

## Investigaciones sísmicas en los Estados Unidos

Cuando uno analiza con cierta detención el problema de las investigaciones sísmicas en Estados Unidos llama fuertemente la atención la gran separación que existe entre la teoría pura, trabajos realizados preferentemente por profesores en las Universidades, y las aplicaciones prácticas. Da la impresión muchas veces que las investigaciones realizadas en estos dos campos no tuvieran nada que hacer unas con otras, desconociéndose el hecho fundamental de que el objetivo común es obtener estructuras estables y económicas.

Es notorio además, que no se puede aplicar en el momento actual todo lo que se sabe en cuestiones sísmicas.

Se han realizado esfuerzos para mejorar este estado de cosas. El más importante de ellos ha sido la creación en los últimos meses del año pasado de un Instituto de Investigaciones asísmicas que tratará de coordinar todo lo que se sabe en estas materias y tratará de orientar en forma racional las investigaciones futuras. En este Instituto trabajan los profesores Jacobsen de Stanford y Martel del Instituto Tecnológico de California entre muchos otros. Se abriga un justo optimismo de que este Instituto dé luces definitivas sobre problemas aun no resueltos, por ejemplo, disipación de energía a través de las fundaciones de las estructuras, capacidad de amortiguamiento de las estructuras, etc. Se proyecta, por ejemplo, construir un edificio a escala natural montándolo en una gigantesca mesa vibradora y midiendo en puntos cuidadosamente elegidos mediante instrumentos eléctricos (strain-gages de tipo dinámico) las fatigas instantáneas que se producen cuando se reproduce con esta mesa vibradora el movimiento obtenido de un sismograma real.

La sola enunciación de esta experiencia da idea de la capacidad con que cuenta este Instituto en la tarea que se ha propuesto.

---

El problema general de las investigaciones sísmicas ha sido abordado en los centros de experimentación desde dos puntos de vista:

- a) Realizar estudios estadísticos de los daños producidos durante un terremoto, y
- b) Hacer un análisis del comportamiento dinámico de una estructura cuando es sometida a un terremoto.

La dificultad principal en cualquiera de estos procedimientos consiste naturalmente en el gran número de variables y factores incontrolables que intervienen.

La constatación estadística de los daños producidos en edificios, requiere un número muy grande de observaciones y por no poderse contar con éstas, parece poco práctica esta primera posibilidad.

El segundo procedimiento, a pesar de la inmensa complejidad analítica, promete dar la solución del problema.

El punto fundamental por resolver será el de conocer los esfuerzos y las deformaciones en una estructura cuando está sometida a un temblor.

Esta proposición presenta a su vez dos facetas distintas. En primer lugar, no hay dos temblores exactamente iguales y no es posible predecir los movimientos del terreno para un temblor futuro. Por otra parte hay una variedad inmensa de estructuras diferentes.

Puesto que debemos descartar el intento de averiguar cuales serían todas las fatigas y deformaciones que se producen en cualquier estructura para cualquier terremoto, se debe abordar el problema desde un ángulo especial.

El problema general se divide en dos problemas especiales. Primero un estudio de los temblores para determinar cuales son las características comunes a todos ellos y ver como estas propiedades comunes pueden utilizarse para predecir los máximos esfuerzos en las estructuras. Segundo, un estudio de las diferentes estructuras para encontrar las propiedades que influyen su comportamiento dinámico durante un temblor.

En definitiva, habrá que estudiar a) lo que le ocurre a una estructura idealizada cuando es solicitada por un terremoto real para conocer las características de los terremotos y b) estudiar el efecto de un temblor artificial sobre una estructura real con el propósito de definir las características de los edificios.

En la Universidad de Stanford el profesor Jacobsen ha investigado principalmente este caso b). Particularmente notable fué la experimentación que realizó con un modelo de un edificio de 16 pisos con el cual determinó el esfuerzo de corte en todos los pisos, inducido por un movimiento sinusoidal de la mesa vibradora donde estaba montado el modelo.

Otros estudios hechos en Stanford, comprenden:

- (1) Interconexión de vibraciones de traslación y de rotación en edificios.
- (2) Comportamiento experimental de un modelo de un edificio asimétrico de un piso para un movimiento idealizado del terreno.
- (3) Presión de agua en un estanque causada por un temblor simulado.
- (4) Investigaciones teóricas para sistemas vibratorios no lineales.

En el Instituto Tecnológico de California se ha enfocado el problema general desde el otro punto de vista, es decir se ha tratado de definir las características de un temblor conociendo las reacciones de una estructura simplificada frente a un temblor real. Martel y Housner son los nombres vinculados a estas investigaciones.

El estudio de las características de los temblores estuvo basado en los acelerogramas registrados por la U. S. Coast and Geodetic Survey.

Aplicando conceptos de matemáticas estadísticas, se constató que todos los temblores que se analizaron tienen una característica común, la naturaleza notablemente irregular que acusan todos ellos.

Una consecuencia de esto mismo, es que la máxima energía que se transmite a una estructura por el movimiento del suelo, es esencialmente independiente del período de vibración. Esencialmente independiente significa que si en un gráfico se lleva la máxima energía en función de períodos de vibración que van de 2|10 seg. a 3 seg., se obtiene una línea irregular cuya altura media es aproximadamente constante para toda esta zona de variación. Las irregularidades en esta línea son muy bruscas de manera que dos estructuras de períodos muy cercanos, pueden alcanzar valores muy diferentes de la máxima energía absorbida, a pesar de que los valores medios de la máxima energía son sensiblemente independientes del período.

Esto podría explicar el hecho constatado, bastante sorprendente, de estructuras muy similares situadas una al lado de la otra y que han sufrido daños muy diferentes durante un temblor.

Esta característica de los temblores puede explicarse diciendo que las ondas que trasmite el suelo durante un terremoto no están espaciadas uniformemente en el tiempo de manera que no están en resonancia con las vibraciones de una estructura. En realidad el tiempo de llegada de las ondas es tal que su efecto tiende a anularse y la máxima energía que absorbe la estructura es solamente un pequeño porcentaje de la que se obtendría si la resonancia existiera.

Por supuesto esta anulación de efectos no es completa.

La llegada irregular (en el tiempo) de las ondas a la estructura es la razón de por qué estructuras con período corto o con período largo absorben igual energía, y es también la razón de por qué dos estructuras con períodos muy semejantes pueden tener comportamientos muy diferentes.

Este es muy brevemente el resultado obtenido al analizar las características de los temblores.

El estudio del comportamiento de una estructura durante un temblor está dirigido a averiguar qué máxima fatiga se inducirá en una estructura con propiedades específicas, cuando se conocen las características de los temblores.

La máxima dificultad en este problema es la determinación de las propiedades de las estructuras reales.

Como lo decíamos más atrás, faltan investigaciones acerca de las propiedades dinámicas de los suelos, y de la disipación de energía a través de las fundaciones y en la estructura.

Al abordar este problema de las características de las estructuras en el Instituto Tecnológico de California, se demostró la conveniencia de elegir factores sísmicos variables con la altura. Por lo demás a esta misma conclusión llegaron las investigaciones realizadas en Stanford.

Una importancia muy grande para simplificar las investigaciones sísmicas, ha tenido el péndulo de torsión. Ha sido usado además en la solución de varios problemas difíciles. Biot lo usó en la Universidad de Columbia, Glover en el B. of R. en Denver y Martel en Caltec.

Para poder determinar los esfuerzos de una estructura cualquiera cuando es sometida a movimientos tomados de un sismograma, es necesario resolver un problema previo. Conocer la respuesta de un sistema de un grado de libertad a la vibración, cuando se le excita con la curva correspondiente de un sismograma dado (espectro del temblor). Por su facilidad de operación se elige al péndulo de torsión como sistema de un grado de libertad u oscilador simple. El caso de un oscilador simple sometido a un cierto movimiento es del mismo tipo al de un péndulo de torsión cuyo punto de suspensión es rotado en ciertos ángulos. Se puede demostrar que se pue-

den obtener exactamente los mismos resultados experimentales al usar un oscilador simple o un péndulo de torsión. La ventaja del péndulo consiste en que el equipo necesario es más fácil de construir y se puede obtener una mayor precisión en los resultados.

El problema en síntesis es evaluar la integral definida que da la respuesta de un oscilador simple para movimiento arbitrario del terreno. Puesto que esta integral es la misma que define el movimiento de un péndulo de torsión, se usa el péndulo para evaluar mecánicamente la integral. Por supuesto que hay procedimientos matemáticos para resolver el mismo problema pero esta analogía mecánica permite encontrar la solución 10 a 20 veces más rápidamente que con la solución aritmética o gráfica.

Su precisión es tal que se pueden duplicar los resultados con una aproximación de un 5%. Fácilmente pueden estudiarse además con el péndulo de torsión, ciertos tipos de amortiguamiento que dan una idea de cómo se disipa la energía en este sistema de un grado de libertad.

Tuvimos oportunidad de conocer dos cálculos importantes hechos con ayuda del péndulo de torsión.

Uno de ellos es el diseño de un puente ferroviario sobre el río Pit. La característica más notable de este puente es que algunos de sus machones tienen 120 metros de altura de los cuales hay 100 metros bajo agua (proveniente del embalse del tranque Shasta).

Se trataba de proyectar esta estructura y considerar en el diseño las fuerzas provenientes de los temblores, solicitación siempre presente en el Estado de California.

En lugar de aceptar suposiciones arbitrarias respecto al movimiento del terreno, se tomó como base para el estudio los sismogramas de tres terremotos ocurridos en la región.

Después de los primeros tanteos, la investigación se orientó principalmente al estudio de estos dos puntos fundamentales:

- 1) El efecto de la sumersión en la masa aparente o virtual del machón;
- 2) El efecto del temblor en un puente sobre machones elásticos empotrados en su base.

La determinación de la masa total que actúa en la solicitación dinámica exige conocer qué volumen de agua participa en el movimiento junto con la estructura.

Esto puede determinarse en forma relativamente fácil recurriendo a la teoría de modelos. Se hace oscilar lentamente un modelo del cuerpo primeramente como un péndulo al aire libre y luego sumergido dentro del agua. La comparación de períodos indica cual es la masa virtual. Como dato ilustrativo indicaré que la masa virtual de uno de los machones sumergido resultó ser más del doble que la del mismo no sumergido.

Calculada la masa de las pilas, se determinaron en seguida sus diferentes modos de vibrar (modo fundamental, 1ra. armónica, etc.).

El proceso sigue ahora ajustando el péndulo de torsión en su período, sucesivamente para los correspondientes períodos de la estructura, obteniendo así para cada período la curva respuesta del péndulo de torsión.

La solución definitiva se obtiene finalmente por superposición de estas curvas, cuyo conocimiento permite determinar los momentos y esfuerzos cortantes.

Un procedimiento similar se siguió para estudiar la estabilidad sísmica de las gigantescas torres de toma del Boulder Dam (230 m).

Es de observar que en cualquier análisis del tipo indicado, la solución obtenida no es rigurosamente exacta, porque las características de amortiguamiento de la estructura sólo pueden ser estimadas.

El péndulo de torsión se ha aplicado también para el estudio de los materiales más allá del límite elástico. El objetivo de esta idea, es de basar el diseño asísmico en la consideración de que sea posible admitir una cierta deformación plástica sin llegar a impedir que la estructura siga siendo capaz de soportar las cargas normales. La magnitud de esta deformación no elástica permitida, depende de las propiedades plásticas de los materiales estructurales, de la naturaleza e importancia de la estructura y de la frecuencia de terremotos importantes.

Finalmente debe destacarse que el péndulo de torsión al permitir encontrar fácilmente la curva respuesta de un oscilador simple al movimiento impartido por un temblor, (espectro de temblor), proporciona un procedimiento racional para clasificar la intensidad de los temblores.

La justificación de esto se basa en que el desplazamiento, la velocidad y las fatigas de una estructura sin amortiguamiento son funciones lineales de esta curva respuesta, curva que a veces se ha llamado el espectro del temblor.

Es este estudio de los sismogramas y su aplicación al cálculo de grandes estructuras lo que define en forma más clara la orientación que se ha dado en los últimos años en los Estados Unidos a la investigación del problema de los terremotos.

## A N E X O I

### PENDULO DE TORSION

En el estudio de estructuras que vibran sin amortiguación y sometidas a un movimiento arbitrario del terreno, se encuentran ciertas expresiones para el desplazamiento, la velocidad y la fatiga en un punto cualquiera que están formados de uno o más términos de la forma general.

$$A \int_0^T \ddot{x} \operatorname{sen} p (T - t) dt$$

donde A es un factor de amplitud que expresa la influencia de las características físicas de la estructura.

$\ddot{x}$  es la aceleración del terreno

p es  $2\pi$  veces la frecuencia de vibración

T es el tiempo para el cual se avaluó la expresión y

t es la variable tiempo.

La manera simple de obtener esta expresión consiste en hacer uso de la analogía entre un péndulo de torsión y un oscilador simple. El fenómeno que se presenta cuando un oscilador simple es sometido a movimientos arbitrarios es de la misma naturaleza que el de un péndulo de torsión cuyo punto de suspensión es rotado en ángulos arbitrarios. Se observa que se obtiene exactamente el mismo resultado usando el oscilador simple o el péndulo de torsión. La ventaja del péndulo consiste en la simplicidad del equipo para operar, unido a su mayor precisión.

A continuación mostramos el método para encontrar la integral definida que proporciona la curva respuesta de un oscilador simple a un movimiento arbitrario del terreno.

El desplazamiento de un oscilador simple está dado por

$$y = -\frac{T}{2\pi} \int_0^{t_1} a \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t_1 - t) dt$$

donde  $T$  es el período del oscilador y  $a$  es la aceleración del terreno.

Si se tratara de obtener el esfuerzo de corte, es decir, la fuerza ejercida por la suspensión en la masa  $M$  tendríamos

$$S = -M \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 y$$

y para  $M = 1$

$$S = \frac{2\pi}{T} \int_0^{t_1} a \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t_1 - t) dt \quad (1)$$

Esta es la integral por determinar.

El desplazamiento angular  $\Theta$  de un péndulo de torsión cuyo punto de suspensión es rotado en un ángulo  $\alpha$  vale

$$\Theta = \frac{2\pi}{T} \int_0^{t_1} \alpha I \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t_1 - t) dt$$

donde  $T$  es el período e  $I$  es el momento polar de inercia.

Para  $I = 1$  el desplazamiento vale

$$\Theta = \frac{2\pi}{T} \int_0^{t_1} \alpha \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t_1 - t) dt \quad (2)$$

Comparando (2) con (1) y multiplicando los dos miembros de (2) por  $R$  y poniendo  $R\alpha = a$

$$S = R \Theta$$

donde

$$\Theta = \frac{2\pi}{T} \int_0^{t_1} \frac{a}{R} \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t_1 - t) dt$$

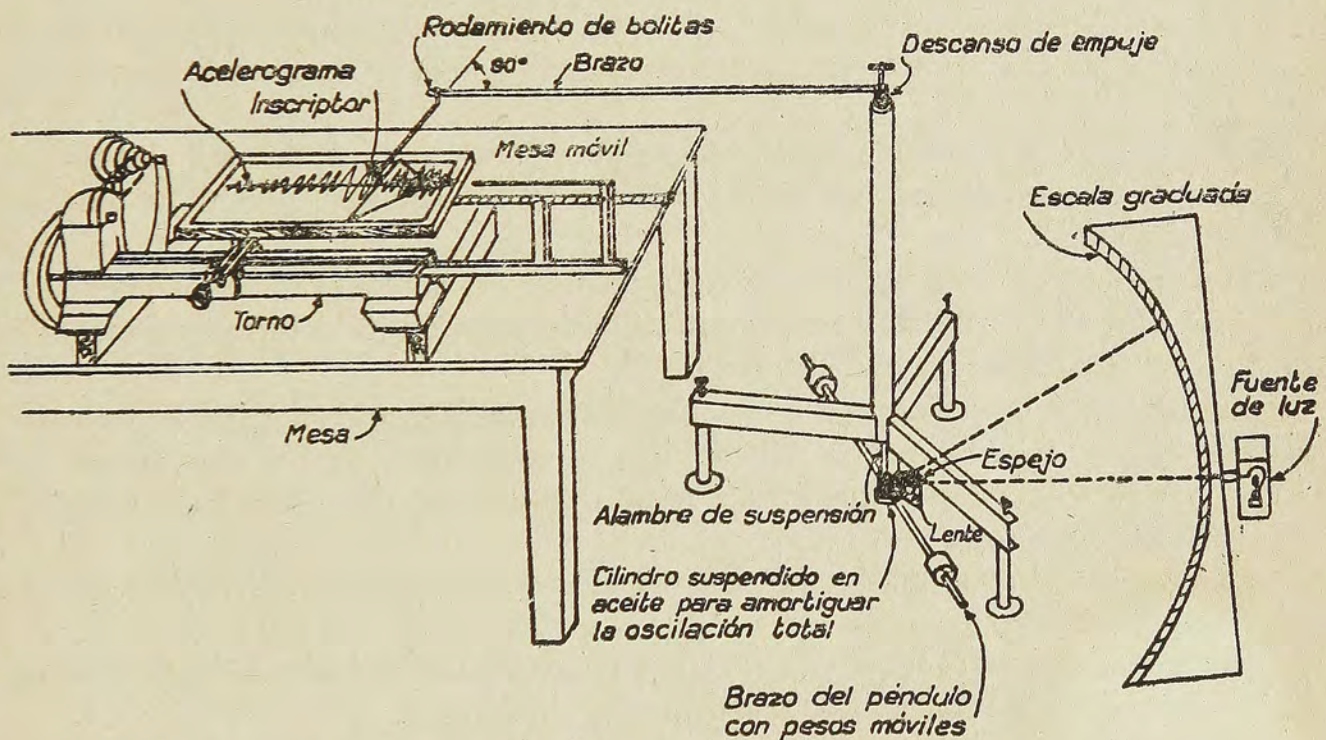
Si se monta un brazo de largo  $R$  en el punto de suspensión de un péndulo de torsión y con el extremo del brazo se hace seguir un acelerograma « $a$ », el esfuerzo de corte  $S$  está dado directamente por  $R$ .

Particularmente interesante es el análisis que nos proporciona la velocidad del oscilador simple en función de su período.

Esta curva nos permite predecir la energía máxima que es comunicada al oscilador simple (sin amortiguamiento) para un movimiento arbitrario del terreno. Las investigaciones realizadas con 10 sismogramas en el Instituto Tecnológico de California revelan que esta energía es independiente del período por lo menos dentro del campo de variación de los períodos que se consideraron. Aunque esta máxima energía es independiente de las características físicas de la estructura, no ocurre lo mismo con los esfuerzos de corte. En consecuencia es ventajoso ajustar las propiedades físicas de una estructura de tal manera que esta energía sea menos destructiva. La manera más efectiva de conseguir esto es disminuyendo la masa y aumentando la flexibilidad.

El equipo necesario para analizar los sismogramas consiste en una mesa móvil sobre la cual está montado el acelerograma y un péndulo de torsión cuyo período puede ser variado.

### PENDULO DE TORSION



En el Instituto Tecnológico de California el acelerograma está montado en la mesa de un pequeño torno cuyo tornillo sin fin le comunica una velocidad uniforme. La velocidad de traslación se varía cambiando la posición de la polea motriz. El péndulo de torsión consiste en una barra de 90 cm. de largo con dos pesos desplazables por medio de los cuales se puede hacer variar el período. Hay además 4 hilos de suspensión, intercambiables, de diámetros diferentes para producir cambios más grandes en el período. Un haz de rayos que se refleja en un espejo montado en el péndulo arroja su luz en una escala graduada.

Los desplazamientos del haz de luz son registrados por un observador.

Se requiere gran habilidad de parte del operador para hacer el acelerograma. Para asegurar un resultado satisfactorio ha sido necesario mantener la velocidad de

la mesa movable entre los límites de una máxima velocidad de 1 seg. del acelerograma para ser pasada en 10 seg. y una velocidad mínima de 1 seg. del acelerograma para ser pasado en 25 seg.

Los períodos del péndulo de torsión en el ejemplo que comentamos variaban de 5,8 seg. a 120 seg. Modificando la velocidad de traslación de la mesa y los períodos del péndulo, fué posible determinar los espectros para períodos comprendidos entre 2|10 de seg. a 3 seg.

## A N E X O I I

### COEFICIENTES SISMICOS PARA EL CALCULO DE EDIFICIOS

De investigaciones realizadas en el Instituto Tecnológico de California para 10 sismogramas, se ha deducido que la máxima energía entregada a una estructura que vibre con movimientos no amortiguados, es esencialmente independiente del período de vibración de la estructura.

No ocurre lo mismo con el esfuerzo de corte, apareciendo así recomendable adaptar las condiciones físicas de la estructura de manera que la energía sea lo menos destructiva posible.

Todas las curvas analizadas que proporcionan la respuesta de un oscilador simple en función de su período para los distintos movimientos sísmicos, presentan una característica común.

El esfuerzo de corte es siempre menor a medida que aumenta el período del oscilador. Esto significa que los coeficientes sísmicos del Código debieran ser menores para edificios altos que para edificios bajos.

Estudios, tanto analíticos como experimentales, indican que el esfuerzo de corte producido por un temblor en un edificio alto es comparativamente más grande en la parte más alta del edificio que lo que resulta de aceptar una aceleración constante en toda la estructura.

Se necesitan estudios más completos del efecto del amortiguamiento en las armónicas superiores antes que este factor pueda ser avaluado con toda precisión.

En el gráfico adjunto (diagrama N.º 1,) se indican los coeficientes correspondientes a varios códigos para el cálculo de construcciones asísmicas.

Se han comparado las normas chilenas, japonesas, Los Angeles 1944 (en vigencia), San Francisco 1947, Uniform Building Code, una proposición hecha por Jacobsen y otra por R. Martel.

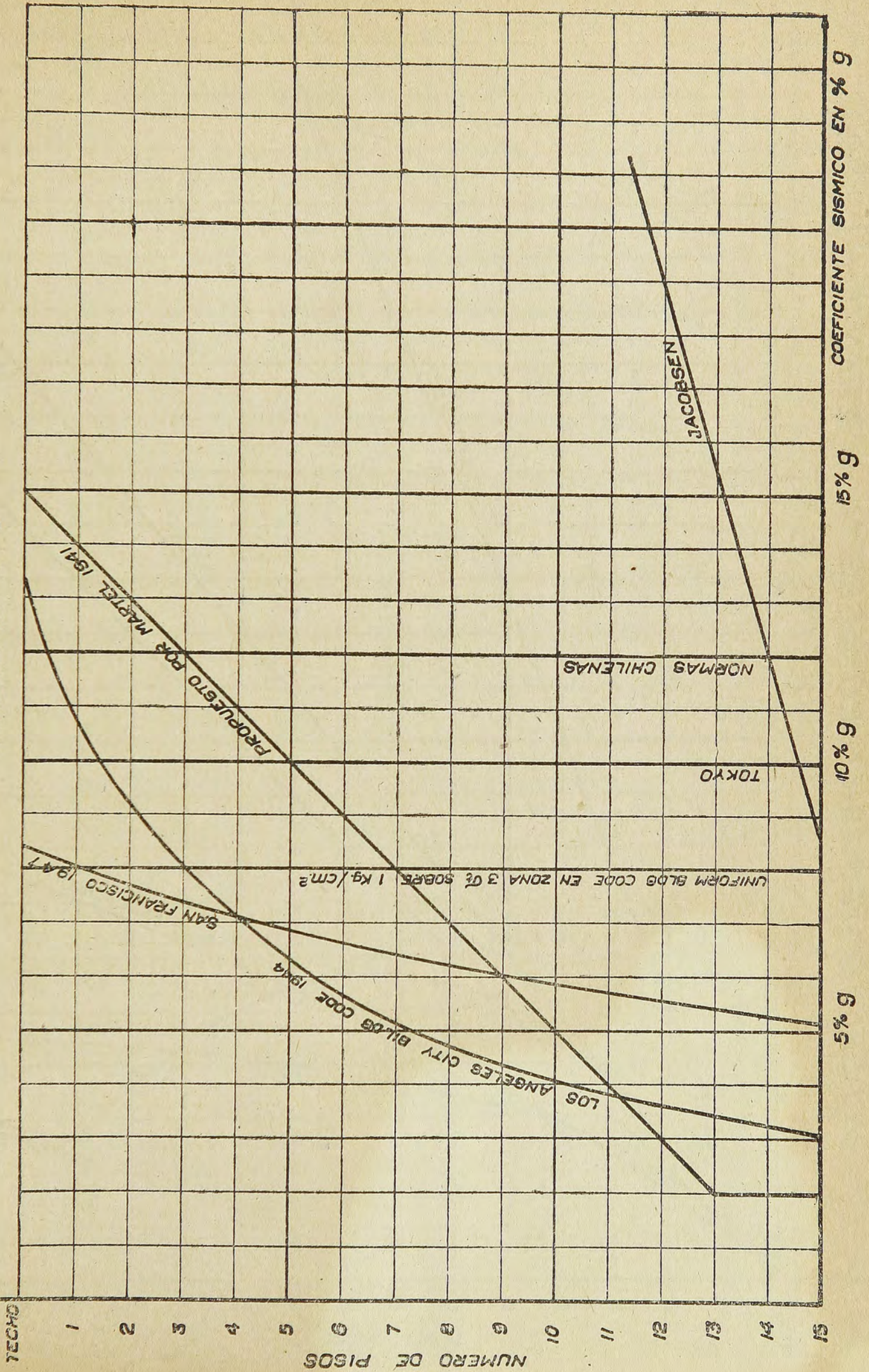
La curva de Jacobsen fué obtenida por aplicación de un temblor sinusoidal sobre un modelo de un edificio idealizado de 16 pisos. La experiencia demuestra que la aceleración se hace más importante en los pisos superiores pero no hace indicación precisa de los porcentajes de la gravedad que hay que considerar en cada caso. Los valores que se obtienen en la experiencia de Jacobsen son visiblemente más altos que los que corresponden a la sollicitación de la estructura real, puesto que el mayor amortiguamiento del prototipo no está representado a escala en el modelo.

Por la comparación de estas curvas se observa que las exigencias de las normas chilenas son bastante más grandes que las de las otras normas, sobre todo para edificios de más de 6 pisos.



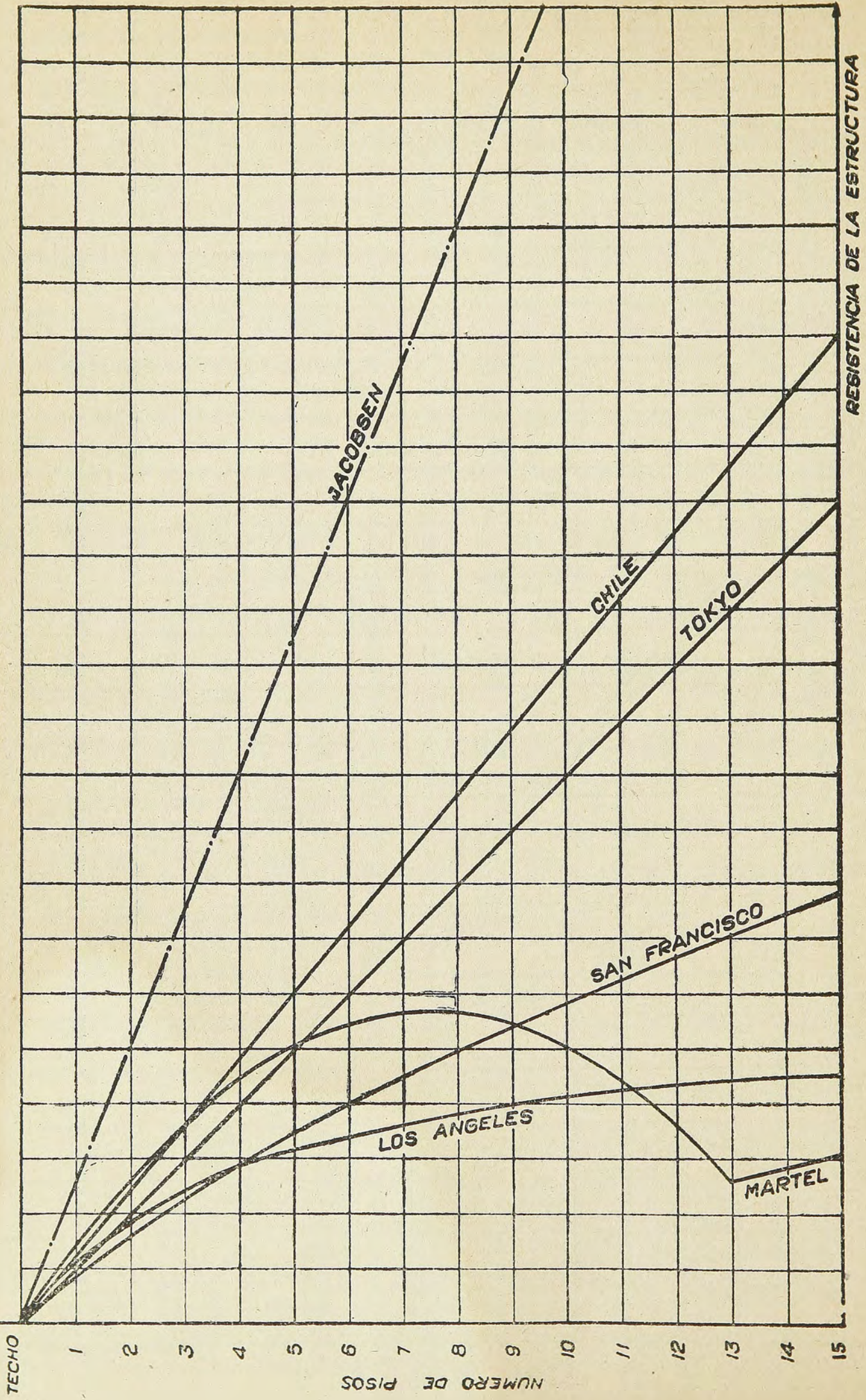
# COEFICIENTES SISMICOS SEGUN DIFERENTES CODIGOS

DIAGRAMA Nº 1



# COEFICIENTES SISMICOS SEGUN DIFERENTES CODIGOS

DIAGRAMA Nº 2



RESISTENCIA DE LA ESTRUCTURA

Los coeficientes que indican las normas de San Francisco 1947 parecen bastante aptas para nuestras condiciones locales puesto que no hay evidencia que nuestros temblores sean más destructivos que los que se observan en California. Estos coeficientes toman en cuenta la influencia del alto (período) en la aceleración estática equivalente y la variación de aceleración con la altura del edificio.

Se obtienen factores sísmicos que son más grandes para edificios bajos que para estructuras altas y que van disminuyendo desde la base hasta la punta del edificio.

El diagrama 2 se ha obtenido suponiendo edificios de igual masa en cada piso totalizando para una escala horizontal arbitraria el esfuerzo de corte correspondiente, a la altura de cada piso.

El diagrama muestra por ejemplo que en un edificio de 15 pisos las normas chilenas exigen para el primer piso una resistencia de 18 unidades (medidas en una escala arbitraria). Las cifras correspondientes para las normas japonesas, normas de San Francisco y Normas de Los Angeles son respectivamente 10, 7,8, 4,5.

Otro punto de gran interés en la fijación de los coeficientes sísmicos está en el estudio de las características del terreno. Desgraciadamente, en el instante actual, no parece haber evidencia de la verdadera influencia de la calidad del terreno en la vibración de las estructuras.

R. F. A.