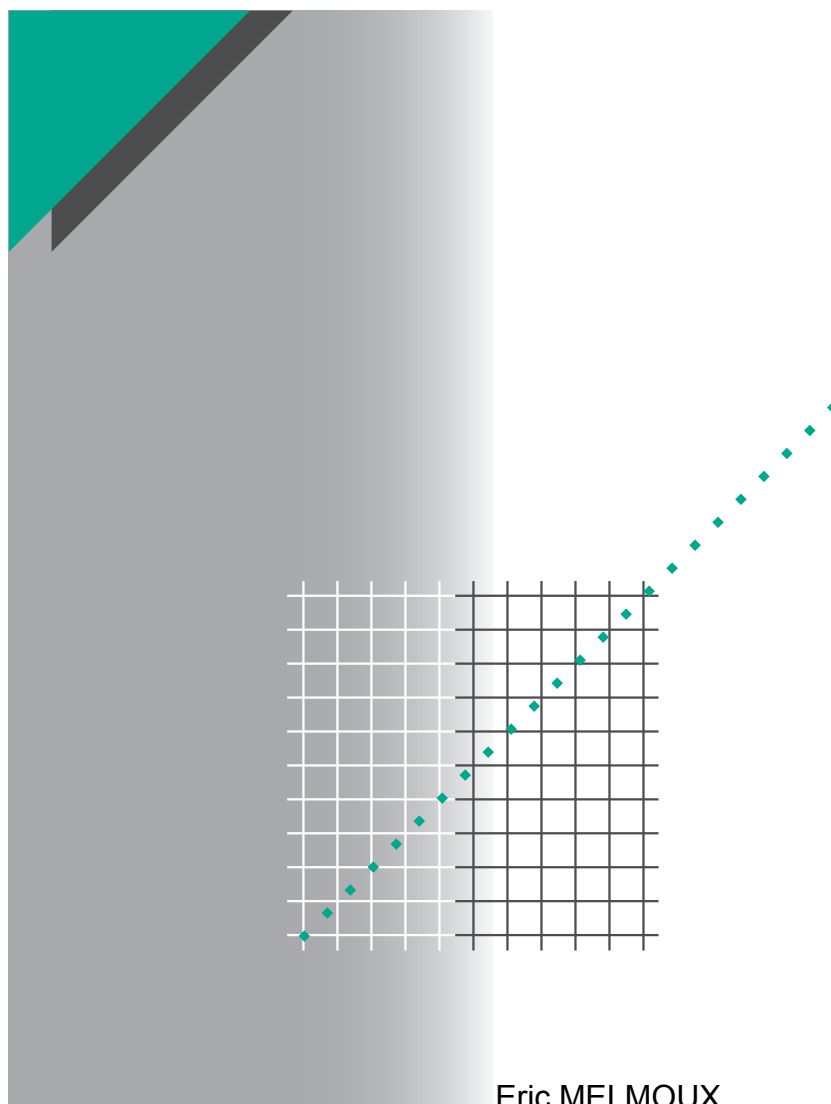


Cuaderno Técnico nº 180

Sacudidas sísmicas y equipos eléctricos



Eric MELMOUX

Merlin Gerin
Telemecanique
Square D
Eunea

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria:
«Reproducción del Cuaderno Técnico nº 180 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 180

Sacudidas sísmicas y equipos eléctricos



Eric MELMOUX

Ingeniero diplomado en 1981 por el INSA de Lión, con la especialidad mecánica, obtiene, el mismo año, un DEA sobre "vibraciones".

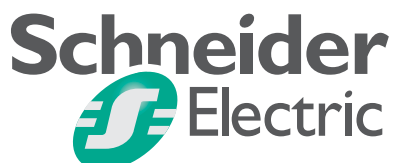
Después de trabajar 10 años en una empresa especializada en estudio de ruidos y de vibraciones, entra Merlin Gerin.

Actualmente es responsable del área de estudio de "choques y vibraciones" de Schneider Electric.

Trad.: José M^a Giró

Original francés: diciembre 1995

Versión española: marzo 2003



Terminología

Acelerograma (time-history):

Registro de la aceleración del suelo durante un seísmo.

Asignación de frecuencia (Frequency appropriation):

Frecuencia de la excitación correspondiente a una frecuencia de resonancia de la estructura elástica.

Adaptación espacial (Space appropriation):

Aplicación de las fuerzas de excitación sobre los vientres de la deformada modal.

Calificación (Qualification):

Proceso que consiste en establecer la capacidad de resistencia de un equipo a determinados esfuerzos específicos o normalizados.

Deformada modal (Modal shape):

Deformación oscilante que toma una estructura elástica cuando se le excita en una de sus frecuencias de resonancia.

Epicentro (Epicenter):

Punto situado sobre la superficie del terreno, en la vertical del hipocentro.

Espectro de respuesta (Response Spectrum):

Mecanismo que permite caracterizar un seísmo por sus efectos sobre una estructura simple.

Hipocentro o foco sísmico (Hypocenter or seismic focus):

Punto de ubicación del seísmo en el interior de la corteza terrestre.

Intensidad (Intensity):

Medida de la fuerza de un seísmo por los efectos que produce (escala de MERCALLI).

Magnitud (Magnitude):

Medida de la fuerza de un seísmo a partir de la energía liberada en el foco (escala de RICHTER).

Mallado (Meshing):

Acción que consiste en descomponer una estructura compleja en sus elementos simples (vigas - chapas - volúmenes).

Ondas LOVE (LOVE Waves):

Corresponden a la componente horizontal de las ondas de superficie.

Ondas RAYLEIGH (RAYLEIGH Waves):

Corresponden a la componente vertical de las ondas de superficie.

Parte alta de un espectro de respuesta (Strong part of response spectrum):

Corresponde a las frecuencias con las que la estructura amplifica los movimientos del suelo.

Parte APN (Zero Period Acceleration ZPA part):

Corresponde, en un espectro de respuesta, a las frecuencias para las que la estructura sigue las aceleraciones del suelo.

Seísmo (Seismic Activity):

Movimiento violento de las placas tectónicas que produce un temblor de la tierra.

Sistema mecánico de 1^{er} orden (Single DOF mechanical system):

Estructura simple con un grado de libertad, caracterizada por una masa, una elasticidad y un amortiguamiento.

SMHV (MHV):

Seísmo Máximo Histórico Verosímil de un lugar.

SMS (SSE):

Máximo Seísmo de Seguridad (SMHV medido en grados de la escala MERCALLI).

Sacudidas sísmicas y equipos eléctricos

En todos los países existen o zonas de actividad sísmica significativa o instalaciones que requieren una gran seguridad de funcionamiento (por ejemplo las centrales nucleares, que generalmente están en zonas de baja actividad sísmica). En ambos casos los equipos eléctricos y de mando y control deben asegurar plenamente sus funciones de seguridad.

Este Cuaderno Técnico pretende facilitar la comunicación de los responsables con los especialistas.

Después de repasar brevemente el fenómeno de las sacudidas sísmicas y la forma de especificarlas, el autor desarrolla la aproximación teórica necesaria para poder valorar, ya desde su fase de diseño, la resistencia de los equipos a los fenómenos sísmicos.

Actualmente, el diseño y la calificación requieren cada vez más la modelización y, por tanto, potentes medios informáticos, científicos y técnicos de cálculo y proceso de datos.

Índice

1 Sacudidas sísmicas	1.1 Causas y localización	p. 6
	1.2 Programación de las ondas sísmicas	p. 7
	1.3 Naturaleza de las vibraciones generadas en la superficie del suelo	p. 8
	1.4 Intensidad y magnitud	p. 8
	1.5 Características de un seísmo	p. 11
	1.6 Definición de la severidad sísmica de una zona	p. 13
	1.7 Lectura del espectro de respuesta aplicable a un equipo	p. 14
2 Comportamiento dinámico de las estructuras	2.1 Repaso del oscilador de primer orden	p. 18
	2.2 Estructuras elásticas (con N grados de libertad)	p. 18
3 Diseño de los equipos	3.1 Definición y objetivos	p. 23
	3.2 Principios de diseño	p. 24
	3.3 La simulación mediante cálculo en la fase de diseño	p. 26
4 Calificación mediante simulación o ensayo	4.1 Introducción	p. 29
	4.2 Calificación mixta (modelización y ajuste experimental)	p. 29
	4.3 Calificación mediante ensayos con «valores reales», precedida por la modelización	p. 32
	4.4 Calificación mediante ensayos	p. 33
5 Conclusión		p. 36
Bibliografía		p. 37

1 Sacudidas sísmicas

1.1 Causas y localización

La mayor parte de los terremotos se producen en las fallas que delimitan las placas tectónicas de la corteza terrestre. Cuando estas placas se desplazan unas respecto a otras, aparecen tensiones que se van acumulando a lo largo del tiempo. La liberación súbita de la energía de deformación acumulada en la corteza terrestre, o en la capa inferior, llamada manto, provoca un temblor local, parte de cuya energía se transforma en ondas sísmicas en la superficie de la tierra.

La aparición de fallas o, más frecuentemente, el deslizamiento a lo largo de otra ya existente, constituye el mecanismo generador de un seísmo. El punto en el que se produce el seísmo se denomina foco sísmico o hipocentro y la proyección de este punto en la superficie, epicentro (**figura 1**).

El hipocentro puede situarse a una profundidad muy variable: desde algunos kilómetros hasta más de un centenar.

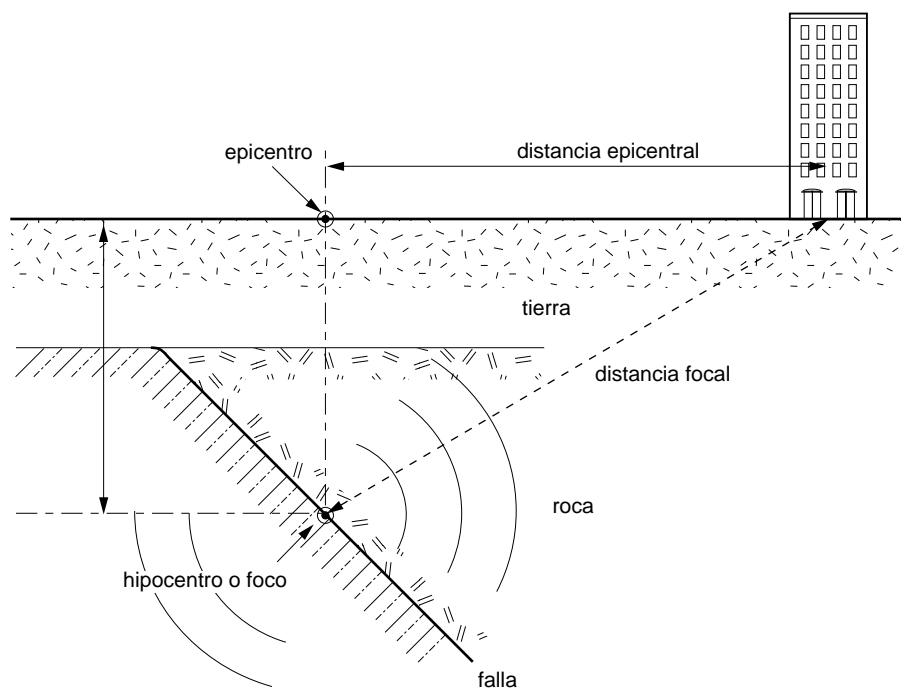


Fig. 1: Vocabulario y elementos característicos en geosismología.

1.2 Programación de las ondas sísmicas

Los terremotos se propagan en forma de ondas que, habida cuenta de la heterogeneidad del terreno, producen en la superficie un movimiento vibratorio complejo y que es difícilmente previsible en un lugar dado.

Se distinguen dos tipos de onda: las ondas de volumen y las ondas de superficie.

Ondas de volumen (bulk)

Se originan en el foco y se propagan por el interior del manto terrestre de dos formas:

- ondas longitudinales, que se caracterizan por compresiones y dilataciones alternas y que se propagan a una velocidad de 7 a 8 km/s,
- ondas transversales, que se caracterizan por una distorsión, en el plano perpendicular a la dirección de propagación que provoca el cizallamiento, y que se propagan a una velocidad de 4 a 5 km/s (**figura 2**).

Nota:

La diferencia de velocidad de propagación entre las ondas longitudinales y transversales permite, con la ayuda del registro de varios sismógrafos, ubicar el foco de un sismo.

Ondas de superficie

Las generan las ondas de volumen (bulk) que llegan a la superficie y se propagan a una velocidad de 1,5 a 5 km/s.

Se diferencian dos tipos de ondas de superficie:

- las ondas RAYLEIGH, por las que los puntos del suelo se mueven describiendo elipses en el plano vertical; provocan compresiones y cizallamientos en el suelo,
- las ondas LOVE, por las que los puntos del suelo se desplazan tangencialmente a la superficie, perpendicularmente a la dirección de propagación; sólo producen esfuerzos de cizalla (**figura 2**).

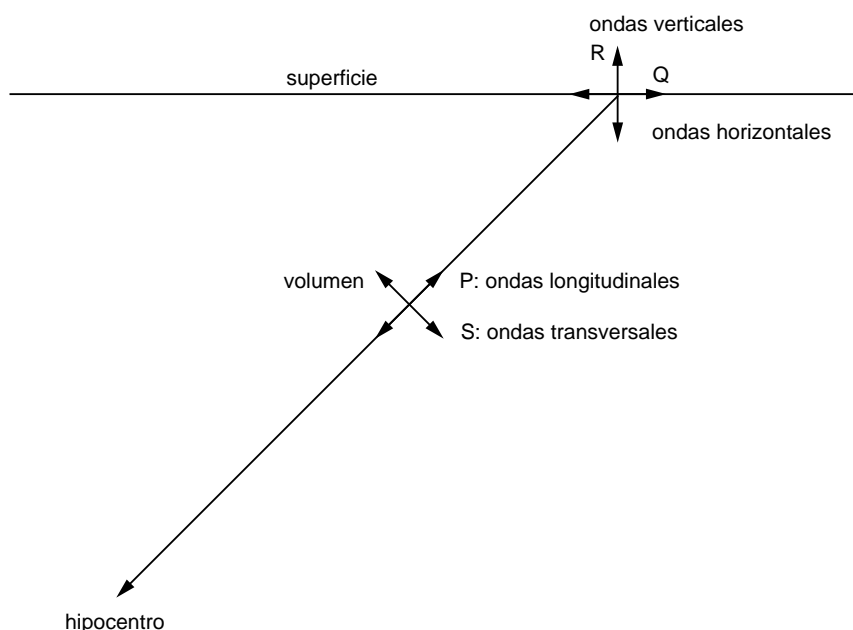


Fig. 2: Las ondas sísmicas de volumen y de superficie.

1.3 Naturaleza de las vibraciones generadas en la superficie del suelo

En realidad, las cosas son todavía más complejas. En efecto, la propagación de una onda sísmica en medio heterogéneo provoca, para cada discontinuidad, un sistema complejo de ondas refractadas y reflejadas, de forma que, en la superficie, el movimiento sísmico es aparentemente aleatorio.

Sin embargo, los movimientos vibratorios, ocasionados por los seísmos en la superficie del suelo, tienen una serie de características comunes y, para describirlos, se utiliza habitualmente un cierto número de parámetros.

Características de las vibraciones aleatorias provocadas por un seísmo en la superficie del suelo

- **dirección:** el movimiento tiene dos componentes simultáneas, vertical y horizontal, que son independientes,

- **duración:** generalmente está comprendida entre 15 y 30 s; (para un seísmo intenso, puede llegar a ser de 60 a 120 s),

- **frecuencia:** movimiento aleatorio de banda ancha que produce una energía comprendida entre 1 y 35 Hz, y provoca los efectos más destructivos entre 1 y 10 Hz,

- **valor de aceleración:** no hay correlación entre las ondas observadas en ambas direcciones: en un instante dado, las amplitudes y las frecuencias son independientes.

La aceleración del suelo observada en dirección horizontal es generalmente inferior a 0,5 g (raramente superior a 1 g, o sea, 10 m/s²). La aceleración en la dirección vertical tiene una amplitud menor. Las observaciones muestran que la razón entre las amplitudes máximas, verticales y horizontales, es del orden de 2/3 (para frecuencias superiores a 3,5 Hz).

1.4 Intensidad y magnitud

Intensidad

Habitualmente se valora en términos de intensidad medida en el lugar de observación. Esta estimación subjetiva se establece a partir de los efectos percibidos por la población y por los daños que se producen.

Con la ayuda de descripciones convencionales, se han definido diversas escalas que clasifican los efectos sísmicos según su importancia creciente:

- la escala de MERCALLI valora las consecuencias comúnmente observadas tras un terremoto sobre el medio ambiente, las construcciones y el hombre,

- la escala MSK (o de MERCALLI modificada), más precisa que la original, incluye una evaluación de los daños, el tipo de construcción y el porcentaje de los edificios afectados.

Estas estimaciones son útiles para valorar la importancia de los temblores de tierra cuando no se dispone de acelerómetros o espectros, pero no permiten especificar las cargas sísmicas en un determinado lugar.

Magnitud

Otra manera de designar la importancia de un seísmo es determinar su magnitud. Se trata de una característica intrínseca de un terremoto que da una medida de la energía total liberada.

La magnitud, definida en 1935 por RICHTER, y la escala resultante, se utilizan en la actualidad universalmente.

En la práctica, la magnitud se determina de acuerdo con los registros de los movimientos del suelo, efectuados en un cierto número de puntos de observación situados a diferentes distancias del epicentro. A partir de estas observaciones, los sismólogos calculan la energía E (expresada en ergios) del seísmo a partir de la cual se deduce la magnitud M . La ecuación empírica simplificada:
 $\log E = 9,9 + 1,9M + 0,024M^2$
permite un cálculo aproximado, pero rápido.

Correlación intensidad/aceleración máxima del suelo/zona sísmica

La tabla de la **figura 3** establece, a título orientativo, una correspondencia entre diferentes valores subjetivos de intensidad de la escala de MERCALLI modificada y el valor máximo de aceleración superficial que origina los daños observados.

Esta tabla indica también el tipo de zona de actividad sísmica y su correspondencia con la intensidad sísmica; en la **figura 4** se pueden ver las diferentes zonas de actividad sísmica del mundo.

Intensidad	Escala Mercalli modificada	Valores aproximados de las aceleraciones horizontales en m/s ²	Zona sísmica
1	No se percibe el temblor.		zona 0
2	El temblor lo sienten aquellos que están situados en los pisos más elevados.		
3	Movimiento de los objetos colgantes. Vibraciones leves.		
4	Se perciben vibraciones similares a las que provoca un camión pesado al pasar. Traqueteo de los cristales de las ventanas y de los "cacharros". Los vehículos estacionados se balancean.	2	
5	El temblor se percibe también en el exterior de los edificios. Las personas que están durmiendo se despiertan. Caída de pequeños objetos. Los cuadros se balancean hacia los lados.		zona 1
6	El temblor es percibido por todas las personas. Se mueven los adornos. Daños: rotura de cristales, caída de objetos de las estanterías, pequeñas grietas en los enyesados.		
7	El temblor se percibe en los vehículos en movimiento. Pérdida del equilibrio de los objetos que están de pie, suenan las campanas de las iglesias. Daños: desprendimiento de chimeneas y otros elementos arquitectónicos externos, caída de los enyesados, rotura de los adornos, extensión de las grietas de paredes de yeso y de albañilería, algunas casas se derrumban.		zona 2
8	Se hace difícil conducir los vehículos. Caída de ramas de los árboles. Aparición de fisuras en suelos anegados. Destrucción: torres de agua, monumentos, casas de ladrillos. Daños (de leves a sustanciales) en edificios de ladrillos, en casas prefabricadas, tuberías, calzadas.	3	
9	«Cráteres de arena» en terrenos arenosos y anegados de áreas urbanas. Derrumbamientos. Fisuras en el suelo. Destrucción de albañilería de ladrillos no reforzada. Daños (de leves a sustanciales): insuficiencia de los refuerzos de estructuras concretas, rompimiento de tuberías subterráneas.		zonas 3 y 4
10	Derrumbamientos y destrucción masiva del suelo. Destrucción: puentes, túneles, algunas estructuras concretas especialmente reforzadas. Daños (de leves a sustanciales) en la mayoría de los edificios, en embalses, en líneas de ferrocarril.	5	
11	Deformación permanente del terreno.		
12	Destrucción casi total.		

Fig. 3: Escala MERCALLI.

Correspondencia intensidad/ magnitud

Teóricamente, no puede existir relación entre la intensidad y la magnitud. En efecto, la intensidad depende de la distancia del lugar considerado al foco del seísmo, del tipo de suelo, del tipo de cimientos utilizados, del tipo de construcción y de la duración del seísmo. Sin embargo, los expertos han propuesto una correspondencia aproximada (figura 5).

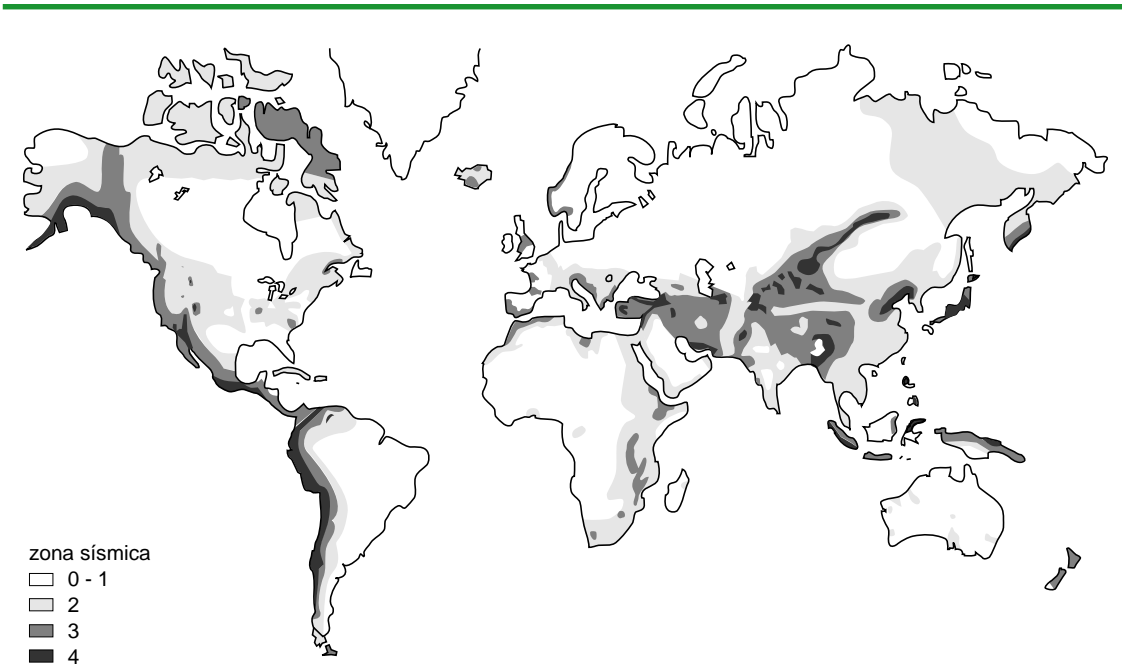


Fig. 4: Zonas activas sísmicas en el mundo.

Mercalli (intensidad)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-11-12
Richter (magnitud)	0-2	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	5-7	5-8	7-9	> 8

Las correspondencias entre las escalas de Mercalli y de Richter son orientativas porque son función de la naturaleza del suelo, de la extensión del foco (de 5 a 100 km) y de la duración del seísmo.

Fig. 5: Correspondencia «orientativa» entre las escalas de Mercalli y de Richter.

1.5 Características de un sismo

La intensidad, la magnitud o las aceleraciones máximas del suelo no son suficientes para estimar los riesgos para un edificio o equipo. De hecho, la estimación de la respuesta de una estructura necesita un conocimiento más preciso del movimiento del suelo en lo que se refiere a la duración y la frecuencia del sismo.

Hay dos métodos para caracterizar el movimiento del suelo:

- el acelerograma: $\gamma = f(t)$,
- el espectro de respuesta que caracteriza los efectos producidos por el sismo en una estructura elemental (sistema mecánico lineal de 1^{er} orden).

El acelerograma

Es una evolución de la función de aceleración del suelo en función del tiempo (**figura 6**).

Este tipo de información, registrada por los sismógrafos en las 3 direcciones del espacio, sirve para estimar el riesgo sísmico al que está expuesto un equipo, cuando se pretende valorar su resistencia mediante ensayos o por cálculo. El acelerograma es la única información utilizable para determinar la cronología de la respuesta de una estructura a la excitación sísmica, lo que se debe de conocer para evaluar el desplazamiento relativo de las diversas partes de un equipo a lo largo del tiempo.

Sin embargo, este dato no suele estar en los cuadernos de carga, o por no estar disponible o porque es poco útil para calcular la severidad sísmica en un lugar dado.

El espectro de respuesta

El espectro de respuesta permite caracterizar un sismo por los efectos que produce en un equipo. Para ello, se calcula el efecto del acelerograma (de la onda sísmica) en un equipo estandarizado, es decir, en un sistema mecánico lineal de primer orden, caracterizado por sus valores de frecuencia de resonancia y de amortiguación.

Un sistema de primer orden caracterizado por una masa M , una elasticidad (K) y una amortiguación λ tiene una frecuencia de resonancia:

$$Fr = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

La respuesta máxima de este sistema a la onda sísmica (aceleración máxima que alcanza una masa) da un punto del espectro de respuesta (**figura 7**). Haciendo variar la frecuencia de resonancia (K/M), la curva obtenida:

$\gamma_{\text{máx}} = f(Fr)$ (**figura 8**) es el espectro de respuesta que caracteriza la severidad de la onda sísmica para una amortiguación dada.

La **figura 9** representa la familia de curvas obtenida cuando se hace variar la amortiguación.

Generalmente el espectro de respuesta viene dado en los cuadernos de las cargas para su aplicación en las direcciones horizontales. El espectro de respuesta vertical se deduce aplicando un coeficiente.

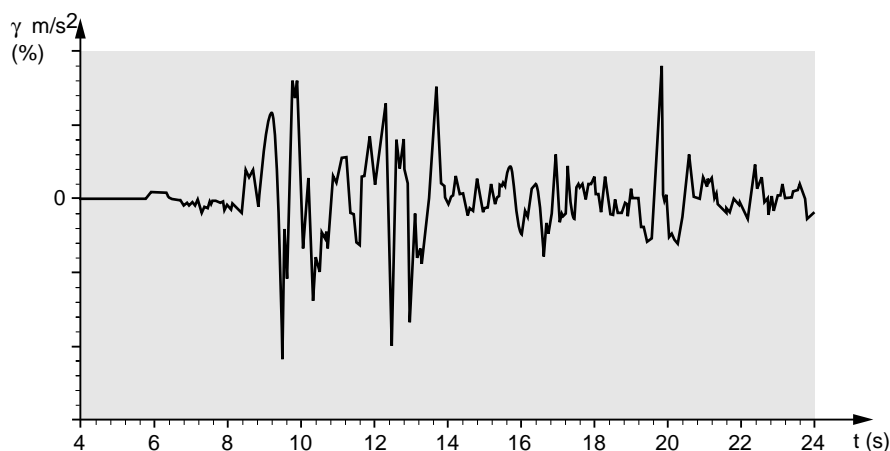


Fig. 6: Ejemplo de acelerograma $\gamma = f(t)$ registrado en California el 18 de mayo de 1940 (plano horizontal - eje Norte/sur).

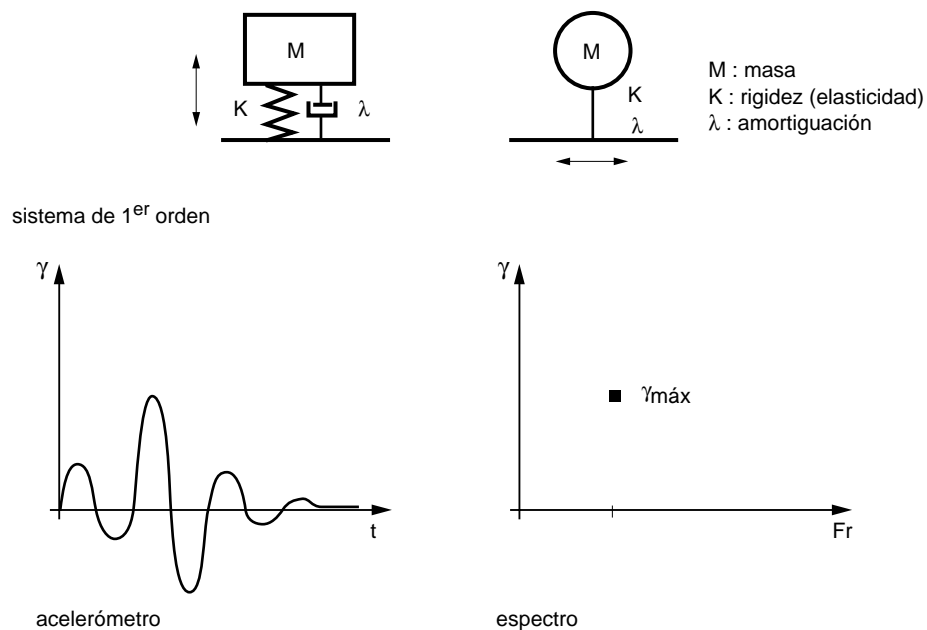


Fig. 7: A un sistema de primer orden, la aplicación de la excitación sísmica (acelerograma de la **figura 6**) le produce aceleraciones. El valor máximo ($\gamma_{máx}$) es, por definición, un punto del espectro de respuesta... del sistema al seísmo.

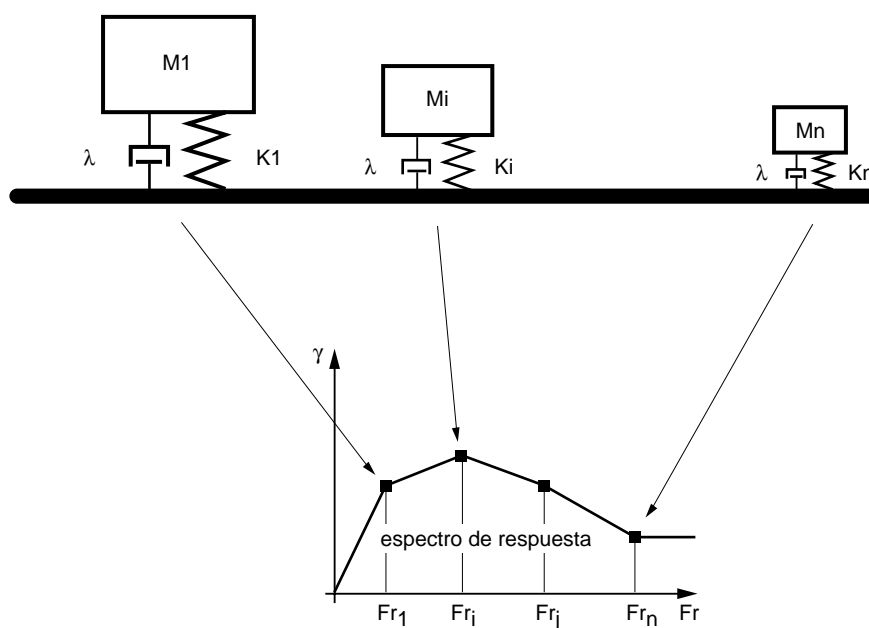


Fig. 8: Construcción del espectro de respuesta al seísmo (varios K/M con λ constante).

Actualmente, el espectro de respuesta es la herramienta más utilizada para especificar la severidad sísmica de un paraje, porque por su propia naturaleza permite fácilmente:

- comparar la gravedad,
- elaborar mapas de intensidad de diversos lugares,
- detectar fácilmente variaciones de intensidad,
- estimar, en una primera aproximación, los efectos de un seísmo en un equipo (daños potenciales).

Nota :

El espectro de respuesta no debe confundirse, sobre todo, con la descomposición en series de FOURIER de un fenómeno periódico, ni con la transformada de FOURIER de un fenómeno aperiódico, que no se utiliza en el campo de los estudios sísmicos.

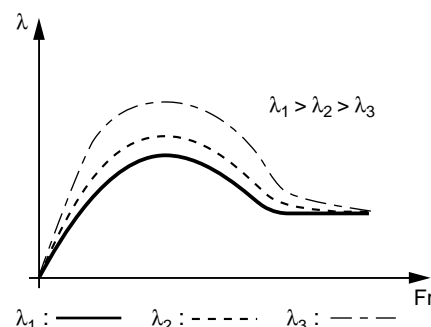


Fig. 9: Red de espectros de respuesta obtenida con diversas amortiguaciones, para un mismo seísmo.

1.6 Definición de la severidad sísmica de una zona

Seísmo Máximo Histórico Verosímil (SMHV), Seísmo Máximo Seguridad (SMS)

La definición de la severidad sísmica de un paraje hace generalmente referencia a los datos geológicos y sísmicos históricos de este lugar.

Por ejemplo, en Francia, los datos históricos de sismicidad (100 años), excepcionalmente bien documentados, permiten establecer el riesgo sísmico de una zona.

Esto permite definir el Seísmo Máximo Histórico Verosímil -SMHV- susceptible de producir un efecto máximo en una zona dada. Para dimensionar las obras o equipamientos, se utiliza el Seísmo Máximo de Seguridad -SMS-, que corresponde a la intensidad del SMHV sobrestimado en un grado en la escala MSK (Mercalli modificada).

Espectro de respuesta fundamental

Los datos macrosísmicos que corresponden a las definiciones citadas no son suficientes para el ingeniero que debe diseñar un edificio o un equipo. También es necesario disponer del espectro de respuesta representativa del lugar

considerado; éste se establece con la ayuda de los datos de la sismicidad instrumental.

Se ha constituido una sismoteca (con datos obtenidos en las regiones con actividad sísmica significativa) que relaciona la escala de magnitudes, las profundidades de los focos sísmicos y las distancias de diversos contextos geológicos a los epicentros. Esto permite establecer la forma del espectro de respuesta, que se denomina espectro de respuesta básico o fundamental, para una región dada; y en la que su amplitud es función del SMS escogido.

Este espectro de respuesta define la severidad de seísmo a nivel del suelo; únicamente queda por valorar la altura de la planta donde se va a instalar el equipo.

Espectro de dimensionamiento

Las especificaciones en materia de resistencia sísmica están ampliamente presentadas bajo la forma de una red de espectros de respuesta que corresponden a los diversos pisos del edificio. Éstos se calculan teniendo en cuenta la resistencia de transferencia del edificio. En la **figura 10** puede verse un ejemplo.

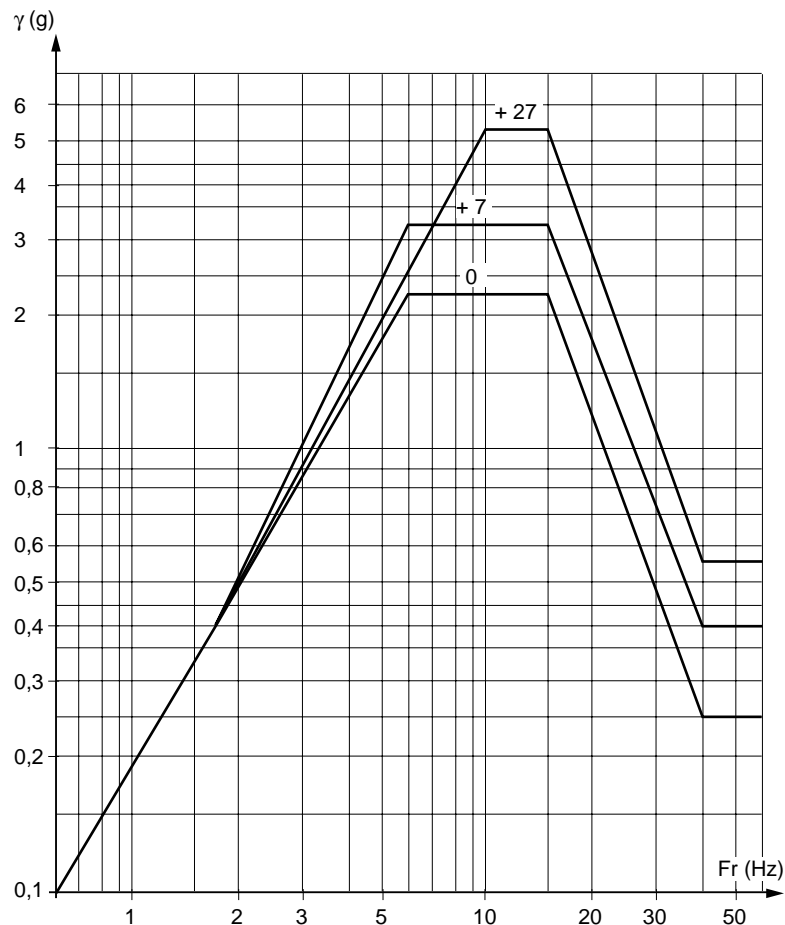


Fig. 10: Espectro de dimensionamiento, en función de las alturas del suelo (en metros) en un área industrial. Este espectro se da para una amortiguación del 2%.

1.7 Lectura del espectro de respuesta aplicable a un equipo

El interés del espectro de respuesta es dar la imagen de los efectos extremos en aceleración (o en desplazamiento) provocados por la excitación en un sistema elástico de 1^{er} orden.

Conversión

aceleración/velocidad/desplazamiento

Los espectros de respuesta se representan frecuentemente en un sistema de ejes aceleración/frecuencia, pero algunas veces se representan sobre ejes frecuencia/velocidad. Para pequeñas amortiguaciones del equipo estudiado ($\leq 10\%$) los espectros de respuesta en velocidad y en desplazamiento relativo pueden deducirse de los espectros de

aceleración aplicando, para cada frecuencia, las relaciones siguientes:

$$V_{\text{máx}} = \frac{\gamma_{\text{máx}}}{2\pi f} ; D_{\text{máx}} = \frac{\gamma_{\text{máx}}}{(2\pi f)^2}$$

De hecho, todo ocurre como si fueran magnitudes senoidales, con

$$V = \int \gamma(t) dt \quad y \quad d = \iint \gamma(t) dt$$

En coordenadas log/log el espectro de respuesta puede leerse según los ejes de aceleración, velocidad o desplazamiento (**figura 11**).

Aceleración y desplazamiento máximo del suelo

Visto que la energía procedente de la excitación sísmica está limitada a frecuencias de 35 Hz, los puntos del espectro situados por encima de esta frecuencia representan el comportamiento de un oscilador «rígido» (K/M muy elevado), que se mantiene indeformable bajo la excitación sísmica.

Por tanto, el desplazamiento relativo de la masa respecto al soporte es nulo, y su aceleración es igual a la del soporte (**figura 12a**).

Y así, la asíntota que toma el espectro de respuesta para las frecuencias altas ($F_r \geq 35$ Hz) corresponde a la aceleración máxima del suelo (lado derecho de la **figura 13**).

Nota:

Los especialistas, para establecer el valor de la aceleración utilizan la sigla APN (Aceleración de Período Nulo) que está situada en la parte derecha del espectro y corresponde a una frecuencia relativa infinita.

Asimismo, las frecuencias más bajas del espectro representan el comportamiento de un oscilador que permanece «infinitamente flexible» ante la excitación sísmica. Entonces, el desplazamiento relativo de un oscilador de este tipo es igual al desplazamiento del soporte (**figura 12b**).

En baja frecuencia ($F < 1$ Hz), la asíntota que toma el espectro de respuesta, cuando se representa en una escala log/log, corresponde a la zona de desplazamiento del suelo (parte izquierda de la **figura 13**).

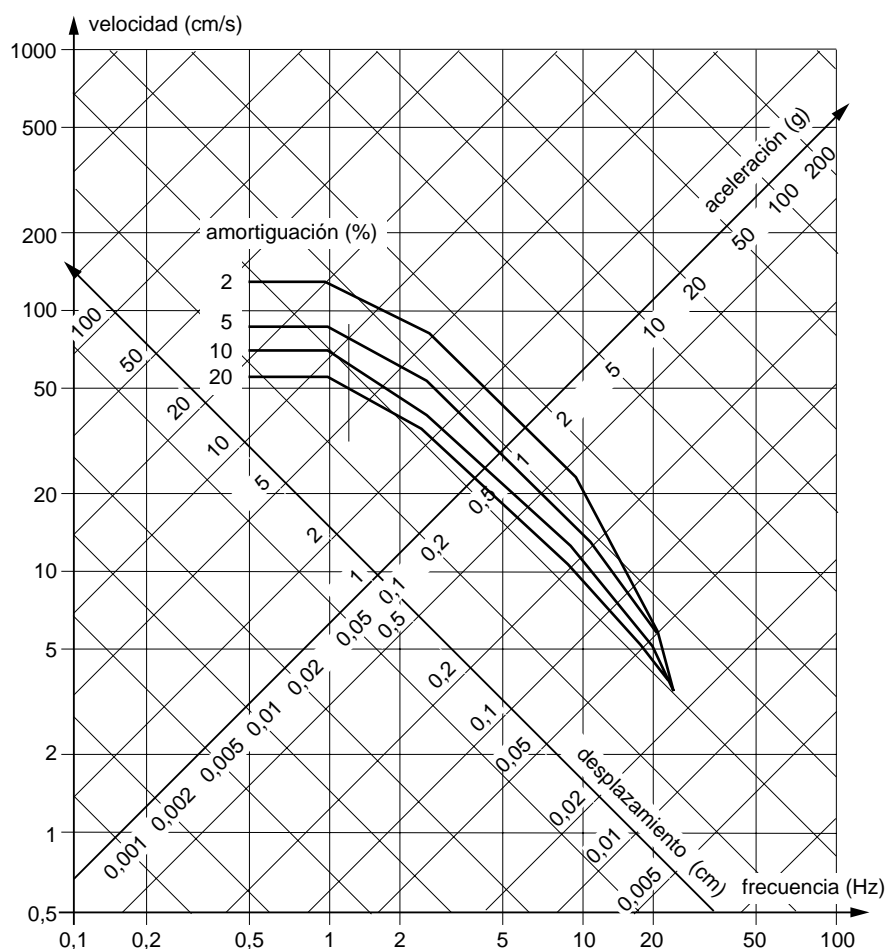
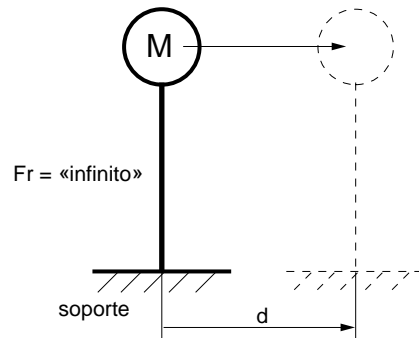


Fig. 11: Ejemplo de espectro de respuesta que puede leerse sobre los ejes aceleración, velocidad, desplazamiento.

a) Si K/M «muy grande», el «sistema» no se puede deformar (la masa sigue el movimiento del suelo)

$$\gamma = \gamma_{\text{suelo}}$$



b) Si K/M «muy pequeño», el «sistema» se deforma (la masa permanece inmóvil)

$$\gamma = 0$$

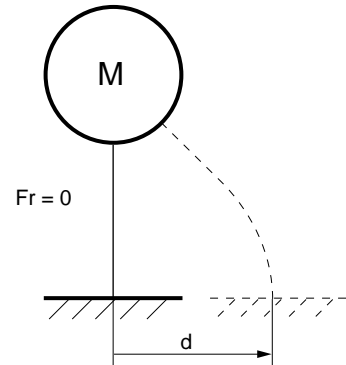


Fig. 12: Respuesta de un sistema de primer orden para los valores límite de su frecuencia de respuesta.

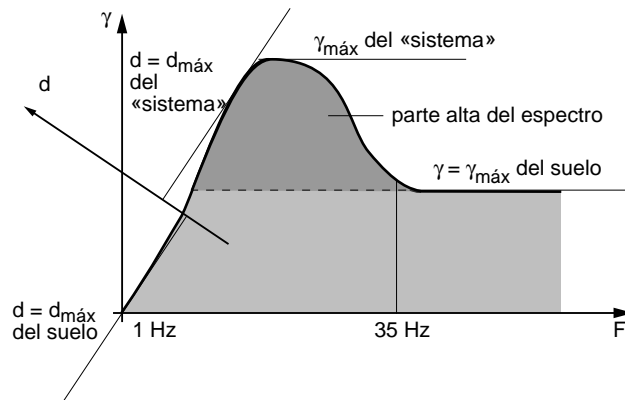


Fig. 13: Lectura de un espectro de respuesta (en escala log/log, es posible leer las magnitudes que caracterizan la aceleración y el desplazamiento).

Aceleración y desplazamiento máximo alcanzado por el oscilador

Entre 1 y 35 Hz (parte central de la **figura 13**) las aceleraciones y los desplazamientos del oscilador son generalmente superiores que los del suelo.

La aceleración y el desplazamiento máximo, así como las frecuencias de resonancia correspondientes se pueden leer directamente en el espectro **figura 13**, lectura según los ejes γ y d).

En ausencia de datos sobre las características dinámicas de un equipo, se puede considerar que está constituido por un cierto número de osciladores de 1^{er} orden.

Los valores tomados de desplazamiento máximo y de aceleración máxima que se producirán durante un sismo pueden deducirse del espectro de respuesta.

Elección de la amortiguación para el equipo

El factor de amortiguación tenido en cuenta en el cálculo del espectro de respuesta se admite que sirve para representar la amortiguación global del equipo considerado.

En el caso de un equipo compuesto de elementos con amortiguaciones diferentes, es frecuente aplicar una amortiguación más pequeña para la elección del espectro de respuesta, lo que lleva a sobrevalorar los esfuerzos.

La tabla de la **figura 14** muestra, a título indicativo, los valores normalmente admitidos en términos de porcentajes del máximo esfuerzo soportado por el equipo. Puesto que la especificación sísmica se expresa mediante un conjunto del espectro de respuesta que corresponde a diversas amortiguaciones (2%, 5%, 10%, etc.), el diseñador del equipo puede efectuar una interpolación.

Ventajas del espectro de respuesta

Para un diseñador de equipos, las informaciones que proporciona el estudio del espectro de respuesta son más útiles que las

que proporciona la representación temporal del seísmo. En efecto, mientras el acelerograma suministra la aceleración máxima del terreno, el espectro de respuesta da el máximo de información, especialmente de los valores máximos siguientes:

- la aceleración máxima del suelo,
- el desplazamiento máximo del suelo,
- la aceleración máxima que puede sufrir una parte determinada del equipo,
- el desplazamiento máximo que puede sufrir una parte determinada del equipo.

tipo de estructura	amortiguación en %	
	para 50% de la amplitud límite	para 100% de la amplitud límite
Estructuras soldadas de acero	2	4
Estructuras atornilladas de acero	4	7
Estructura de hormigón armado	4	7
Armario	2	5
Rack	2	5

Fig. 14: Amortiguación normalmente admitida de diversas estructuras según la amplitud de las fuerzas (flexión o tracción/compresión).

2 Comportamiento dinámico de las estructuras

Actualmente, el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras es una de las fases indispensables en el proceso de diseño de todo equipo industrial. En esta fase, conviene recordar los principales conceptos que rigen la respuesta de una estructura ante una excitación sísmica.

2.1 Repaso del oscilador de primer orden

El oscilador de 1^{er} orden (todavía llamado sistema con 1 grado libertad) constituye uno de los principios básicos de análisis dinámico de las estructuras. En efecto, el comportamiento dinámico de una estructura elástica se reduce a cierto número de osciladores simples.

Además, con frecuencia se considera suficiente el primer modo de resonancia de una estructura o de un equipo para su dimensionamiento; lo que equivale a estudiar un solo oscilador simple equivalente (cuyos dos tipos se representan en la **figura 7**).

El oscilador simple se caracteriza por su frecuencia de resonancia o frecuencia natural, y por su amortiguación. La frecuencia de

resonancia corresponde al movimiento libre del oscilador en ausencia de una fuerza exterior. En otros términos, se trata de la frecuencia del movimiento que toma el oscilador cuando se aparta de su posición de reposo (ensayo de oscilación libre o de «soltar») o debida a un único impulso. Cuando se excita el oscilador a esta frecuencia, se produce «resonancia», es decir, hay una amplificación del movimiento. Esta amplificación es inversamente proporcional a la amortiguación del oscilador. Frecuencia de resonancia y amortiguación son suficientes para el cálculo de la respuesta de este sistema bajo cualquier excitación y, en particular, para la excitación por desplazamiento de los apoyos, que es lo que constituye la sacudida sísmica.

2.2 Estructuras elásticas (con N grados de libertad)

Frecuencias de resonancia y deformadas modales

En el caso general, una estructura elástica (por ejemplo una antena látigo, una viga), se caracteriza por determinado valor de frecuencias de resonancia (en número teóricamente infinito) que corresponden a los modos de resonancia o modos característicos, (estas estructuras tienen N grados de libertad), (**figura 15**). Cada una de estas resonancias se acompaña de una deformación específica de la estructura, llamada deformada modal. Para cada frecuencia de resonancia, la estructura se deforma y oscila a un lado y a otro de su posición de equilibrio (los puntos de la estructura evolucionan en fase o en oposición de fase, haciendo aparecer nudos y vientres en la deformada).

Cuanto mayor es el orden de modo, más compleja es la deformada modal correspondiente apareciendo un número mayor de nudos y de vientres.

El comportamiento dinámico de las estructuras, constituidas por N estructuras elementales con 1 grado de libertad (**figura 16**) se calcula habitualmente efectuando el denominado análisis modal de la estructura, que consiste en buscar las frecuencias de resonancia y deformadas modales asociadas a una banda de frecuencias correspondiente al sismo. Así se elabora una base de trabajo constituida por los N primeros modos de la estructura, llamada base modal, en la que el problema propuesto inicialmente se reduce al estudio y a la combinación del comportamiento de N sistemas de 1^{er} orden (**figura 16**, lado derecho).

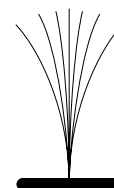
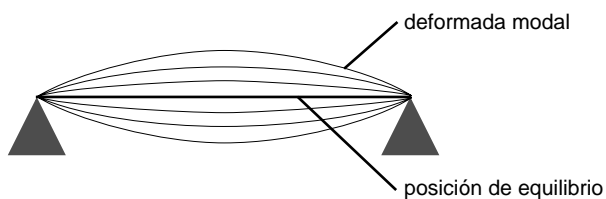
Adaptación frecuencial y espacial

El régimen de resonancia de una estructura elástica se obtiene con dos condiciones:

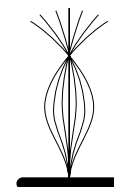
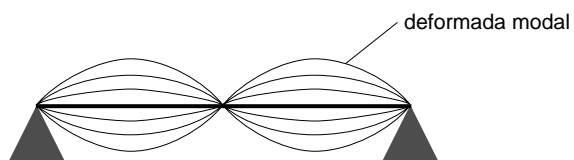
- que la frecuencia de excitación coincida con una frecuencia de resonancia de la estructura. Se trata de la adaptación frecuencial (condición suficiente para sistemas con 1 grado de libertad),

- que la dirección de la excitación así como su localización sean coherentes con la correspondiente deformada modal. Cuando es puntual, la excitación no debe actuar sobre un nudo de la estructura y lo más eficaz es aplicar la excitación en un vientre con una dirección paralela al desplazamiento del mismo.

modo nº 1



modo nº 2



modo nº 3

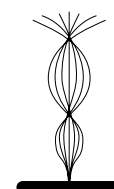
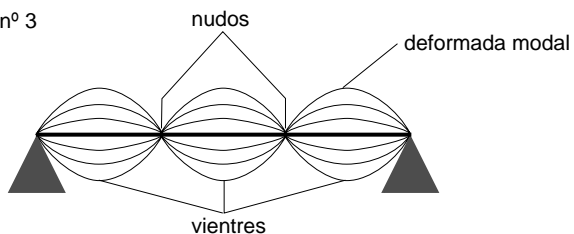
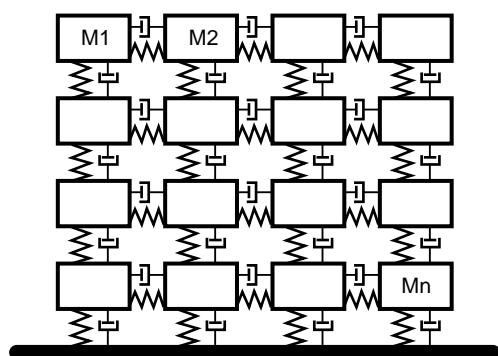


Fig. 15: Base modal: primeros modos de resonancia de dos estructuras simples.

Estructura con N grados de libertad



En la base modal

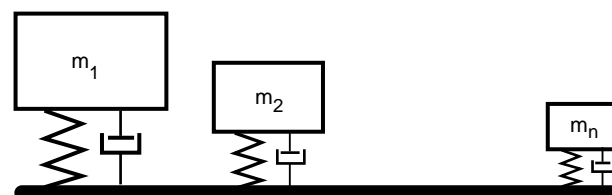
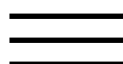


Fig. 16: Una estructura compleja con N grados de libertad puede transformarse en una suma de N sistemas de primer orden.

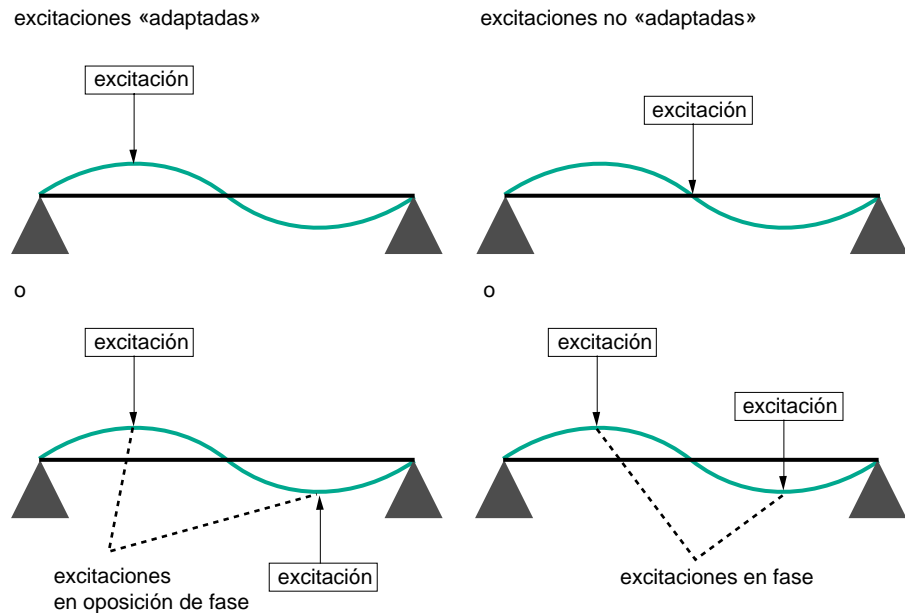


Fig. 17: Ejemplos de adaptación espacial para excitaciones puntuales.

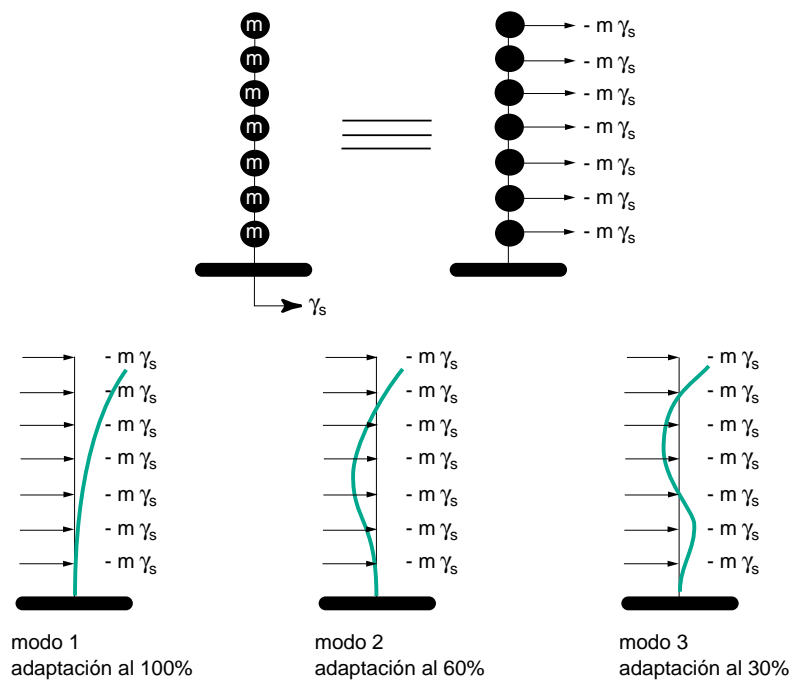
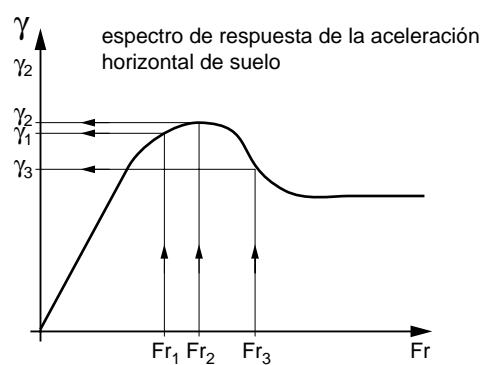
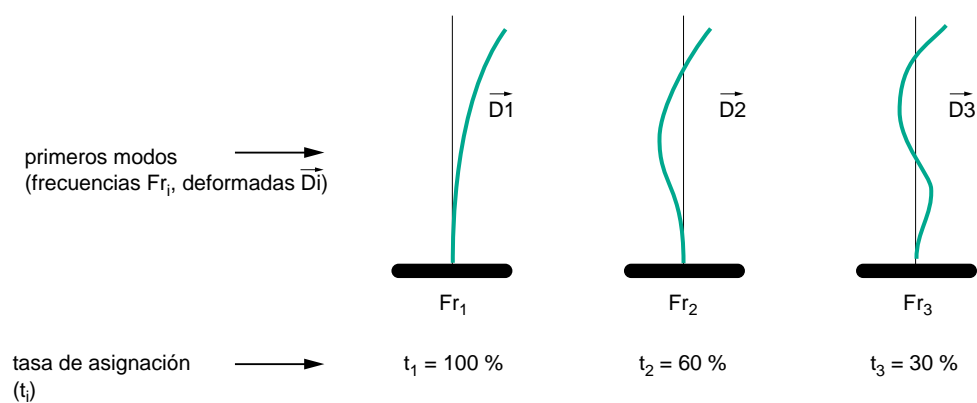


Fig. 18: Equivalencia entre desplazamiento del apoyo y esfuerzos puntuales. Ejemplo de asignación espacial de los 3 primeros modos de una viga.



deformación total de la estructura: $\vec{D} = t_1 \cdot \gamma_1 \cdot \vec{D}_1 + t_2 \cdot \gamma_2 \cdot \vec{D}_2 + t_3 \cdot \gamma_3 \cdot \vec{D}_3$

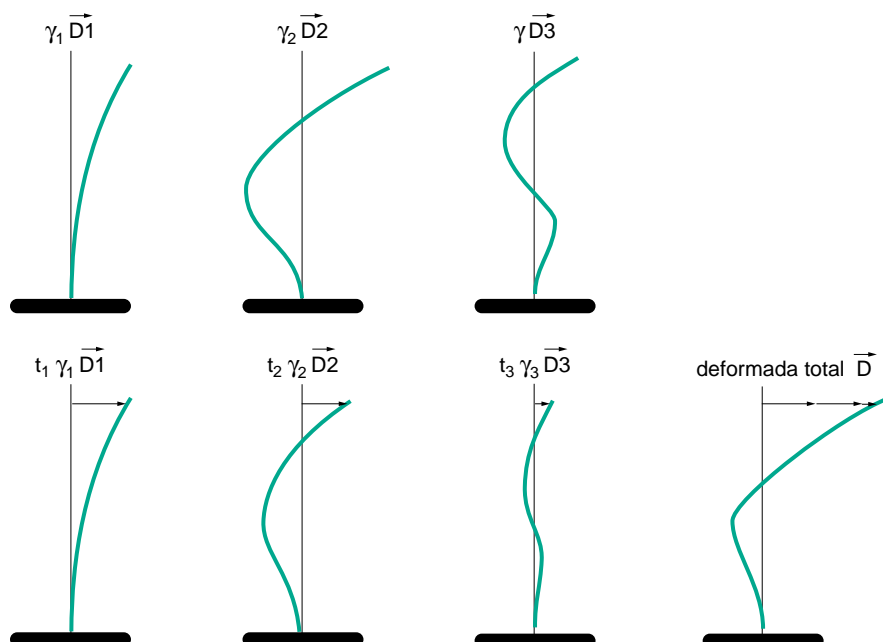


Fig. 19: Para obtener la deformación en todos los puntos de una estructura, conociendo sus modos de resonancia, las tasas de asignación y las $\gamma_{m\acute{a}x}$ correspondientes, basta hacer una suma vectorial.

En el caso de vibraciones múltiples, éstas también deben de respetar las relaciones de fase de la deformada modal (**figura 17**).

Esta segunda condición corresponde a la adaptación espacial, que se caracteriza por un coeficiente llamado tasa de adaptación modal: t_i .

Respuesta en caso de excitación por desplazamiento del apoyo

Cuando una estructura se somete una aceleración del suelo $\gamma(t)$ (caso del seísmo) todo sucede como si, suponiendo que el terreno estuviera quieto, cada elemento de masa m_i de esta estructura quedara sometido a un esfuerzo inercial $F_i = -m_i \cdot \gamma(t)$.

Estas fuerzas F_i están en fase respecto a la expresión anterior; así se percibe la gran importancia de la noción de «asignación espacial» en cada modo de respuesta de la estructura. Esta particularidad de la excitación sísmica tiene por efecto favorecer la respuesta de los primeros modos. En efecto, éstos presentan, para una dirección dada, un mínimo número de nudos de vibración, o, dicho de otro modo, todos los puntos de la estructura se desplazan en fase y cumplen frecuentemente la asignación espacial (**figura 18**).

Desde el punto de vista analítico, la respuesta de una estructura se describe como una combinación lineal de deformadas D_i asignada a cada modo:

$$\overline{D} = \sum_{i=1}^n y_i(t) \cdot \overline{D_i}$$

cuando se dispone de los espectros de respuesta y de las deformadas modales de la estructura, los coeficientes y_i se obtienen mediante:

$$y_i = \gamma_i \cdot t_i$$

donde:

γ_i = aceleración del espectro para F_i ,

y

t_i = tasa de asignación modal que corresponde al modo D_i .

La suma de deformadas D_i , afectada por los coeficientes y_i da entonces el desplazamiento (o aceleración) máximo de los diferentes puntos de la estructura durante el seísmo (**figura 19**).

Sin embargo, el espectro de respuesta no da los instantes en los que se producen los valores máximos para cada forma. La suma aritmética en valor absoluto lleva pues a una estimación pesimista: sólo se puede aplicar a los casos en que los modos presentan frecuencias próximas (10%). En cambio, la suma cuadrática es más apropiada.

3 Diseño de los equipos

3.1 Definición y objetivos

Al diseñar un equipo, se tendrán muy en cuenta los esfuerzos sísmicos en función del grado de seguridad que haya que asegurar durante y después del seísmo.

Las exigencias requeridas en el comportamiento de un equipamiento expuesto a los seísmos son:

- la estabilidad (el equipo no debe de ser arrancado de su posición),
- la integridad (el equipo debe conservar su geometría inicial),
- el funcionamiento (el equipo debe asegurar un funcionamiento total, parcial o degradado).

Si para conseguir las dos primeras exigencias el diseñador sólo debe de preocuparse de la resistencia mecánica del equipo, para la tercera, es todo mucho más complejo, puesto que hay que considerar los diversos aspectos funcionales. Éste suele ser el caso de los equipos electrotécnicos, en los que las condiciones de servicio exigidas en caso de seísmo son generalmente próximas a las condiciones de funcionamiento nominal. Se trata entonces de definir las características de la estructura que transmiten las excitaciones en función del umbral de fragilidad de las unidades funcionales.

Para el vocabulario, ver la **figura 20**.

Resistencia mecánica

Verificar la resistencia mecánica de un equipo consiste en asegurarse del correcto dimensionamiento de las fijaciones al suelo y de no sobrepasar las cargas que puede soportar su estructura. Estos criterios de valoración dependen mucho de la posición de las primeras frecuencias de resonancia respecto a las sollicitaciones sísmicas previstas.

En el caso de equipos electrotécnicos, la naturaleza de la transferencia de las sollicitaciones sísmicas del suelo sobre las unidades funcionales debe de tenerse en cuenta desde el diseño. Previamente, es necesario determinar el umbral de fragilidad de los órganos funcionales (valor de aceleración a partir del cual el equipo no asegura su funcionamiento).

Resistencia funcional

Se trata de evaluar los esfuerzos vibratorios que van a sufrir los órganos funcionales y asegurar que, cuando queden sometidos a estos esfuerzos, funcionarán correctamente, o que su disponibilidad no se verá afectada.

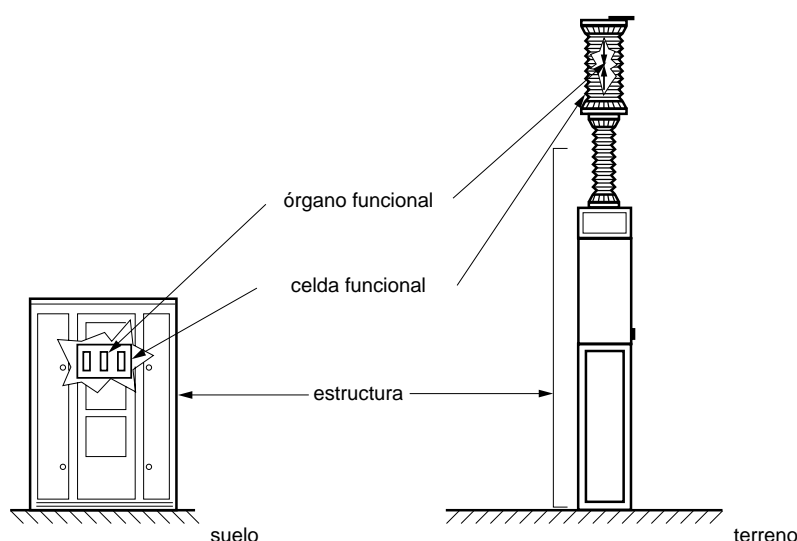


Fig. 20: Definición de los términos empleados para un equipo (armario BT - interruptor AT).

Pueden presentarse dos situaciones:

- el órgano funcional es un dispositivo de protección o de control fabricado en serie: generalmente el equipo ha tenido una calificación respecto a un medio vibratorio cuyos resultados pueden utilizarse para valorar su resistencia a los sobreesfuerzos sísmicos. Si no, es necesario estudiar el comportamiento del equipo en el intervalo de excitación sísmica (0 a 40 Hz),

- el órgano funcional es un dispositivo especial; se ha de proceder a su evaluación mediante ensayos.

En ciertos casos, un estudio de las pruebas efectuadas con otro equipo análogo puede proporcionar elementos de juicio que permitan demostrar la resistencia funcional del aparato.

3.2 Principios de diseño

La noción de transferencia es fundamental en la fase de diseño. En efecto, los equipos eléctricos están generalmente constituidos por un esqueleto o armazón (estructura) que, en caso de sacudida sísmica, transmite más o menos fielmente las vibraciones del suelo a los órganos funcionales.

Espectro de respuesta y características dinámicas de la estructura

El espectro de respuesta que representa los movimientos del suelo, permite inmediatamente:

- por una parte, conocer la severidad de la excitación a la que el equipo tiene el riesgo de quedar sometido (en términos de aceleración y de desplazamiento -ver , en este sentido, el final del primer capítulo-),

- por otra parte, determinar si la estructura amplificará o no el seísmo, a la vista de la posición de sus frecuencias de resonancia respecto a la parte alta del espectro de respuesta.

Por tanto, para el diseñador es obligatorio conocer primero las frecuencias de resonancia de la estructura; éstas pueden ser estimadas por cálculo, por ensayos o por analogía. Recordemos que un espectro tiene dos zonas (**figura 21**):

- La parte derecha del espectro, en la que el equipo sufrirá las mismas aceleraciones que el terreno, sin amplificación.

Cuando las frecuencias de resonancia del equipo se sitúan en esta zona, el

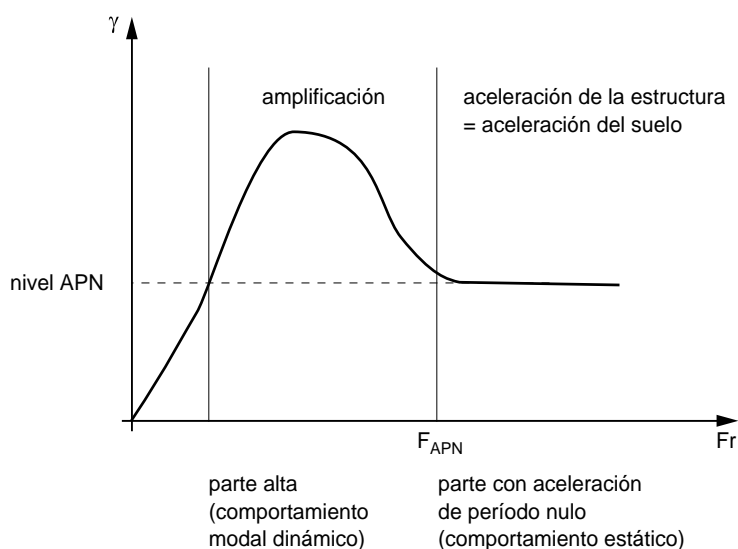


Fig. 21: Hay que evitar las frecuencias de resonancia de la parte alta del espectro.

comportamiento mecánico del equipo se denomina «equivalente estático» o «pseudo-estático». La estimación de los esfuerzos se obtiene entonces aplicando sucesivamente a las masas presentes la aceleración máxima del terreno (llamada APN o Aceleración de Período Nulo) según las tres direcciones del espacio,

■ La parte central, de máxima amplitud del espectro, en la que la estructura amplificará las aceleraciones por resonancias, lo que llevará a esfuerzos y sobrecargas mayores que en el caso anterior. En esta zona, el comportamiento mecánico del equipo es dinámico y, en este caso, es necesario conocer las frecuencias y deformadas modales y combinarlas para estimar los daños máximos que puede sufrir el equipo.

El proceso consiste en:

- ☐ caracterizar la forma natural de vibración (F_{ri} , D_i),
- ☐ determinar las respuestas modales,
- ☐ superponer las respuestas modales,
- ☐ deducir los esfuerzos y tensiones inducidas.

Reglas del arte del diseño sísmico

La aplicación de este proceso tiene que conseguir que, de forma natural, el equipo no tenga resonancia con las frecuencias de la parte central del espectro citado. En la medida de lo posible, el diseñador debe de intentar limitar las dimensiones del equipo y especialmente su altura (un menor tamaño favorece la resonancia a más altas frecuencias).

Admitido esto, la solución más utilizada consiste en dar rigidez a la estructura para rechazar las primeras frecuencias de resonancia más allá del margen de excitación sísmica o al menos más allá de la parte central del espectro de respuesta. En todo caso, conviene evitar los modos de resonancia situada en la banda de frecuencia 0-10 Hz o hasta 15 Hz, para aumentar la seguridad.

La aplicación de estos conceptos básicos debe sin embargo adaptarse a las exigencias de coste, de tamaño y de funcionamiento de los equipos.

Cuando es evidente que un equipo es demasiado frágil y no puede reforzarse suficientemente, siempre es posible aislar el equipo del suelo, interponiendo un apoyo en suspensión. Sin embargo, para ser eficaz, la suspensión debe tener las características necesarias para utilizar tacos de amortiguación de características especiales (flexibilidad y capacidad de desviación). En efecto, para proporcionar al

equipo aceleraciones de amplitud inferior a las del terreno, la suspensión deberá proporcionar a los equipos apoyados en él frecuencias de resonancia (de suspensión) muy bajas, del orden de 1 Hz, y aceptar desplazamientos superiores a 40 cm. Quede claro que estas características no pueden conseguirse con los tacos clásicos y que los desplazamientos que se producen son perjudiciales para los equipos que sostienen (por su posición, conexiones externas, distancias de aislamiento). Por tanto, el recurso a este método está limitado.

Aparamenta en armarios

En el caso de estructuras que soportan diversos equipos es necesario realizar un estudio mecánico de transferencia y evaluar la resistencia de los materiales que contiene, para establecer la compatibilidad entre las cualidades del armario y los límites de resistencia funcional de la aparamenta en entornos vibratorios. Para limitar la amplificación de movimientos del armario, y por tanto la transferencia, es necesario que los armazones de los armarios sean rígidos (reforzados y con tirantes). El grado de rigidez requerido depende de la resistencia de la aparamenta.

Las recomendaciones habituales se refieren a:

- la construcción del armario: las uniones atornilladas o soldadas son preferibles a las remachadas, que pueden ir cogiendo holgura y producir choques perjudiciales para la aparamenta,
- la fijación del armario: la solución ideal consiste en fijar el armario al suelo y a la pared con tornillos; las fijaciones deben de estar dimensionadas para resistir los esfuerzos debidos a las aceleraciones sísmicas,
- la disposición de los aparatos: si el armario solamente está fijado al suelo, las masas pesadas se colocarán preferentemente en la parte baja y lo mismo los aparatos frágiles,
- la fijación de los aparatos: son preferibles las fijaciones rígidas; en el caso contrario, conviene prestar atención a los modos de resonancia local, y a los movimientos diferenciales a lo largo del seísmo,
- las tarjetas electrónicas: evitar tarjetas de gran superficie o demasiado cargadas o con componentes pesados; si es así, prever los refuerzos necesarios,
- el cableado: para evitar los esfuerzos inerciales, embridar los mazos de cables cerca de los conectores.

3.3 La simulación mediante cálculo en la fase de diseño

La modelización del comportamiento dinámico de una estructura utiliza generalmente el método de los elementos finitos. Esta técnica numérica permite predecir el comportamiento mecánico de una estructura sometida a las solicitaciones dinámicas que produce una sacudida sísmica. Se adapta especialmente a la fase de diseño, puesto que la estructura está sólo en los planos de definición o de boceto, y todavía se puede modificar. Proporciona informaciones esenciales a los diseñadores en cuanto a las tensiones, fuerzas de anclaje y las deformaciones de la estructura debidas a la excitación sísmica.

Principio

El principio de este método consiste en construir un modelo simplificado del equipo, con la ayuda de cierto número de «elementos finitos» (vigas, placas, volúmenes...) que representan la estructura y las masas concentradas que a su vez representan los órganos funcionales. La «malla» utiliza los datos geométricos de la estructura (sección, espesor, inercias de sección...) y las características físicas de los materiales (módulo de YOUNG, masa volumétrica). (Ver, como ejemplo, la **figura 22**).

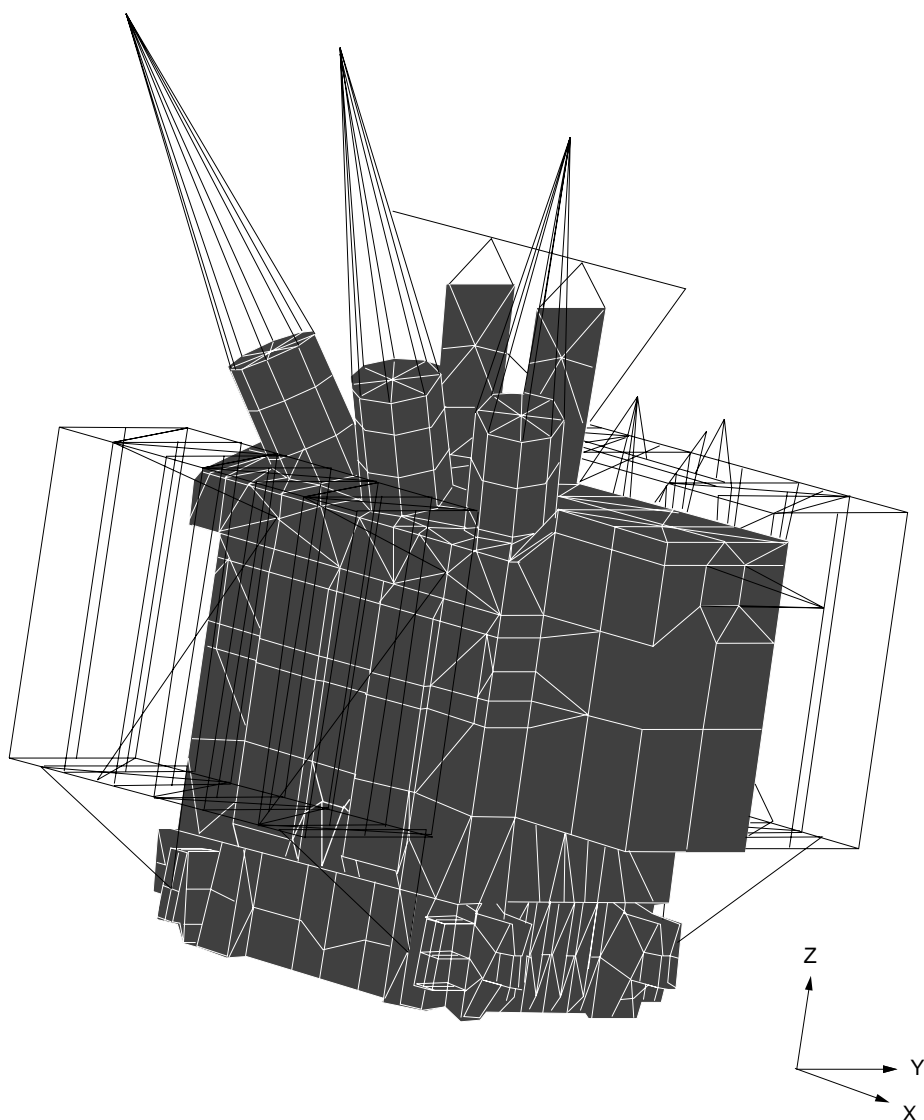


Fig. 22: Malla de «elementos finitos» de un transformador MAT (2000 elementos y 1500 nudos).

El mayor o menor grado de detalle de la malla no es esencial para acceder a los modos fundamentales: sólo hay que respetar el reparto de los principales elementos rígidos y de masa. En cambio, después del cálculo de esfuerzos, hay que asegurarse de que la malla es suficiente.

Después, el programa de cálculo determina, con un margen que abarca la vibración sísmica (0-40 Hz), las frecuencias de resonancia y las deformadas modales asociadas al modelo, así como los coeficientes de participación modal: se trata del análisis modal.

A título de ejemplo, el cuadro de la **figura 23** da los elementos del análisis modal de un

transformador; se ve con claridad que el aislador BT es un elemento sensible, pero más todavía el conservador, pues su segundo modo de resonancia se sitúa a una frecuencia de 11 Hz (que tiene todas las probabilidades de estar dentro de la parte alta del espectro que corresponde a la vibración sísmica).

La etapa siguiente consiste en simular la respuesta del equipo bajo los efectos de un seísmo y así obtener los desplazamientos, fuerzas y tensiones sobre los apoyos.

Se pueden utilizar dos métodos diferentes según la posición de las frecuencias de resonancias de la estructura respecto a la parte central del espectro de respuesta:

n° de modo	frecuencia (Hz)	coeficiente de participación modal	elemento afectado
1	8,7	4	conservador
2	11	232	conservador
3	12,7	14	radiadores
4	13,2	34	todos los auxiliares
5	13,8	5	intercambiadores
6	15,9	24	conservadores
7	17,2	11	intercambiadores
8	19	105	todo los auxiliares
9	19,3	51	todos los auxiliares
10	21,2	24	intercambiadores
11	22,9	18	conservadores
12	23,1	7	intercambiadores
13	24,1	4	pararrayos
14	24,4	47	pararrayos
15	24,6	42	pararrayos
16	24,8	3	pararrayos
17	24,9	0,2	radiadores
18	25,5	33	pararrayos
19	26	96	radiadores
20	26,5	6	intercambiadores
21	26,6	25	radiadores
22	29,3	115	aislador BT
23	30,3	354	aislador BT
24	30,5	11	aislador BT
25	31,6	2	aislador BT

Fig. 23: Resultado del cálculo modal para los diversos elementos del transformador de la **figura 22**.

■ cálculo pseudoestadístico

(Las frecuencias de resonancias están más allá de la parte alta del espectro de respuesta). En este caso, el cálculo es de tipo estático, y el modelo se somete, para cada dirección, a la aceleración máxima del terreno,

■ cálculo por superposición modal

(Algunas frecuencias de resonancia se sitúan en la parte alta del espectro de respuesta).

En este caso, la respuesta del modelo para una dirección dada se obtiene multiplicando la deformada de cada modo (D_i) por su coeficiente de participación y por la aceleración leída a la frecuencia de este modo en el espectro de respuesta. A continuación, las respuestas de los diversos modos se asocian para obtener la respuesta global para una dirección dada.

Pensemos que el espectro de respuesta, por definición, incluye el efecto de la amortiguación; es pues necesario utilizar un espectro de respuesta que corresponda a la amortiguación de la estructura estudiada, incluso para los casos más desfavorables, es decir, más débiles.

El último paso consiste en comprobar que los valores máximos de los desplazamientos y esfuerzos sobre las conexiones son admisibles, es decir, compatibles con las características mecánicas de la estructura. Para esto existen reglas de combinación de las fuerzas sísmicas y estáticas (peso propio, nieve, viento, presión, esfuerzos de tracción...).

Por otra parte, el reparto espacial de las aceleraciones servirá para verificar la resistencia funcional de apartamentos y de los instrumentos que contiene o para ensayos específicos o para hacer las comparaciones con ensayos ya efectuados.

Límites del método de «elementos finitos»

Ante todo, la modelización por elementos finitos presenta siempre desviaciones entre los modos de resonancia calculada y los modos de resonancia real del equipo instalado.

Esto se debe principalmente a las aproximaciones que se han hecho sobre las condiciones límite (modo de fijación de la estructura al terreno), las conexiones internas, las no linealidades, así como las diversas simplificaciones inherentes a la modelización.

Generalmente, sólo el primer modo de vibración se calcula con un error aceptable. Sin embargo, visto el característico ancho de banda de la vibración sísmica, la estimación de los esfuerzos calculados del espectro de respuesta se adapta con un cierto error sobre la posición exacta de las frecuencias de resonancia. Por este motivo, la utilización de este método en la fase de diseño mantiene todo su interés.

Ajuste

En cuanto se dispone del prototipo del equipo, es posible corregir el modelo, de los elementos finitos, efectuando el «ajuste» a partir de los datos obtenidos en la medida.

Existen diversas técnicas experimentales que permiten obtener las características dinámicas reales de la estructura y, mediante programas informáticos «de ajuste», aplicar al modelo (de los elementos finitos) las modificaciones necesarias para que represente mejor la realidad.

4 Calificación mediante simulación o ensayo

4.1 Introducción

Calificar es aportar la prueba de la resistencia de un equipo en condiciones de sobrecarga identificadas o normalizadas.

Existen dos grandes sistemas de aproximación para realizar una calificación sísmica:

- el primero consiste en ensayar con «valores reales» sobre los equipos,
- el segundo consiste en utilizar la modelización con elementos finitos junto con un cierto número de datos experimentales.

Este último va tomando un puesto cada vez más importante en el proceso de calificación, especialmente en lo que se refiere a la resistencia mecánica. Pero actualmente, todavía se considera delicado aplicar este sistema a los aspectos funcionales.

Se utiliza la calificación por ensayos:

- para equipos de dimensiones tales que permiten someterlos directamente a ensayos,
- para equipos específicos (únicos, series pequeñas),
- cuando el aspecto funcional es determinante (complejidad o alto nivel de seguridad).

Se utiliza la calificación mediante cálculo:

- si las dimensiones del equipo son incompatibles con los equipos de ensayo (por ejemplo, un gran transformador),
- cuando un aparato ha sido ya utilizado en otras condiciones sísmicas,
- cuando un aparato es una versión modificada de un aparato ya calificado,
- cuando no es necesario que el equipo funcione durante un seísmo.

Se utiliza la calificación mixta (modelización y ajuste experimental):

- para los equipos de grandes series,
- cuando las normas o los operadores lo justifican (datos funcionales conocidos),

De hecho, en muchos casos de prototipos, se utiliza la modelización antes de proceder a realizar ensayos con «valores reales». En este caso, las probabilidades de acertar a la primera y superar las pruebas de calificación son máximas.

A continuación vamos a:

- ilustrar con dos ejemplos: la calificación mixta y la calificación por ensayos con «valores reales», precedida de una modelización durante la fase de diseño,
- desarrollar la metodología de la calificación mediante ensayos.

4.2 Calificación mixta (modelización y ajuste experimental)

El método combina cálculos y ensayos, para:

- construir un modelo matemático,
- recoger, mediante ensayos parciales (análisis modal experimental) sobre el prototipo, los datos que se refieren al comportamiento dinámico del equipo (amortiguaciones, frecuencias de resonancias, deformadas modales),
- reajustar el modelo matemático con los datos aportados por los ensayos.

El modelo de cálculo permite evaluar la resistencia mecánica del equipo al conjunto de solicitaciones sísmicas y de servicio. La prueba de resistencia funcional permitirá comprobar si el equipo resulta afectado por las deformaciones y aceleraciones dadas obtenidas mediante el cálculo.

El ejemplo siguiente, que combina ensayos y cálculos, ilustra el método utilizado para establecer la resistencia al seísmo de un interruptor automático de alta tensión.

Calificación al seísmo de un interruptor automático AT (figura 24).

■ Primera etapa: modelización del interruptor automático.

La modelización se realiza por elementos finitos: vigas, placas y envolventes (para los aisladores); el modelo tiene 2670 elementos y 3200 nudos.

■ Segunda etapa: análisis modal experimental (figuras 25 y 26).

Este análisis se efectúa sobre un prototipo. Consiste en tomar datos, midiendo, las funciones de transferencia entre un punto de vibración (fuerza producida) y los puntos de respuesta (aceleraciones medidas), identificando a continuación la respuesta real de la estructura (frecuencias de resonancia y deformaciones asociadas).

■ Tercera etapa: reajuste del modelo de elementos finitos.

Esta etapa consiste en reajustar los parámetros de la modelización de elementos finitos (detalle de la malla, parámetros físicos: módulo de Young, masa volumétrica... condiciones límites) de manera que las características dinámicas del modelo se acercan lo más posible a la realidad.

■ Cuarta etapa: medida del coeficiente de amortiguación.

Para calcular la respuesta del interruptor automático por el método del espectro de respuesta, se ha de conocer la amortiguación

que hay que aplicar al modelo. Esto se obtiene sometiendo el prototipo a una deformación mecánica importante (prueba de oscilación libre o «al soltar»); la amortiguación se deduce observando la disminución de las oscilaciones.



Fig. 24: Interruptor automático Merlin Gerin destinado a equipos para centros de transformación AT.

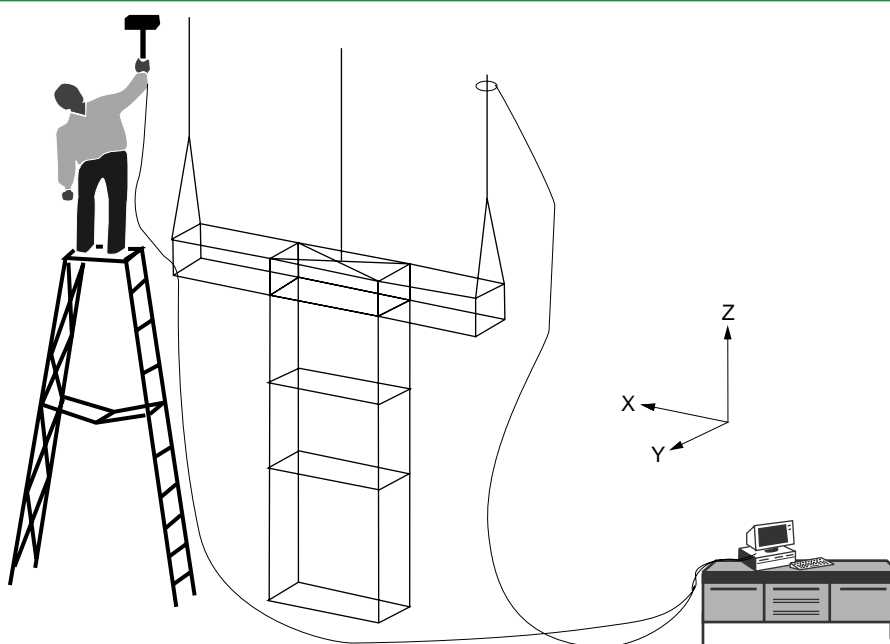


Fig. 25: Análisis modal experimental.

■ Quinta etapa: cálculo de los esfuerzos, tensiones y desplazamientos bajo carga sísmica.

Se efectúa el cálculo de la respuesta por el método del espectro de respuesta, lo que permite tener presentes diferentes tipos de seísmos.

■ Sexta etapa: comprobación de la integridad y de la funcionalidad del aparato bajo esfuerzos sísmicos.

Esta comprobación consiste en:

□ por una parte, verificar la resistencia mecánica de la estructura en cuanto a los esfuerzos en las conexiones y las tensiones sobre el equipo (peso, tensiones internas, esfuerzos estáticos en los bornes, viento...) cuando el interruptor automático se somete a un

conjunto de sobrecargas tanto de origen sísmico como de servicio (**figura 27**),

□ por otra parte, asegurar que las deformaciones producidas por las solicitaciones sísmicas no impidan el funcionamiento del aparato; esta última comprobación se hace estáticamente, sometiendo el equipo a las deformaciones dadas por el cálculo y ejecutando las diversas maniobras de servicio para las que está previsto.

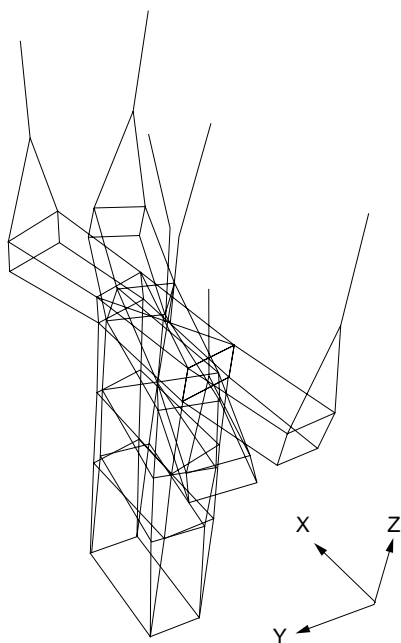


Fig. 26: Deformada modal experimental resultante ($f = 3,8$ Hz).

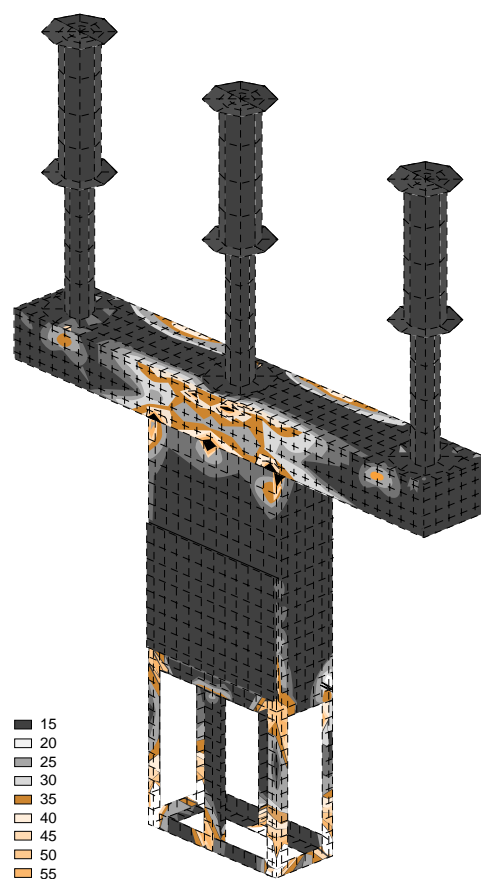


Fig. 27: Cálculo de esfuerzos.

4.3 Calificación mediante ensayos con «valores reales», precedida por la modelización

Aunque el equipo deba de sufrir ensayos de calificación, es siempre interesante, para ganar tiempo y ahorrar dinero, hacer sobre planos, antes de la fabricación, estas pruebas de modelización.

Calificación de armarios de mando y control

El ejemplo siguiente se refiere a armarios de mando y control destinados a las centrales nucleares. Estos equipos tienen una reglamentación muy exigente en lo que se refiere a la seguridad de funcionamiento y por ello se someten, con «valores reales», a pruebas de resistencia a las sollicitaciones sísmicas (**figura 28**).

Para poder llevar un equipo a los ensayos de calificación con las mejores garantías de buen comportamiento, se efectúa antes un cierto número de simulaciones e investigaciones en la fase de diseño.

El proceso que sigue tiene las siguientes etapas:

- Evaluación de la robustez de los aparatos principales instalados en el armario.

Con equipos de los que no se tiene ningún dato histórico, se efectúa una prueba de límites de

resistencia en la gama de frecuencias de la excitación sísmica. Ésta consiste en buscar el umbral de fragilidad del equipo (eventualmente con tensión). Este dato será útil para definir un objetivo en cuanto a la limitación de la transferencia del armario,

- Estimación de la transferencia de la estructura del armario.

La forma del espectro de respuesta y el umbral de fragilidad de los equipos que contiene dan una indicación en las características deseables de la transferencia del armario. La modelización del armario tiene por objetivo identificar las principales formas de resonancia en la gama de frecuencia de la excitación sísmica (0-40 Hz). El armario se modeliza en elementos, vigas y placas, y los equipos que contiene se representan mediante masas e inercias puntuales.

El cálculo por elementos finitos se efectúa para estimar los niveles de excitación sísmica que el armario va comunicar a los equipos colocados en su interior. Según la posición en la gráfica de las primeras frecuencias de resonancia, se aplican (sobre el plano) las modificaciones adecuadas para reducir la amplificación de las aceleraciones del terreno.



Fig. 28: Armario BT para una central nuclear durante las pruebas de ensayo de calificación.

- comprobación experimental de las características del armario (**figura 29**).

En el armario equipado y cableado se efectúa experimentalmente una medida de las primeras frecuencias de resonancia para verificar que las características de la estructura real no se apartan de los datos del cálculo.

- incidencia de las características reales del armario sobre el equipo.

En el comportamiento de los equipos durante los ensayos sísmicos, se evalúa, respecto al espectro de respuesta de la excitación sísmica, la incidencia de la desviación entre las características dinámicas calculadas y medidas del armario.

Se introducen modificaciones cuando las desviaciones producen amplificaciones vibratorias incompatibles con las características del equipo. Por ejemplo, se refuerza la fijación al suelo del armario y/o la fijación de un aparato concreto.

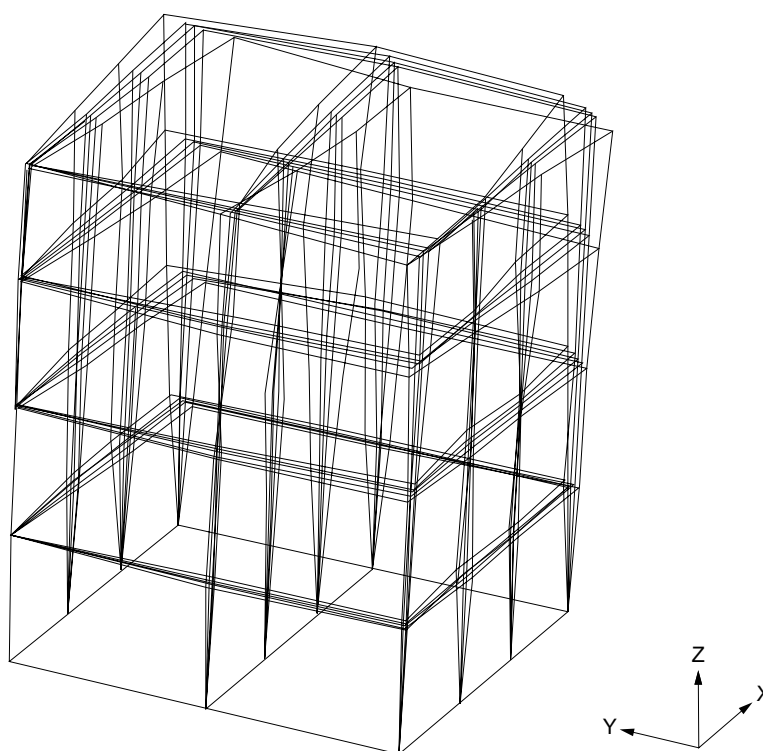


Fig. 29: Deformación modal de la estructura del armario resultante del ensayo.

4.4 Calificación mediante ensayos

La calificación mediante ensayos no siempre es posible (equipos pesados o de grandes dimensiones) y con frecuencia es delicado aplicarla. Necesita grandes medios de prueba (mesas vibrantes con grandes desplazamientos accionadas por sistemas hidráulicos de control muy sofisticado) y que sólo algunos laboratorios especializados tienen la posibilidad de realizarlos. En cuanto al coste, hay que añadir al servicio del laboratorio:

- el coste del transporte,
- el coste del montaje del ensayo,
- eventualmente, el del material, si queda inutilizable después que la prueba.

El procedimiento de desarrollo de la calificación de un equipo se describe generalmente en un cuaderno de las cargas (o un programa de ensayos), establecido en función de las normas o recomendaciones vigentes (CEI 68-3-3/UTES C 20420, ANSI, ENDESA, IEE, etc.).

Hay varias posibles variantes en el desarrollo de la calificación, que dependen:

- de las informaciones disponibles sobre la actividad geosísmica de la zona donde se ha de instalar el equipo,
- de la complejidad del equipo,
- de los datos conocidos sobre el comportamiento dinámico del equipo,
- de la representatividad del equipo bajo prueba respecto a los de serie,
- del grado de seguridad de funcionamiento que debe tener el equipo durante un sismo.

Sin entrar en detalles, se propone a continuación una ojeada a los criterios que intervienen en la elección de las modalidades de pruebas de calificación, según la norma CEI 68-3-3.

Configuración del equipo que se presenta a ensayo

Antes de proceder a una prueba de calificación sísmica, es necesario fijar cierto número de condiciones previas. Éstas se detallan en una especificación especial que menciona, entre otras, las disposiciones a tomar en lo que se refiere a:

- la elección de la muestra de ensayo. A veces se necesitan análisis preliminares para asegurar que la muestra utilizada representa el caso o elemento más desfavorable que se podrá encontrar,
- las fijaciones y el montaje. Deben de ser idénticos a los que se utilicen en el lugar de instalación,
- las condiciones de servicio que hay que tener en cuenta (mecánicas y eléctricas),
- el funcionamiento exigido durante la prueba, así como los medios a utilizar para verificar el mantenimiento de las prestaciones previstas (medida del aislamiento o de la continuidad eléctrica, poder de corte, programa de animación, etc.).

Los criterios de aceptación y/o de mal funcionamiento se clasifican en tres grados de calidad:

- grado 0: el equipo no debe presentar ningún defecto de funcionamiento ni durante ni después de la prueba sísmica,
- grado 1: el equipo puede presentar algún fallo de funcionamiento durante la prueba sísmica, pero debe de ser operativo inmediatamente después del ensayo,

- grado 2: el equipo puede fallar durante el ensayo sísmico y necesitar una intervención o ajuste para volver a su estado normal aunque sin que llegue a ser necesario proceder a una sustitución o una reparación.

Elección del grado de severidad de la prueba

Se han previsto dos tipos, según la disponibilidad y/o la exactitud de la definición de las características sísmicas del entorno y del equipo.

- clase sísmica general: en este caso, la aceleración a la que será sometido el equipo está normalizada (la norma suele proponer varios valores de exigencia),
- clase sísmica específica: se refiere a equipos a los que se aplica un movimiento sísmico procedente de un estudio sismológico (SMHV). Tiene también en cuenta las características geográficas de ubicación y el edificio o las estructuras de soporte. Es el caso normal de equipos electrotécnicos, especialmente de los de las centrales nucleares, en cuyo caso la aceleración a que se somete el equipo está especificada mediante un espectro de respuesta.

Diferentes tipos de ensayos

Se emplean diversos métodos para recrear el medio o entorno sísmico en una mesa vibrante. Difieren por el número de direcciones de excitación simultáneas (monoaxial, poliaxial) y por la manera de reproducir las ondas sísmicas con los medios disponibles para el ensayo.

- pruebas monoaxiales, poliaxiales.

El movimiento sísmico del terreno se produce simultáneamente en todas las direcciones y, aunque su simulación exacta requeriría disponer de mesas triaxiales, los medios de prueba habituales permiten realizar mejor los ensayos biaxiales (dos ejes vibrando simultáneamente).

Si no se necesita una gran precisión en el comportamiento sísmico del equipo, se recomienda la prueba biaxial. Éste necesita una instalación que permita la excitación simultánea con dos ondas independientes, según dos de los ejes preferenciales del equipo; el espectro de respuesta de prueba debe ser al menos igual al espectro de respuesta especificada. Para efectuar el ensayo en los 3 ejes, basta hacer girar el equipo alrededor de un eje vertical y repetir de nuevo la misma prueba.

El ensayo de tipo monoaxial, realizado sucesivamente según los tres ejes preferenciales de prueba del equipo, puede quedar justificado en ciertas circunstancias:

□ cuando el equipo, por sus condiciones de montaje in situ, sólo queda sometido a una única vibración, lo que puede considerarse como monoaxial,

□ cuando no existe acoplamiento (o si es débil) entre los tres ejes preferenciales de ensayo del equipo tomados de dos en dos,

■ ondas monofrecuencia o multifrecuencia

En general, la onda de ensayo utilizada debe de:

□ producir un Espectro de Respuesta de Prueba (SRE) superior o igual al Espectro de Respuesta Especificada (SRS) en la especificación particular,

□ tener un valor de cresta de la amplitud máxima de la aceleración igual o superior a la del terreno (APN) del SRS,

□ reproducir, con un margen de seguridad, los efectos de un seísmo especificado,

□ no utilizar frecuencias superiores a 35 Hz,

□ ser de una duración al menos igual al de la parte fuerte del seísmo; en general esté comprendida entre 5 y 10 s.

Puesto que el espectro de respuesta especificada es generalmente de banda ancha, se recomienda el empleo de la onda con múltiples frecuencias.

Los medios de ensayo modernos permiten generar estas ondas o, más exactamente, controlar el medio de ensayo, sea a partir de un acelerograma directamente suministrado por la especificación de ensayo, sea sintetizando un acelerograma a partir del espectro de respuesta especificada (SRS), de una duración de 20 segundos. En ciertos casos de transferencia, como los que se presentan en los edificios, el espectro de respuesta es de banda estrecha; en este caso, el ensayo puede realizarse con ondas monofrecuencia.

5 Conclusión

La gran disponibilidad exigida a la distribución eléctrica y a los sistemas de control obliga a tener en cuenta cualquier tipo de influencia o sobrecarga del entorno (mecánicas, climáticas, electromagnéticas...). Entre éstas figuran las tensiones sísmicas que son especialmente destructoras y que deben de ser especificadas desde la fase de diseño de los equipos.

Para hacerlo es necesario conocer la severidad del seísmo máximo histórico probable expresado en forma de espectro de dimensionamiento o, para los equipos de serie, escoger el nivel de severidad de una clase sísmica normalizada.

Actualmente, la resistencia mecánica de un equipo puede ser valorada con precisión gracias a la calidad de la modelización y al cálculo de esfuerzos con el método de los elementos finitos.

Aportar una prueba de la conservación de la funcionalidad, durante o después de un seísmo, es más difícil y se necesita generalmente utilizar conjuntamente la modelización y los ensayos de los elementos funcionales. Los algunos ejemplos de calificación por modelización y/o ensayo, que se han presentado en los capítulos 3 y 4, demuestran el saber hacer de una empresa que sigue suministrando, después de muchos años, numerosos equipos para las centrales nucleares y equipos eléctricos para países expuestos a seísmos.

Igual que la calidad o la compatibilidad electromagnética, la resistencia sísmica debe de ser controlada desde la fase de diseño; si no, normalmente, las acciones correctivas resultan complejas y de un coste elevado.

Por tanto, la modelización y los poderosos medios actuales de cálculo se utilizan ampliamente para diseñar equipos «antisísmicos» eléctricos y electrónicos.

Bibliografía

Normas

- CEI 68-3-3 (UTE C20 420): Méthodes d'essais sismiques applicables aux matériels.
- CEI 1166: Disjoncteurs HT: guide pour la qualification sismique.

Publicaciones diversas

- Recommandations AFPS90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Tomos 1 y 2.
- Calcul dynamique des structures en zone sismique por Alain CAPRA y Victor DAVIDOVICI.
- La revue des laboratoires d'essai.
n° 9, 31, 36, 39

Cuadernos Técnicos

- CT 85 (1977): Tenue de l'appareillage électrique aux secousses sismiques.
P. PY, J.-Y. BERTHONNIER
(presenta soluciones tecnológicas para interruptores automáticos AT).