (no hay fuerza exterior aplicada sobre el oscilador de 1 GDL, solo el movimiento del suelo):

$$\begin{aligned} m \ddot{u}'(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) &= 0 \\ \ddot{u}'(t) + 2 \xi \omega_n \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde ξ es el factor de amortiguamiento. Es importante recordar que la relación entre desplazamiento total, desplazamiento del terreno y desplazamiento relativo está dada por:

$$u'(t) = \ddot{u}_g(t) + u(t) \quad (2)$$

La aceleración total se obtiene derivando dos veces la Ecuación 2 respecto del tiempo y podemos demostrar que es igual a la suma de la aceleración relativa y de la aceleración del terreno. Reordenando la Ecuación 1, se obtiene la ecuación de equilibrio dinámico en donde la acción del sismo es equivalente a una fuerza efectiva que depende de la aceleración del terreno:

$$\begin{aligned} m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) &= -m \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) &= -\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Esta ecuación se debe resolver en forma numérica para obtener la función $u(t)$, dado que no es posible plantear una solución analítica. Ello es así porque $\ddot{u}_g(t)$ no puede expresarse mediante una ecuación analítica simple, sino que se obtiene como una tabla de valores numéricos, medidos con de un acelerómetro².

² Es decir que el acelerograma se expresa como una serie de puntos en los que se indica el tiempo y el valor de aceleración correspondiente. Para lograr una adecuada representación del acelerograma se trabaja usualmente con intervalos de tiempo del orden de 0.01 a 0.05 segundos.

Para determinar la velocidad podemos derivar numéricamente la función de desplazamiento obtenida previamente a partir de la Ecuación 3. Este procedimiento conduce a resultados correctos si se adopta un intervalo de tiempo para la derivación suficientemente pequeño (usualmente se emplea el mismo intervalo de tiempo Δt adoptado para la integración de la Ecuación 3).

Finalmente, para calcular la historia de aceleraciones podemos derivar numéricamente la velocidad. Sin embargo, siguiendo este procedimiento obtendremos la aceleración relativa $\ddot{u}(t)$, dado que $u(t)$ es el desplazamiento relativo. Debemos recalcar, que a los efectos del diseño sismorresistentes, nos interesa determinar la fuerza de inercia actuante sobre la masa vibratoria que se relaciona con la aceleración total. Por esta razón, resulta más conveniente determinar la aceleración total, $\ddot{u}^t(t)$, a partir de la ecuación de equilibrio dinámico para sistemas de un grado de libertad sometidos a la acción sísmica:

$$\ddot{u}^t(t) = - \left[2 \xi \omega_n \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) \right] \quad (4)$$

La integración numérica de la Ecuación 3 y el cálculo de derivadas nos permiten determinar la historia de desplazamiento relativo, velocidad relativa y aceleración total para cada periodo T_n . Una vez que se hemos determinado la variación en el tiempo de los parámetros de respuesta elástica, buscamos los valores máximos (en valor absoluto) y determinamos las ordenadas de los espectros de desplazamiento relativo, S_D , de velocidad relativa, S_V , y de aceleración total, S_A :

$$S_D = \max |u(t)|, \quad S_V = \max |\dot{u}(t)|, \quad S_A = \max |\ddot{u}^t(t)| \quad (5)$$

Para construir un espectro completo repetimos el procedimiento indicado para estructuras con distintos periodos T ; normalmente los espectros se grafican considerando un rango de periodos de vibración que varía entre 0 y 3.0 o 5.0 segundos, que comprende la mayoría de las construcciones comunes. Las curvas se construyen para valores constantes del factor de amortiguamiento ξ , por ejemplo, 0, 2 y 5%.

La Figura 5 presenta algunos los espectros de respuesta para el registro del terremoto de Caucete, San Juan, de 1977, los cuales fueron determinados para diferentes valores de amortiguamiento. En estos gráficos se incluyen curvas espectrales para el caso de amortiguamiento nulo, el cual no tiene aplicación práctica, pero sirve para mostrar la significativa influencia en la respuesta de este parámetro. Podemos observar que el amortiguamiento tiene un efecto benéfico sobre la respuesta estructural dado que reduce los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración máxima. Esto se debe a que por acción del amortiguamiento se disipa energía, generalmente en forma de calor y sonido, disminuyendo así la vibración de la estructura.

La observación de la Figura 5 muestra también que, en cierto rango de periodos, se produce una amplificación del movimiento del suelo. Para el terremoto de Caucete, 1977, los valores máximos de movimiento del suelo fueron: aceleración = 0.193g, velocidad = 0.203 m/s y desplazamiento = 0.186 m. Es decir que la estructura vibra y experimenta aceleraciones, velocidades y desplazamientos que pueden ser significativamente mayores que los correspondientes al movimiento del suelo. Aclaramos que en la bibliografía y en los reglamentos de diseño es usual indicar el periodo de vibración como "T" (en lugar de T_n).

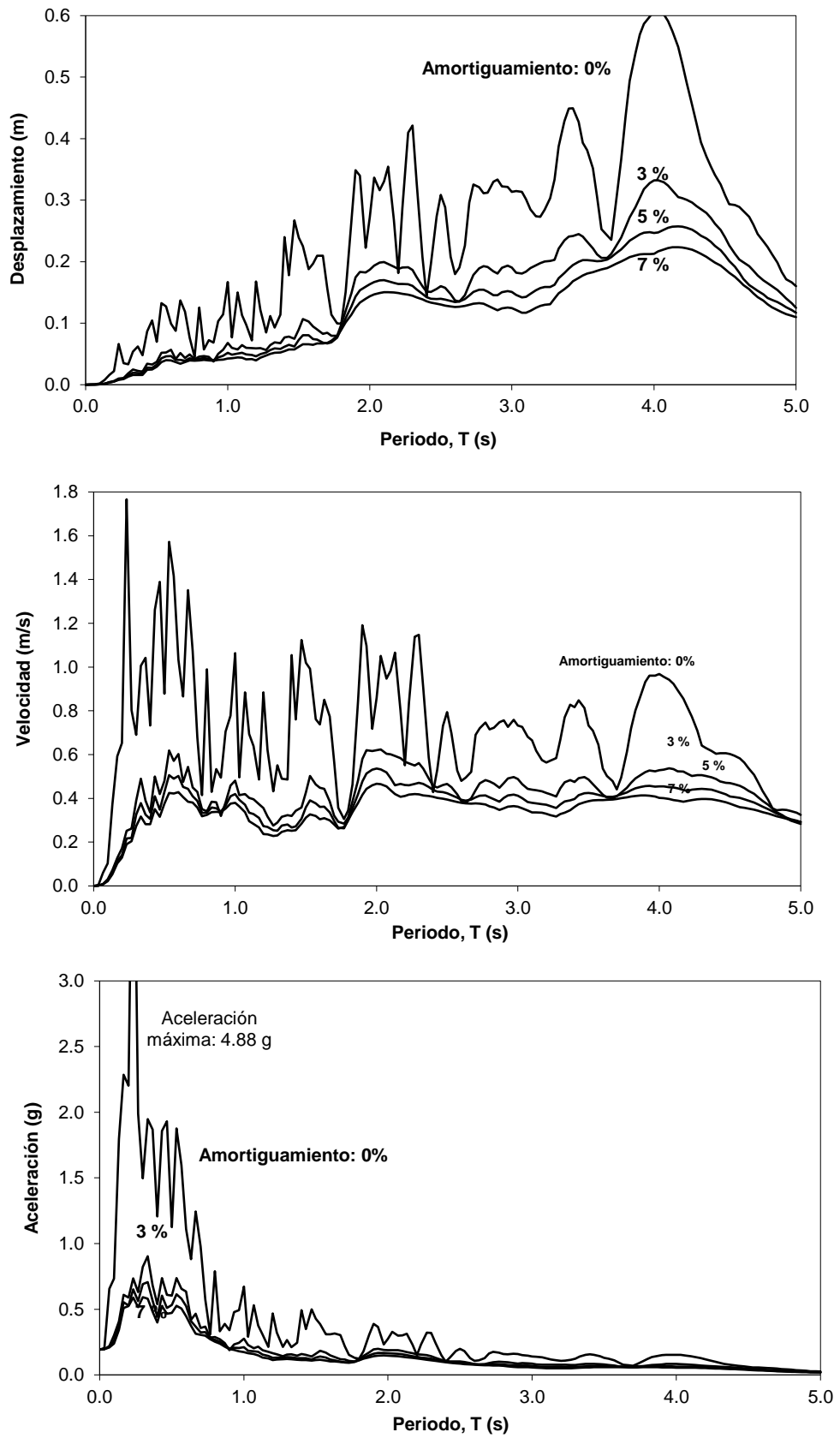


Figura 5. Ejemplo de un espectro de aceleración espectral para distintos valores del factor de amortiguamiento

Si analizamos, por ejemplo, el espectro de aceleraciones vemos que una estructura con un amortiguamiento del 5% y un periodo de vibración de 0.5s experimentará una aceleración máxima de 0.53g si fuera sometida a ese terremoto. Una estructura similar, pero con un periodo de 4.0 s será sometida una aceleración máxima de 0.06g, un valor significativamente menor. Esto indica claramente que la acción sísmica sobre la construcción depende no solo de las características del terremoto sino también de las propiedades estructurales. Estos aspectos se ponen en evidencia, por ejemplo, en el caso de edificios con aisladores sísmicos, con los cuales se logra aumentar significativamente el periodo de vibración de la construcción, “alejando” a la misma de la zona de aceleraciones espectrales elevadas.

En la Sección 2, mencionamos que existen distintos tipos de espectros, siendo uno de ellos los espectros de respuesta inelástica. Estos espectros no pueden calcularse a partir de integración de la Ecuación 3, que es válida solo para sistemas lineales y elásticos donde la fuerza restitutiva (asociada al desplazamiento relativo) es igual a $k u$. Para obtener los espectros inelásticos es necesario integrar la ecuación de equilibrio dinámico considerando que la rigidez k varía en el tiempo dependiendo la historia previa (ver Figuras 3 y 4). El estudio detallado de los métodos de la dinámica no-lineal escapa del alcance de este trabajo.

3.2 Espectros de pseudo-velocidad y pseudo-aceleración

Las construcciones civiles comunes exhiben factores de amortiguamiento ξ menores del 10%, con valores típicos comprendidos entre el 2 y 7 %³, dependiendo del material, tipología estructural, uniones y nivel de sollicitación. Este hecho nos permite realizar ciertas simplificaciones, que no tienen una fundamentación matemática muy rigurosa, pero que son de utilidad desde el punto de vista práctico.

La primera conclusión importante podemos obtenerla en base a consideraciones energéticas. En un sistema lineal y elástico no amortiguado, la energía que el terremoto entrega a la estructura se transforma energía cinética y energía de deformación y no existe disipación de energía. Para este caso particular, el valor máximo de la energía cinética tiene que ser igual al máximo de la energía de deformación elástica:

$$E_{c,\max} = E_{s,\max} \rightarrow \frac{m \dot{u}_{\max}^2}{2} = \frac{k u_{\max}^2}{2} \quad (6)$$

A partir de la Ecuación 6 puede determinarse una velocidad máxima que no es exactamente igual a la que obtenemos derivando el desplazamiento en función del tiempo debido a las hipótesis simplificadoras consideradas. Por ser un valor aproximado se denomina pseudo-velocidad:

$$\dot{u}_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}} u_{\max} = \omega_n u_{\max} \quad (7)$$

Introduciendo el concepto de espectro, definimos la pseudo-velocidad espectral, S_{pv} , de acuerdo a la siguiente expresión:

³ Con el uso de sistemas especiales de disipación de energía, tales como la incorporación de amortiguadores viscosos o de otro tipo, es posible aumentar el factor amortiguamiento global de la construcción a valores significativamente mayores.

$$S_{pV} = \omega_n S_D \tag{8}$$

Podríamos demostrar que para sistemas con bajo amortiguamiento las diferencias numéricas entre la velocidad espectral, definida por la Ecuación 5, y la pseudo-velocidad son despreciables (salvo para el caso de periodos de vibración muy grandes). Estas diferencias aumentan a medida que se aumenta el amortiguamiento y pueden llegar al orden del 20% para estructuras con $\xi=0.20$ (ver Figura 6).

En segundo lugar, consideremos la ecuación de equilibrio dinámico y eliminemos el término asociado a las fuerzas de amortiguamiento (dado que hemos asumido que este efecto no es significativo):

$$m \ddot{u}^t(t) + k u(t) = 0 \tag{9}$$

Despejando la aceleración total y reemplazando el valor de la frecuencia ($\omega_n^2 = k/m$) obtenemos:

$$\ddot{u}^t(t) = - \frac{k}{m} u(t) = - \omega_n^2 u(t) \tag{10}$$

La aceleración total calculada con la Ecuación 10 desprecia en su determinación las fuerzas de amortiguamiento viscoso y por ello se la llama pseudo-aceleración (es una aproximación). Aplicando el concepto de espectros, que se expresa en la Ecuación 5, y de acuerdo a la Ecuación 10, podemos definir el espectro de pseudo-aceleración, S_{pA} , en función del espectro de desplazamiento, S_D :

$$S_{pA} = \omega_n^2 S_D \tag{11}$$

La comparación de resultados entre valores de aceleración y pseudo-aceleración, ver Figura 6, indica que las diferencias numéricas son poco significativas desde el punto de vista ingenieril. Por lo tanto, la Ecuación 11 puede usarse sin inconvenientes para aplicaciones prácticas.

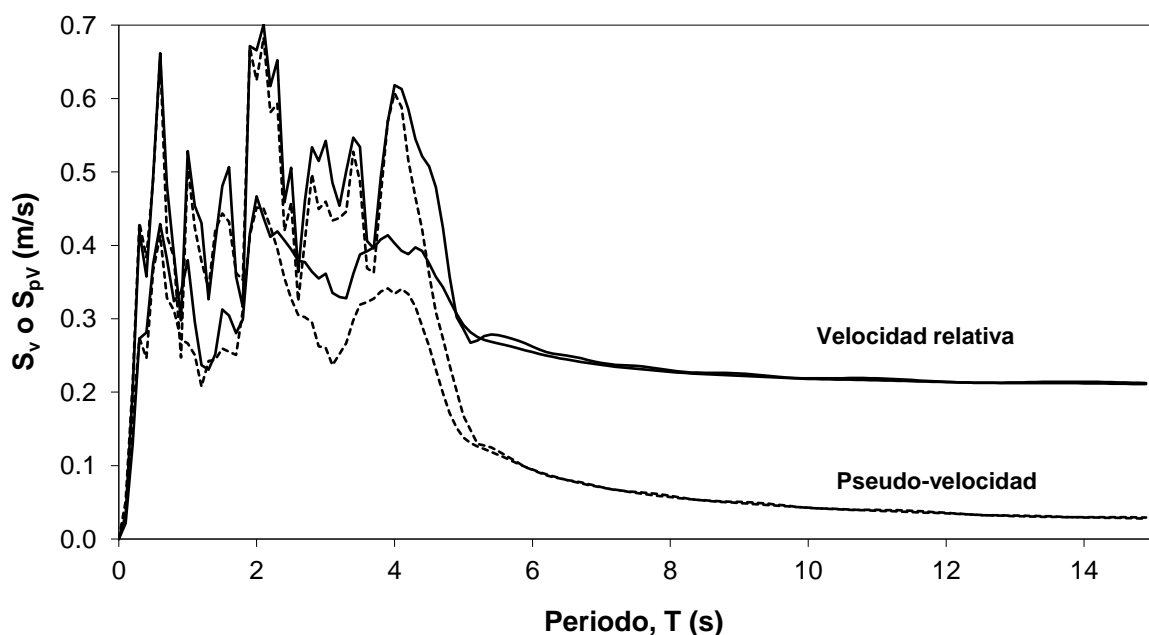


Figura 6. Comparación de espectros de velocidad relativa y pseudo-velocidad para el terremoto de Cauçete, 1977 (factores de amortiguamiento del 2 y 7%).

Combinando las Ecuaciones 8 y 11 encontramos la relación que vincula la pseudo-aceleración con la pseudo-velocidad:

$$S_{pA} = \omega_n S_{pV} \quad (12)$$

Las Ecuaciones 8, 11 y 12, si bien son aproximadas, permiten relacionar los tres espectros (desplazamiento, velocidad y aceleración) mediante expresiones simples, de modo que conociendo uno de ellos se pueden calcular fácilmente los otros dos espectros.

$$\frac{S_{pA}}{\omega_n} = S_{pV} = \omega_n S_D \quad (13)$$

Cuando estas ecuaciones fueron desarrolladas, hace muchas décadas atrás, resultaron de gran utilidad porque todos los cálculos se realizaban manualmente. En la actualidad, su importancia es relativa porque disponemos de herramientas computacionales que permiten calcular rápidamente cualquier tipo de espectros, sin necesidad de recurrir a expresiones aproximadas.

Es importante que recordemos que los valores espectrales de desplazamiento y velocidad (S_D , S_V y S_{pV}) están asociados al desplazamiento relativo, mientras que la aceleración espectral (S_A y S_{pA}) representa la aceleración total de la masa vibrante. Sin embargo, es común referirse a ellos simplemente como espectros de desplazamiento, velocidad y aceleración, sin aclarar si se trata de valores relativos o totales.

3.3 Valores límites de los espectros de respuesta

Es conveniente que realicemos ciertas consideraciones conceptuales para determinar los valores límites de los espectros de respuesta. En primer lugar analicemos el caso de una estructura muy rígida, que por lo tanto tendrá un periodo de vibración cercano a cero. Esta estructura vibrará por acción del terremoto, el desplazamiento relativo será prácticamente nulo debido a que no hay deformaciones internas por la gran rigidez de la estructura (ver Figura 7), mientras que el desplazamiento y la aceleración total tenderán a ser iguales a los del terreno. Es decir, que la aceleración total máxima, S_A , será prácticamente igual a la aceleración máxima del terreno, $\ddot{u}_{g \max}$.

Por el contrario, si suponemos ahora el caso de una estructura muy flexible, cuyo periodo de vibración tiende a infinito, el desplazamiento total es nulo (al igual que la aceleración total) porque la masa no vibra por acción del terremoto. Sin embargo, el desplazamiento relativo tiende a ser igual al desplazamiento máximo del terreno. Por lo tanto el desplazamiento y la velocidad espectral tiende a los valores máximos de desplazamiento y velocidad del terreno, $u_{g \max}$ y $\dot{u}_{g \max}$.

Desde el punto de vista práctico, el caso de estructuras muy flexible ($T \rightarrow \infty$) corresponde a periodos de vibración mayores de 10 o 15 s). Los valores límites deducidos previamente pueden verificarse en los espectros de las Figuras 5 y 6 correspondientes al terremoto de Cauçete. Los valores máximos de movimiento del suelo fueron:

$$\ddot{u}_{g \max} = 0.193g \quad \dot{u}_{g \max} = 0.203 \text{ m/s} \quad u_{g \max} = 0.186 \text{ m}$$

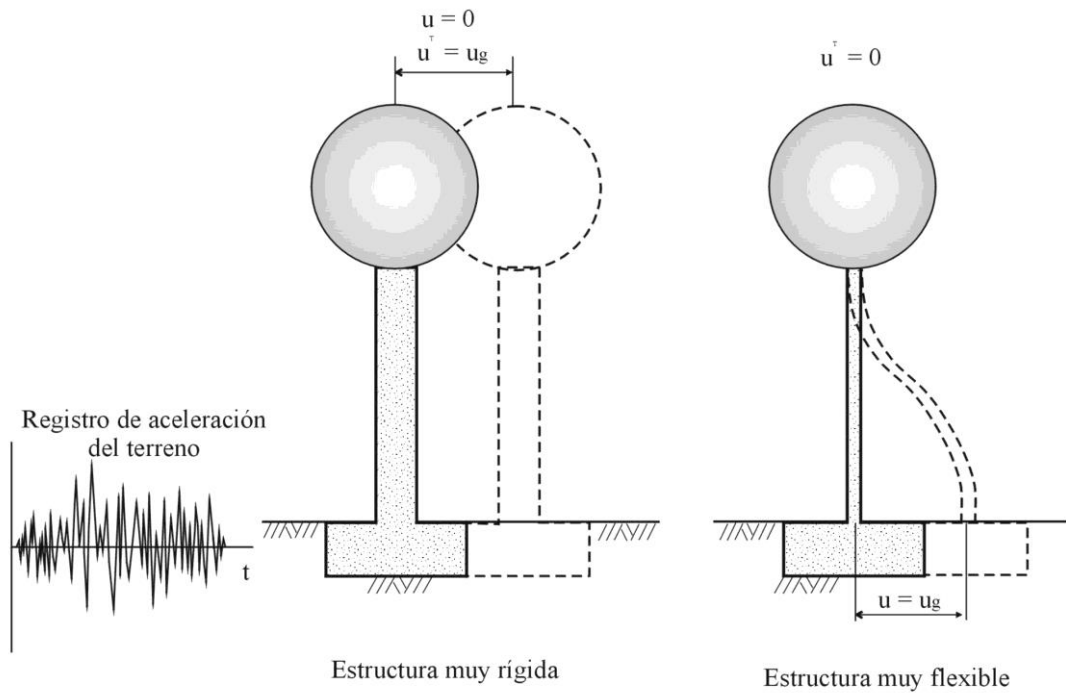


Figura 7. Comportamiento de una estructura muy rígida y muy flexible. De acuerdo a las consideraciones presentadas, se resumen en la Tabla 1 los valores límites.

Tabla 1. Valores límites de los espectros de respuesta

Caso	S_D	S_V	S_{pV}	S_A	S_{pA}
Estructura muy rígida $T \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty$	0	0	0	$\ddot{u}_g \max$	$\ddot{u}_g \max$
Estructura muy flexible $T \rightarrow \infty, \omega \rightarrow 0$	$u_g \max$	$\dot{u}_g \max$	0	0	0

3.4 Formas de representación

Existen distintas formas de representar los espectros. Una de las más usuales es la utilizada en las Figuras 5 y 7 donde se grafica en abscisas el periodo de vibración (o la frecuencia) y en ordenadas el valor espectral, ya sea aceleración, velocidad, desplazamiento u otra variable de interés. Otra forma de representación se basa en una idea de Edward Fisher, quien desarrolló un sistema de representación usando un papel especial, con 4 escalas logarítmicas, que permite presentar en forma compacta una gran cantidad de información. Mediante esta técnica, es posible construir un único gráfico donde se incluyen los espectros de desplazamiento, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración. Ello es posible debido a las simples relaciones que vinculan dichas variables (ver Ecuaciones 8 y 12), las cuales al aplicar logaritmo y reordenar se transforman en:

$$\begin{aligned} \log S_D &= \log S_{pV} - \log \omega_n \\ \log S_{pA} &= \log S_{pV} + \log \omega_n \end{aligned} \tag{14}$$

Debido a que los espectros se grafican en función del periodo de vibración, T (o de la frecuencia ω que es función de $1/T$), las escalas logarítmicas del gráfico pueden ajustarse convenientemente para considerar las operaciones de suma y resta indicadas en la Ecuación 15. Es por ello que se emplea en ordenadas una escala de pseudo-velocidad y dos escalas adicionales, inclinadas 45° respecto del eje de abscisas, para representar el desplazamiento y la pseudo-aceleración. La Figura 8 muestra un ejemplo de representación de espectros en forma combinada mediante el papel logarítmico, mientras que en la Figura 9 se indica esquemáticamente la forma de leer los valores espectrales para un periodo de vibración determinado (2.0 segundos en este caso).

La Figura 8 muestra claramente otro aspecto importante a destacar. Los valores máximos del movimiento del suelo, desplazamiento, velocidad y aceleración, se pueden representar en el gráfico combinado mediante tres rectas (en dicha figura se indican con líneas de trazo). Las curvas de respuesta espectral para distintos valores de amortiguamiento se ubican en general por encima de las líneas que definen el **movimiento del suelo**, indicando así que la vibración propia de la estructura amplifica dicho movimiento. En el rango de periodos bajos la aceleración espectral tiende a la aceleración máxima del suelo y lo mismo ocurre con los desplazamientos en la zona de periodos elevados, cumpliendo así con los límites indicados en la Sección 3.3. Estas tres líneas representan los parámetros del movimiento del suelo, y por lo tanto no constituyen un espectro (son independientes del periodo de vibración T). Sin embargo, es común denominar a estas tres líneas como espectro de base o espectro de suelo.

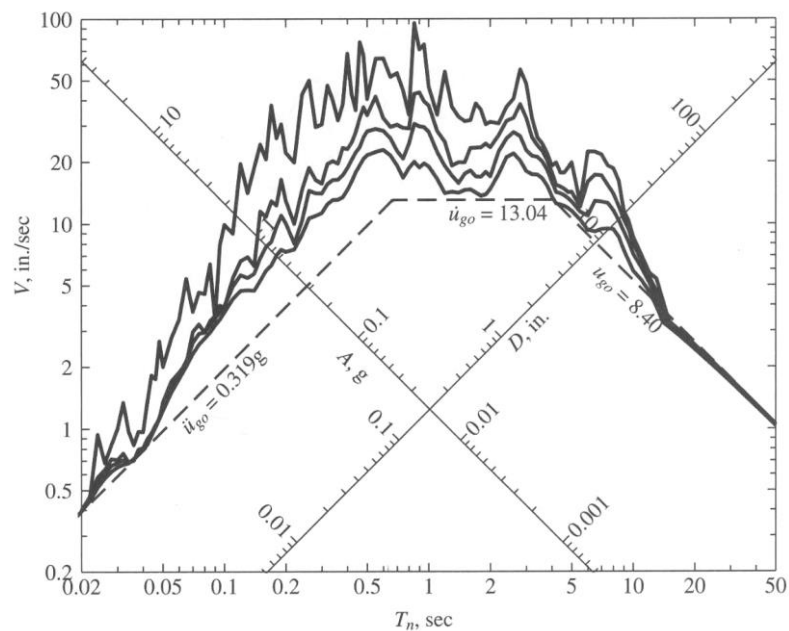


Figura 8. Representación combinada de espectros en papel logarítmico. Registro de El Centro, USA, 1940. Amortiguamiento 0, 2, 5 y 10%.

Debemos recalcar que la representación en papel logarítmico no es un tipo diferente de espectro, sino una alternativa conveniente para graficar en forma unificada tres variables: S_D , S_{pV} y S_{pA} . Esta forma de representación suele utilizarse tanto para espectros de respuesta como para espectros de diseño (ver Sección 4).

Los valores espectrales también pueden representarse mediante un gráfico donde se ubican en abscisas el desplazamiento y en ordenadas la aceleración, mientras que los periodos de vibración se indican mediante líneas oblicuas, como se muestra en la Figura 10. Este tipo de representación se conoce como espectro de capacidad, a pesar de que conceptualmente sería más conveniente llamarlos espectros combinados de aceleración y desplazamiento, o simplemente espectro A-D. La ventaja de este tipo de gráfico es que permite superponer al espectro la curva de capacidad (resistencia lateral-desplazamiento) de la estructura y compararla con la demanda sísmica.

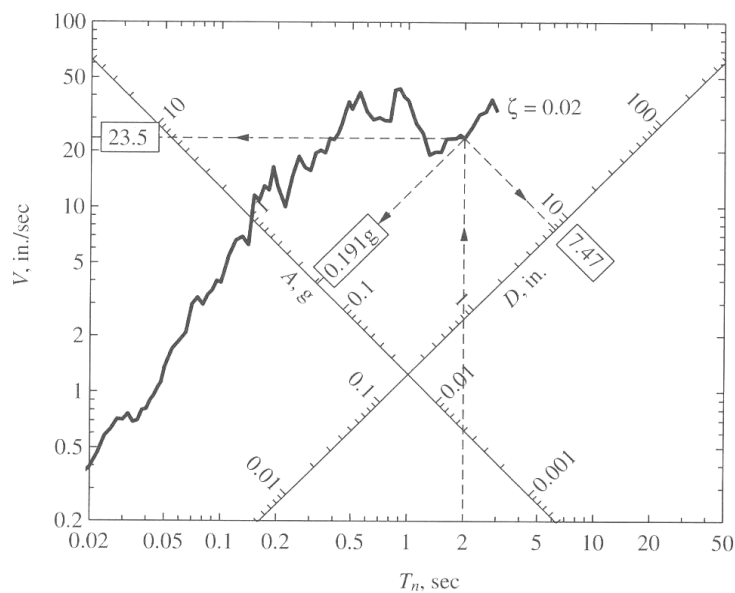


Figura 9. Lectura de valores espectrales en la representación combinada.

3.5 Factores que afectan los espectros de respuesta

Las curvas espectrales dependen, como ya hemos indicado, del periodo de vibración de la estructura y del factor de amortiguamiento considerado. Es obvio, además, que las características particulares del registro de aceleración afectarán también los resultados. Son muchas las variables que pueden influir significativamente sobre los registros de aceleración y por lo tanto sobre los espectros de respuesta. Entre las más importantes podemos mencionar los valores máximos del movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento), contenido de frecuencias del terremoto, duración del movimiento fuerte, mecanismo de generación del terremoto, magnitud, tipo de suelo, etc. Esto se ve reflejado, por ejemplo, en las curvas de aceleración espectral graficadas en la Figura 11 que corresponden a cuatro terremotos diferentes. Puede observarse claramente en esta figura como una misma estructura (igual periodo de vibración e igual factor de amortiguamiento) experimentará aceleraciones máximas notablemente diferentes para los distintos terremotos.

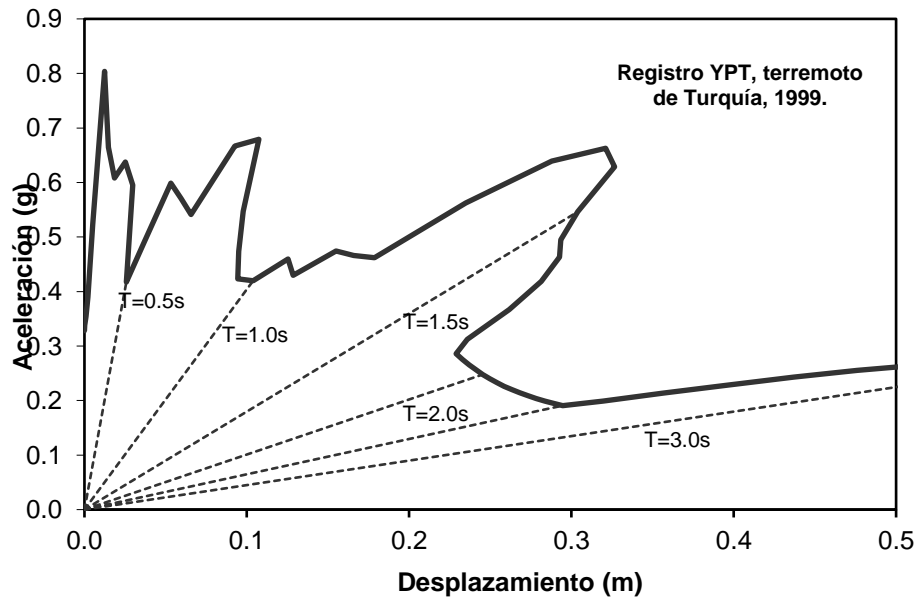


Figura 10. Espectro de respuesta del terremoto de Turquía, 1999, representado como espectro A-D.

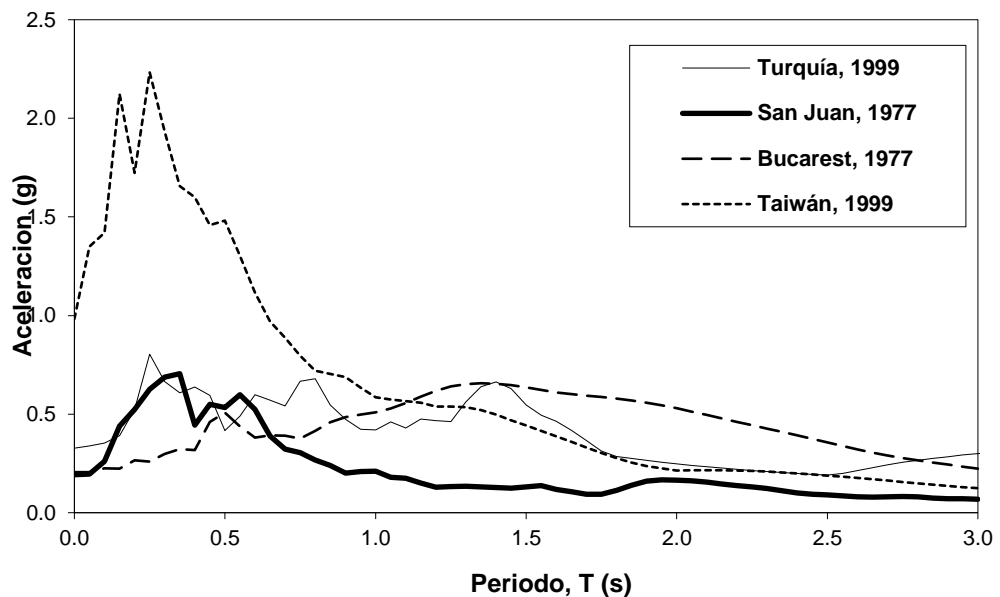


Figura 11. Comparación de espectros de aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento 5%).

Una de las variables de significativa importancia en el diseño sismorresistente es el tipo de suelo. Los estudios realizados con registros de aceleración tomados en distintos terremotos y en distintos lugares muestran que en estratos suelos blandos puede originarse una amplificación del movimiento con respecto al movimiento medido en la roca o en suelos firmes. Este problema se puso en evidencia durante el terremoto de Michoacán, México, el 19/09/1985 ($M_s = 8.1$) el cual causó solo daño moderado en la zona epicentral, pero fue muy destructivo en la ciudad de México

que se encuentra a más de 350 km del epicentro. La ciudad se encuentra construida sobre tres zonas notablemente diferentes en cuanto a las características del suelo. En esas zonas se contaba con varios instrumentos de medición que registraron las aceleraciones inducidas por el terremoto. La Figura 12 muestra los registros medidos en dos estaciones diferentes, una localizada sobre un estrato rocoso y la otra ubicada sobre un estrato de arcillas blandas (SCT) en la zona que se encuentra construida sobre un antiguo lago seco. En esa figura, podemos observar claramente las diferencias significativas de ambos registros. Su efecto en los espectros de respuesta se pone en evidencia en la Figura 13.

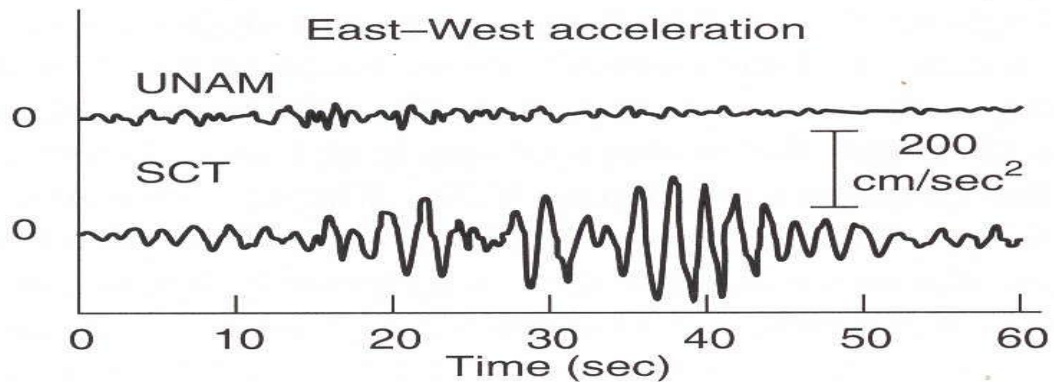


Figura 12. Registros de aceleración medidos en el terremoto de Michoacán en dos sitios diferentes de la ciudad de México.

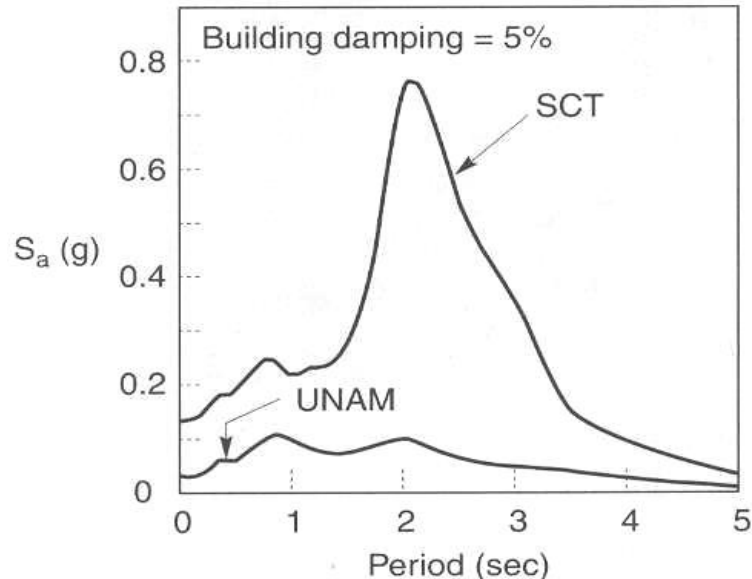


Figura 13. Espectros de aceleración correspondientes a los registros de la Figura 10 (terremoto de Michoacán, México, 1985).

La Figura 14 muestra resultados de un estudio conducido por Seed donde se obtuvieron curvas de aceleración espectral para distintos tipos de suelos. Las distintas curvas de este gráfico, las cuales se derivaron considerando el promedio de un número significativo de terremotos, muestran la significativa influencia del terreno de fundación, especialmente sobre el rango de periodos de

vibración en el cual se producen las mayores aceleraciones espectrales. Debemos notar que en este gráfico las aceleraciones espectrales se presentan en forma relativa, es decir divididas por la aceleración máxima del suelo. Es por ello que todas las curvas parten de un valor unitario para el caso de periodo de vibración nulo.

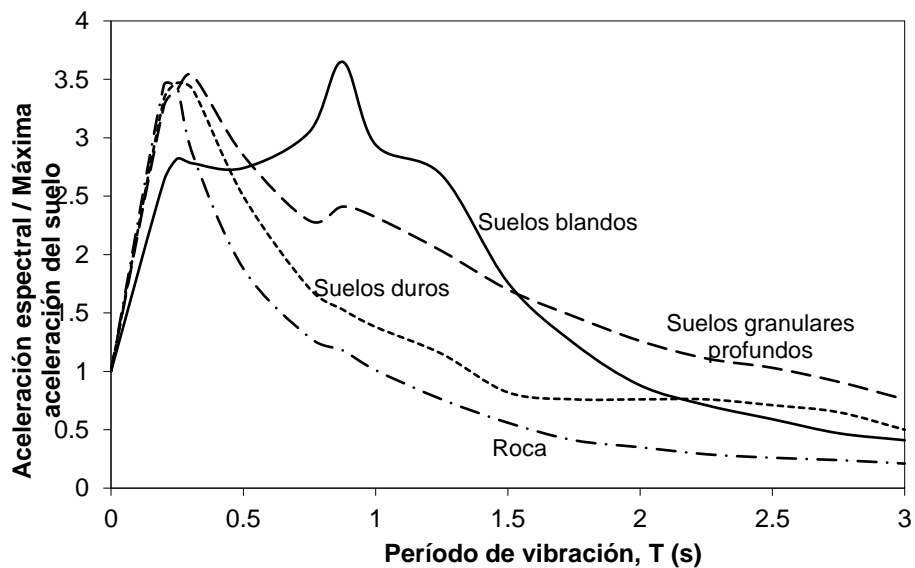


Figura 14. Espectros promedios para distintos tipos de suelo (factor de amortiguamiento 5%).

4. ESPECTROS DE DISEÑO

4.1 Espectros de diseño de aceleración

En la Sección 2 hemos descrito en forma general los espectros de diseño y ahora analizaremos en mayor detalle este concepto. Los espectros son una herramienta de gran utilidad en el diseño de construcciones sismorresistentes debido a que el ingeniero estructural puede estimar el valor máximo de la respuesta (usualmente en términos de aceleración) sin necesidad de evaluar la historia temporal completa. Sin embargo, en el diseño de estructuras no pueden utilizarse los espectros de respuesta ya que ellos se obtienen para un terremoto dado. Las curvas espectrales para diseño deben considerar el efecto de varios terremotos, es decir deben ser representativos de la sismicidad propia de cada región.

Se han desarrollado varios métodos, basados en procedimientos (i) estadísticos (determinísticos) o (ii) probabilísticos, para obtener los espectros de diseño. El procedimiento más simple es considerar los espectros de respuestas de varios terremotos representativos y luego determinar el valor promedio más la desviación estándar de los espectros de respuesta. Si los valores de los espectros de respuesta son similares, la desviación estándar es baja y la curva espectral se asemeja al promedio. Por el contrario, si los valores presentan diferencias significativas, la desviación estándar es alta y la curva espectral se acerca al valor máximo, o incluso puede superarlo. De modo que este procedimiento tiene en cuenta la mayor o menor dispersión de los datos y conduce a resultados confiables. En la Figura 15 se presenta el espectro promedio y promedio más la desviación estándar construido a partir de los cuatro espectros de respuesta de la Figura 11. Puede observarse claramente que la definición del espectro de diseño a partir de

valores promedio conduce a resultados poco seguros en la mayoría de los casos para los datos considerados. Este es un simple ejemplo didáctico dado que los cuatro terremotos considerados corresponden a regiones y fuentes sismogénicas totalmente diferentes.

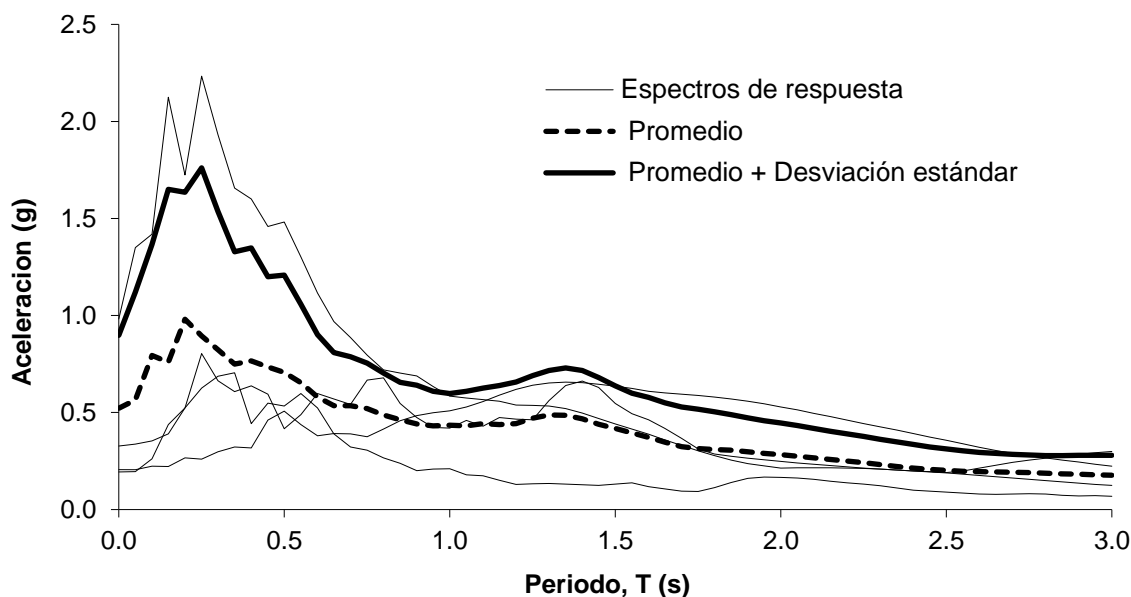


Figura 15. Ejemplo de determinación del espectro de diseño a partir de cuatro espectros de respuestas.

A los efectos del diseño resulta conveniente que las curvas espectrales se suavicen con líneas envolventes para evitar los valles o variaciones bruscas que surgen de las formas complejas que presentan los espectros de respuesta. Es por ello que los espectros de diseño que definen los códigos están formados por una serie de líneas o curvas, las cuales pueden expresarse mediante ecuaciones simples. Los espectros de diseño de aceleración suelen presentar una rama lineal creciente (con origen en el valor de aceleración máxima del terreno, ver Sección 3.3), luego una zona de aceleración constante, o plafón, con un valor 2 a 3 veces superior a la aceleración máxima del terreno y finalmente una o más curvas decrecientes.

La metodología descrita previamente es simple y muestra claramente el concepto de espectro de diseño y su diferencia con los espectros de respuesta. Sin embargo, **no es la metodología que usualmente se aplica en la actualidad para determinar los espectros de diseño especificados en los reglamentos, que se basan en un criterio probabilístico**. La descripción de estos procedimientos escapa a los alcances de esta guía de estudio (para profundizar sobre el tema puede consultarse la Referencia 5).

En Argentina, el Reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte I, 2013, define los espectros de diseño a partir de un procedimiento similar al que utiliza el reglamento norteamericano ASCE/SEI 7 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Este reglamento define un espectro de aceleraciones correspondiente al terremoto máximo considerado (MCE, por las siglas en inglés de *Máximum Considered Earthquake*), definido como el máximo terremoto que razonablemente

puede esperarse que ocurra en un determinado lugar. Se caracteriza como un sismo con una probabilidad uniforme de excedencia del 2% en 50 años (periodo de retorno de 2475 años).

A los efectos de definir la acción sísmica para estructuras sismorresistentes convencionales, el ASCE/SEI 7 utiliza un terremoto de diseño (DBE, por las siglas en inglés de *Design Basis Earthquake*), para lo cual se reducen las ordenadas espectrales del terremoto máximo considerado por 2/3. A este terremoto se le asigna una probabilidad de excedencia del 10% en (periodo de retorno de 50 años (periodo de retorno de 475 años).

El periodo de retorno T_R (o intervalo de recurrencia) se define como la inversa de la probabilidad de excedencia anual, p_a , de modo que $T_R=1/p_a$. Es usual, sin embargo, indicar la probabilidad de excedencia, p_t , durante un cierto periodo de tiempo t (por ejemplo: 50 años). En este caso, puede demostrarse que $T_R = -t / \ln(1- p_t)$

El Reglamento INPRES-CIRSOC 103, Parte I, 2018 define un espectro de diseño, considerando una zonificación sísmica de todo el país en 5 zonas, según sea el grado de amenaza sísmica, como se muestra en la Figura 16. La zona 0 corresponde a la de menor amenaza, mientras que la zona 4 (que incluye el Norte de Mendoza y Sur-Centro de San Juan) representa la de mayor sismicidad.

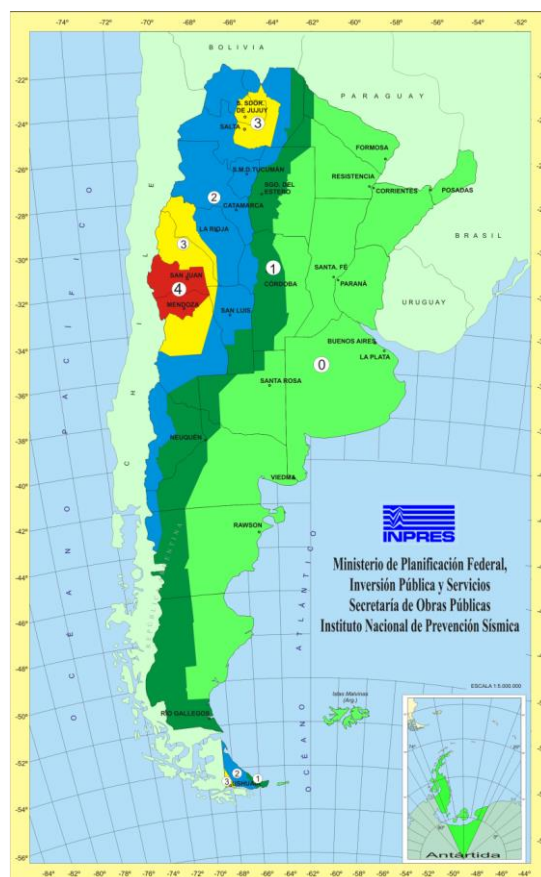


Figura 16. Zonificación sísmica de la República Argentina en cinco zonas.

Además, este reglamento clasifica el sitio de construcción en 6 tipos diferentes (SA, SB, SC, SD, SE, SF), para considerar de esta forma la influencia del suelo de fundación en la respuesta dinámica de la estructura. El tipo de sitio SA representa el caso de fundación en roca dura, mientras que en el otro extremo el sitio SF corresponde al caso de suelos dinámicamente inestables que requieren un estudio especial (para los cuales el reglamento no define el espectro de diseño). Desde el punto de vista práctico, es importante aclarar que la clasificación del sitio se realiza a partir de los resultados de un estudio de suelo, en términos de velocidad media de propagación de las ondas de corte, número de golpes del ensayo de penetración normalizado y resistencia media al corte no drenado.

Para definir el espectro de diseño para una obra determinada según el Reglamento INPRES-CIRSOC 103 se deben determinar tres parámetros característicos (las aceleraciones C_a y C_v y el periodo T_3) según el siguiente procedimiento:

- a) Determinar la zona sísmica a partir del mapa de zonificación (que se presenta en la Figura 16). El reglamento dividido a la Argentina en 5 zonas. Los espectros se determinan en las zonas 1 a 4 (en la zona 0 no se calcula el espectro).
- b) Clasificar el sitio según el tipo de suelo y con ello se adopta el tipo espectral, según el criterio que se muestra en la primer columna de la Tabla 2: el tipo espectral 1 comprende los sitios S_A , S_B y S_C , el tipo espectral 2 el sitio S_D y el tipo espectral 3 el sitio S_F (como se indicó previamente, el sitio S_F requiere de estudio especiales y el reglamento no define un espectro para este caso).
- c) Determinar los valores de los coeficientes C_a y C_v , que son dos parámetros auxiliares para definir la forma espectral. Por ejemplo, para zona sísmica 4 y tipo espectral 2, se obtiene de la Tabla 2: $C_a=0.40 N_a$ y $C_v=0.59 N_v$. Es importante aclarar que N_a es un coeficiente de proximidad a fallas para la zona del espectro sensible a la aceleración (zona de periodos bajos) y N_v es un coeficiente de proximidad a fallas para la zona del espectro sensible a la velocidad (zona de periodos intermedios). En el reglamento INPRES-CIRSOC 103, estos coeficientes se adoptan con un valor constante de $N_a = 1.0$ y $N_v = 1.2$, dado que en nuestro país no se dispone de suficiente información sobre terremotos pasados como para calibrar adecuadamente dichos coeficientes. Se espera en el futuro contar con datos para
- d) Definir el periodo característico T_3 , a partir de una tabla incluida en el reglamento (ver Tabla 3). Este periodo corresponde al punto de transición entre la tercer y cuarta curva del espectro de diseño, según se explica en el párrafo siguiente.

Tabla 2. Valores de C_a y C_v , según Tabla 3.1 del INPRES-CIRSOC 103, Parte I.

Tipo Espectral (Sitio)	Zona Sísmica							
	4		3		2		1	
	$a_s = 0,35$		$a_s = 0,25$		$a_s = 0,15$		$a_s = 0,08$	
	C_a	C_v	C_a	C_v	C_a	C_v	C_a	C_v
1 (S_A, S_B, S_C)	$0,37N_a$	$0,51N_v$	$0,29N_a$	$0,39N_v$	0,18	0,25	0,09	0,13
2 (S_D)	$0,40N_a$	$0,59N_v$	$0,32N_a$	$0,47N_v$	0,22	0,32	0,12	0,18
3 (S_E)	$0,36N_a$	$0,90N_v$	$0,35N_a$	$0,74N_v$	0,30	0,50	0,19	0,26

Tabla 3. Valor del periodo T3, según Tabla 3.2 del INPRES-CIRSOC 103, Parte I.

Zona sísmica	T_3 (s)
4	13
3	8
2	5
1	3

El espectro de aceleraciones de diseño está definido por una serie de 4 curvas: un tramo inicial de variación lineal donde la aceleración espectral crece en forma directamente proporcional al periodo T, un plafón de aceleración espectral constante, y luego dos curvas decrecientes que son proporcionales a la inversa del periodo T. Todos los parámetros necesarios para construir el espectro de diseño se determinan a partir de los valores de C_a , C_v y T_3 , los que se obtienen de las tablas indicadas previamente. En la Figura 17 se grafica la forma espectral y se indican las ecuaciones de cada una de las cuatros partes que integran el espectro y de otros parámetros, como los periodos T_1 y T_2 . Se observa en esta figura que los periodos característico T_1 , T_2 y T_3 representan los periodos de transición entre las distintas partes del espectro. A modo de ejemplo, la Figura 18, muestra los tres espectros de diseño para la zona sísmica 4.

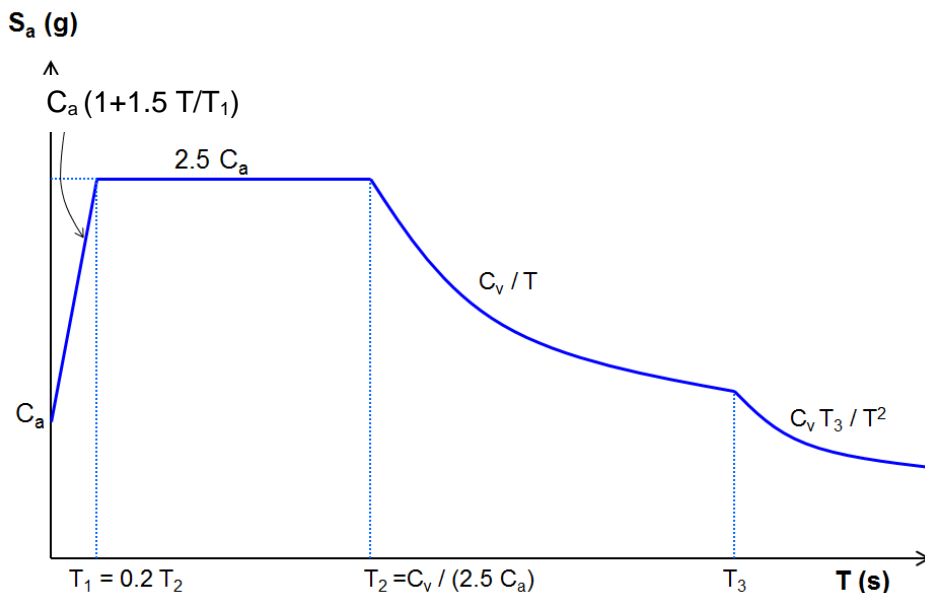


Figura 17. Características generales del espectro de aceleraciones definido por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103.

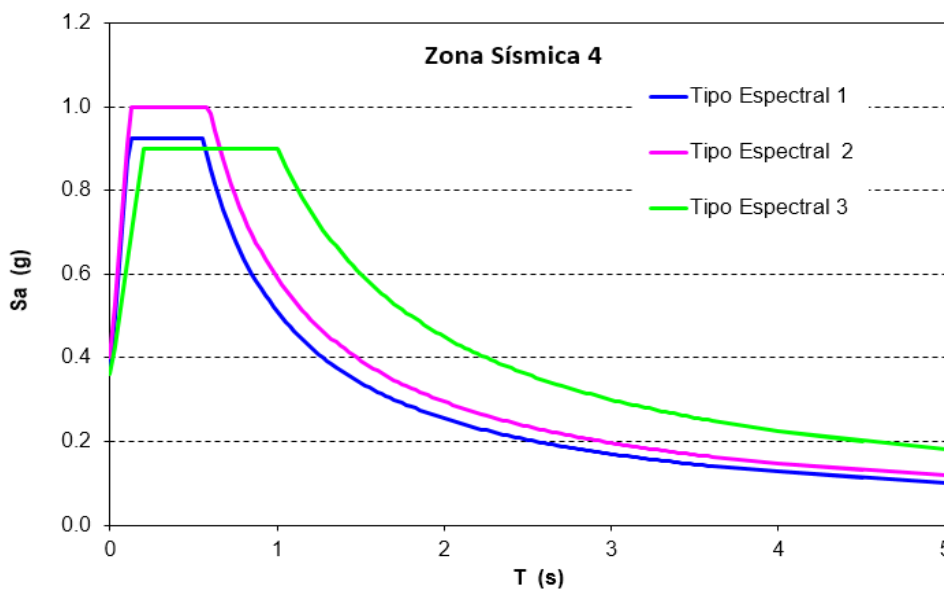


Figura 18. Espectros de diseño del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 para zona sísmica 4, con los tipos espectrales 1, 2 y 3.

Los espectros de diseño definidos por el reglamento corresponden a un estado límite último y definen acciones sísmicas en rango elástico. Los códigos de diseño sismorresistente actuales admiten que la estructura cuenta con sobrerresistencia y además es capaz de disipar energía por comportamiento inelástico. Por esta razón, los valores de aceleración espectral deben disminuirse mediante un factor de reducción, R , que depende principalmente de la ductilidad del sistema estructural y de la sobrerresistencia estructural. Los fundamentos en los que se basa el cálculo de estos factores de reducción, como así también su evaluación práctica según el reglamento son aspectos de gran importancia, pero escapan a los alcances de esta guía.

El espectro de aceleraciones de diseño se usa en el método dinámico de análisis modal espectral para definir la acción sísmica. En este caso, las aceleraciones espectrales para cada modo se determinan mediante la siguiente expresión:

$$S_a \gamma_d / R \quad (15)$$

donde γ_d es el factor de riesgo, que depende del destino de la construcción.

En el método estático, el corte basal, V_o , a partir del cual se calculan las fuerzas sísmicas equivalentes, se determina como:

$$V_o = C W \quad (16)$$

donde C es el coeficiente sísmico y W es la carga gravitatoria total considerada para la evaluar la acción sísmica (incluye las cargas permanentes de peso propio y un porcentaje de las sobrecargas de servicio y nieve). El coeficiente sísmico, que puede interpretarse como la aceleración espectral dividida la aceleración de la gravedad g , se determina como:

$$C = 2.5 C_a \gamma_d / R \quad \text{para } T \leq T_2 \quad (17a)$$

$$C = S_a \gamma_d / R \quad \text{para } T > T_2 \quad (17b)$$

$$C \geq 0.8 a_s N_v / R \quad \text{para zona sísmicas 3 y 4} \quad (17c)$$

Las distintas variables que intervienen en las Ecuaciones 18 fueron descritas previamente (ver Tabla 2 y Figura 17). Se desprende de estas ecuaciones que la aceleración espectral definida para calcular el coeficiente sísmico no incluye la recta inicial de variación lineal proporcional al periodo de vibración y además presenta un valor mínimo constante (independiente del periodo) en la zona de periodos altos. En la Figura 19 se grafican los valores de S_a para el cálculo del coeficiente sísmico correspondiente a zona sísmica 4.

4.2 Espectros de diseño de desplazamiento

A partir de la década de 1990 se ha desarrollado un nuevo criterio de diseño para construcciones sismorresistentes que se basa en desplazamientos. Es decir que el ingeniero estructural en lugar de evaluar la demanda sísmica en términos de fuerzas laterales (o aceleraciones) realiza el diseño a partir de la demanda de desplazamiento lateral inducida por la acción sísmica. Este nuevo criterio aún no se ha desarrollado completamente, pero se espera que en el futuro reemplace al método tradicional, basado en fuerzas, debido a que permite considerar en forma explícita distintos niveles de daño. El método basado en desplazamientos requiere, obviamente, de un espectro de diseño de desplazamientos. Es por ello que muchos investigadores trabajan actualmente para evaluar y proponer espectros de diseño de desplazamiento.

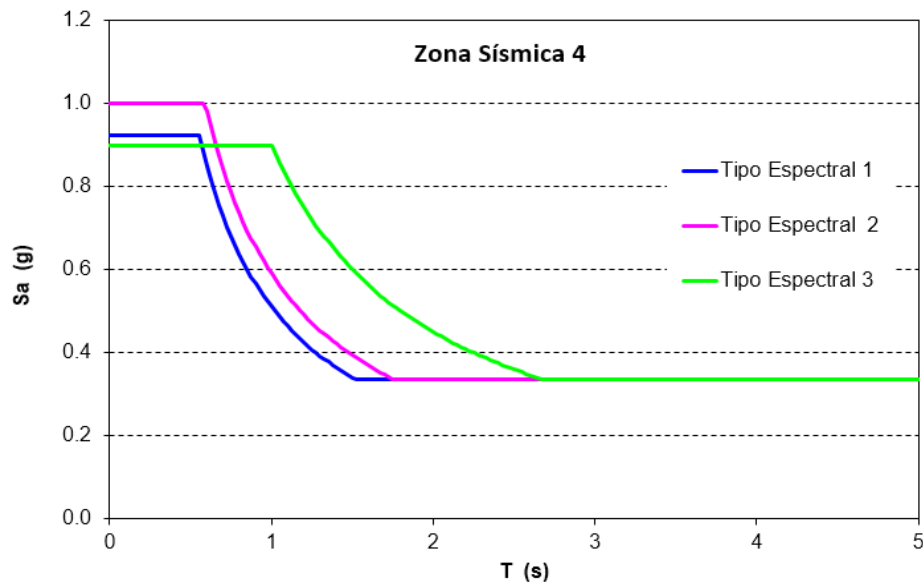


Figura 19. Espectros de diseño para el método estático, zona sísmica 4, Reglamento INPRES-CIRSOC 103.

Una forma de obtener estas curvas espectrales es a partir de los espectros de aceleración; de acuerdo a la Ecuación 10, puede obtenerse que:

$$S_D = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{pA} \tag{18}$$

Sin embargo, es importante aclarar que no todos los espectros de aceleración son compatibles para derivar espectros de desplazamiento. Este es el caso del Código de Construcciones Sismorresistentes de Mendoza, 1987, dado que la rama decreciente para periodos largos conduce a desplazamientos que aumentan linealmente con el periodo de vibración T , lo cual no se corresponde con la realidad. Otros reglamentos, como el INPRES-CIRSOC 103, el ASCE/SEI 7/16 y los Eurocode, incluyen espectros de aceleración que son compatibles con la derivación de espectros de desplazamiento mediante la Ecuación 18. También es probable que en el futuro los códigos incluyan en forma explícita espectros de desplazamiento. La Figura 20, muestra los espectros de desplazamiento, derivados a partir de los espectros de aceleración del INPRES-CIRSOC 103 (Figura 18) con la Ecuación 18.

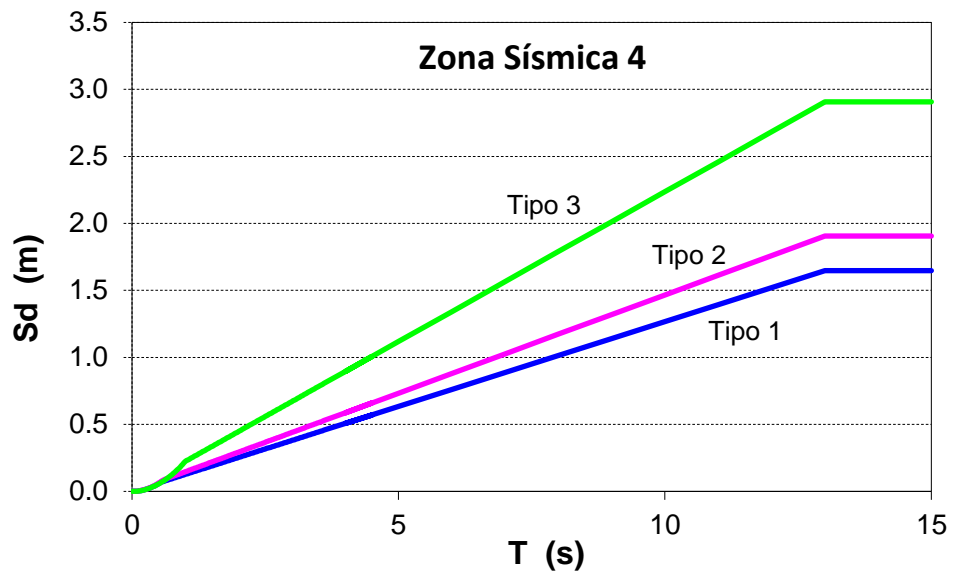


Figura 20. Espectros de desplazamiento derivados del espectro de aceleraciones del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 para zona sísmica 4.

5. ESPECTROS DE PISO

Vamos a plantear ahora un problema asociado al diseño de equipos, elementos especiales o componentes que forman parte de una construcción. Para ello, tomemos como ejemplo la estructura de tres niveles ilustrada en la Figura 21. Ante la acción de un terremoto, la estructura vibrará y normalmente los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración en los distintos niveles serán mayores que los registrados en la base (terreno de fundación). Ello es lógico, como se indicó previamente, debido a que la estructura con su vibración amplifica el movimiento del suelo. Si consideramos un equipo o componente que puede considerarse como un sistema de un grado de libertad con su propio periodo de vibración (representado esquemáticamente en la Figura 21 como un péndulo ubicado en el segundo nivel), es posible determinar un espectro tomando como excitación ya no el registro de aceleración en la base, sino la historia de aceleraciones en el nivel o punto correspondiente. Esta historia de aceleración debe evaluarse previamente mediante un análisis dinámico temporal, en el cual se considera como excitación el registro de aceleración en la base.

Para visualizar mejor el concepto de espectros de piso, se presenta en la Figura 22 un ejemplo para el caso de la estructura de la Figura 21. El gráfico muestra el espectro de respuesta de aceleraciones (indicado como “Base”) para un registro de aceleración generado artificialmente mediante un algoritmo matemático, y tres curvas más correspondientes a los espectros de piso para cada uno de los niveles. Estos espectros nos permiten obtener algunas interesantes conclusiones. En primer lugar se observa claramente que las aceleraciones en el equipo o componente a diseñar pueden ser significativamente mayores, dependiendo de su periodo de vibración, especialmente cuando este se acerca al periodo fundamental de la estructura (para este ejemplo el modo 1 tienen un periodo $T=0.320$ s, ver línea punteada). Esto se explica porque cuando ambos periodos coinciden se produce un fenómeno similar conceptualmente a la resonancia y el equipo o componente amplifica notablemente el movimiento. Un efecto parecido, pero menos

importante, se produce cuando el periodo de vibración del equipo o componente se aproxima a los otros modos de vibración de la estructura (en este ejemplo, $T = 0.104$ y 0.064 s).

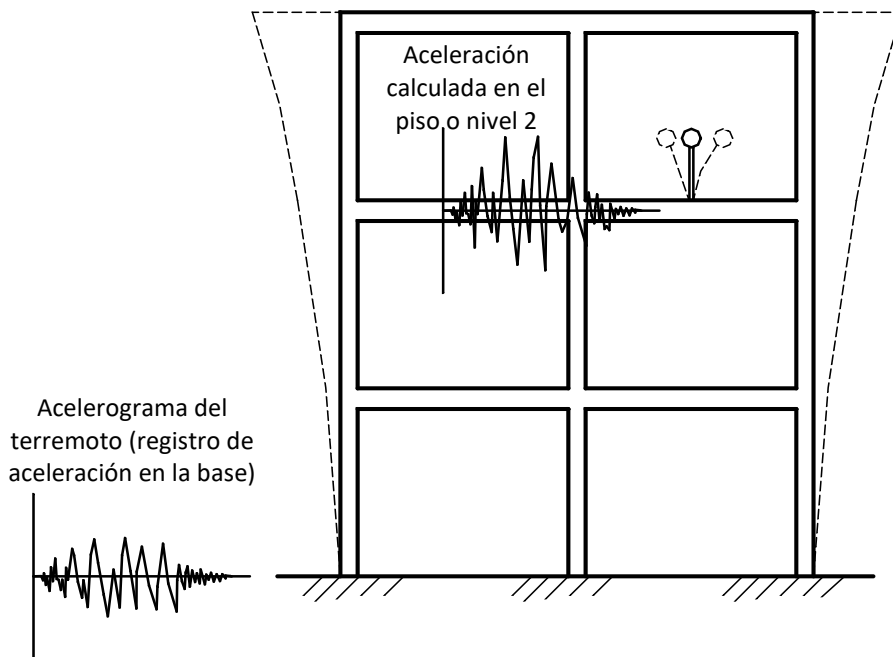


Figura 21. Esquema conceptual del modelo matemático para la obtención de espectros de piso.

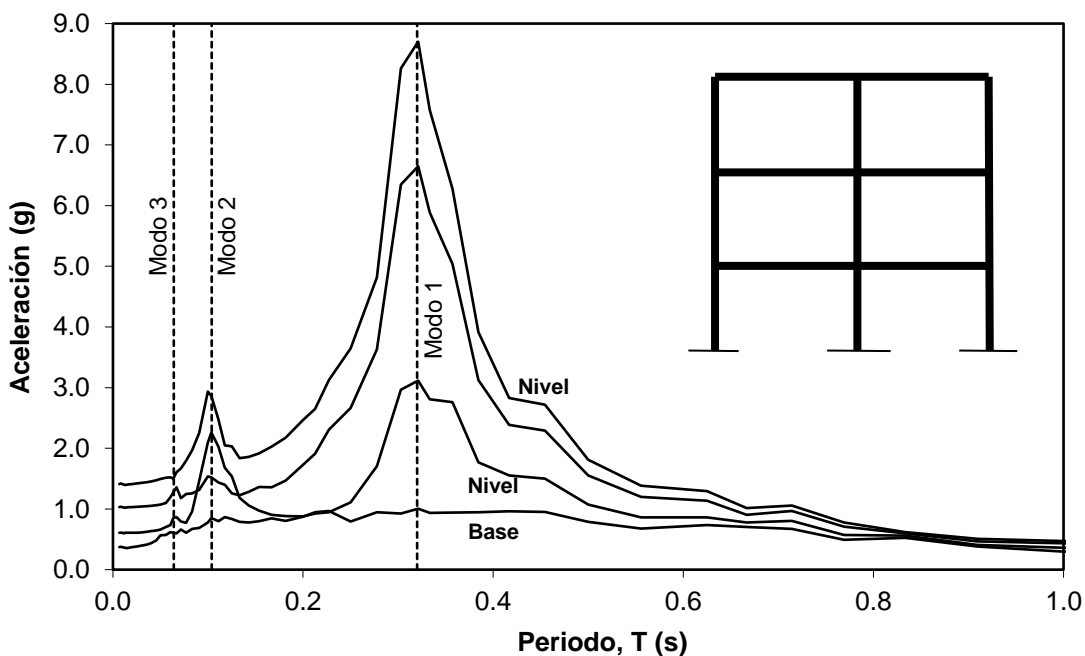


Figura 22. Espectros de piso para distintos niveles de la estructura de la Figura 21.

Se observa también en la Figura 22 que a medida que aumenta la altura del nivel considerado, en general, se incrementan los valores de aceleración del espectro de piso correspondiente. Sin embargo, se detectan algunas excepciones, como el caso del espectro de piso del nivel 1 que para valores cercanos al periodo del modo 2 ($T=0.104$ s) aumenta

considerablemente y supera los valores correspondientes al espectro del nivel 2. Para explicar este comportamiento debemos recordar las formas modales típicas de un pórtico de tres pisos; en este caso el modo 2 exhibe desplazamientos reducidos o casi nulos en correspondencia con el nivel 2. En otras palabras el modo 2 no excita en forma importante al segundo nivel del pórtico, mientras que si lo hace en el primero y tercero.

Finalmente, vemos en el ejemplo que no se producen amplificaciones de importancia en la zona cercana al periodo del modo 3 ($T=0.064s$), lo cual indica que este modo no tiene una participación significativa en la respuesta de la estructura o bien que no es excitado por el terremoto considerado.

Siguiendo los criterios indicados previamente en la Sección 4, es posible derivar espectro s de piso de diseño, los cuales se aplican en casos especiales, por ejemplo hospitales, centrales nucleares, etc., para evaluar la demanda sísmica en equipamiento o partes de la construcción. Para los casos usuales, donde un estudio de este tipo es demasiado largo y costoso, se emplean criterios más simples que tratan de considerar el efecto de amplificación con la altura. Tal es el caso del Reglamento INPRES-CIRSOC, Parte 1, que en el Capítulo 10 Partes de la construcción y componentes no estructurales, fija los criterios mínimos de diseño para componentes que estén fijados a la estructura principal en forma permanente en los casos en que los elementos vinculados tenga un peso de hasta el 25 % del peso sísmico del nivel al que está unido en la estructura principal. Si el peso de los componentes es mayor al 25% se deberá analizar la construcción en su conjunto, incluyendo en el modelo estructural dichos componentes.

6. COMETARIO FINAL

El concepto de espectros, en sus distintas modalidades, es una herramienta de gran utilidad en la ingeniería sísmica, ya sea para comprender y evaluar el efecto de los terremotos sobre las construcciones como así también para estimar la demanda sísmica en el diseño de estructuras. Es por ello que resulta sumamente importante para el ingeniero estructural comprender la teoría que lo fundamenta, la metodología para su obtención, el campo de validez y la forma práctica de empleo.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Clough, R. W. y Penzien, J., *Dynamics of Structures*. Computers & Structures Inc. Second Revised Edition, 2010.
2. Chopra, A., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineer*. Prentice Hall, Inc., 2012
3. The EERI Oral History Series: Georges W. Housner. Earthquake Engineering Research Institute. 1997.
4. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 1996.
5. Dobry, R., Borchardt, R, Crouse, C., Idirs, I., Joyner, W., Martin, G., Power, M., Rinne, E. y Seed, R. "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions" *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No 1, pp 41-67, 2000.