

Figura Apéndice I.2.4.1 Espectro de aceleraciones relativas obtenido a partir de sensores artificiales

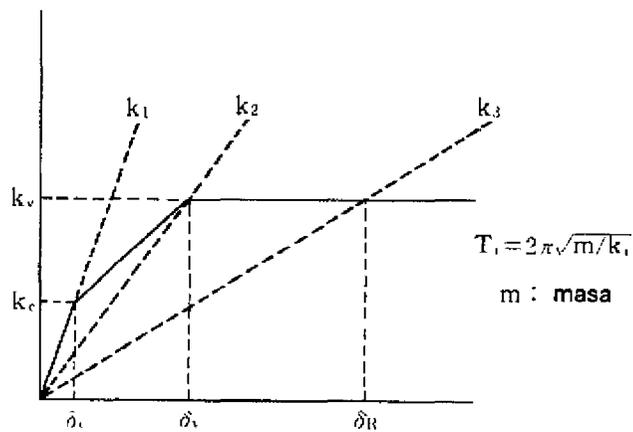


Figura Apéndice I.2.4.2 Curva envolvente de fuerzas restauradoras

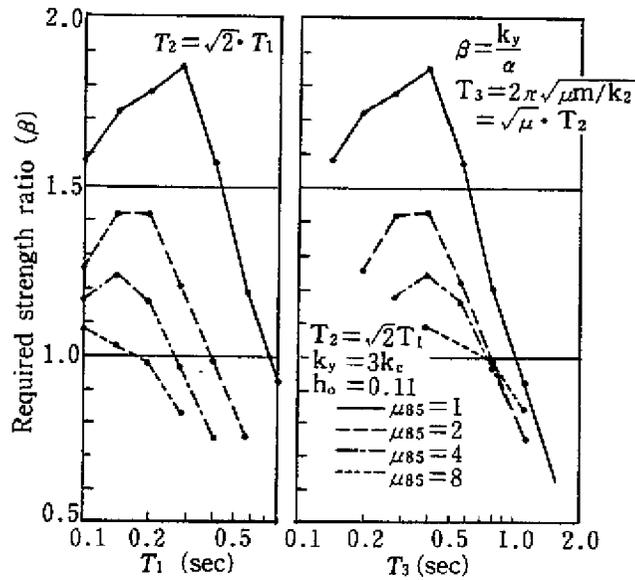


Figura Apéndice I.2.4.3 Espectro de la razón de resistencias requeridas del modelo D-TRI

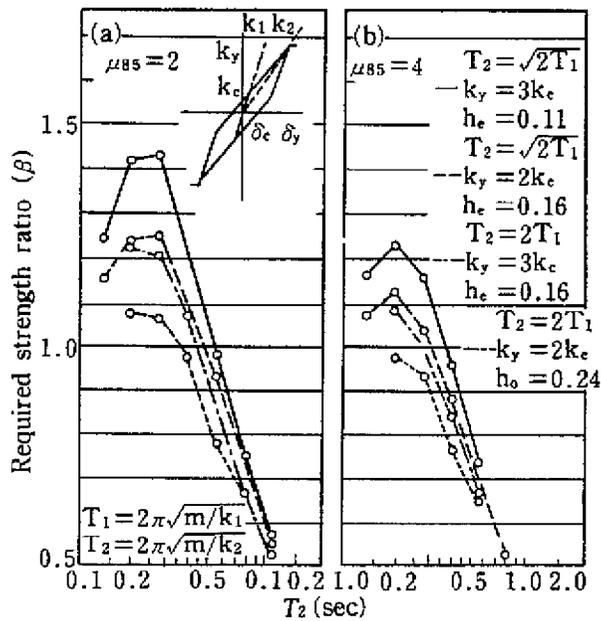


Figura Apéndice I.2.4.4 Espectro de la razón de resistencias requeridas del modelo D-TRI

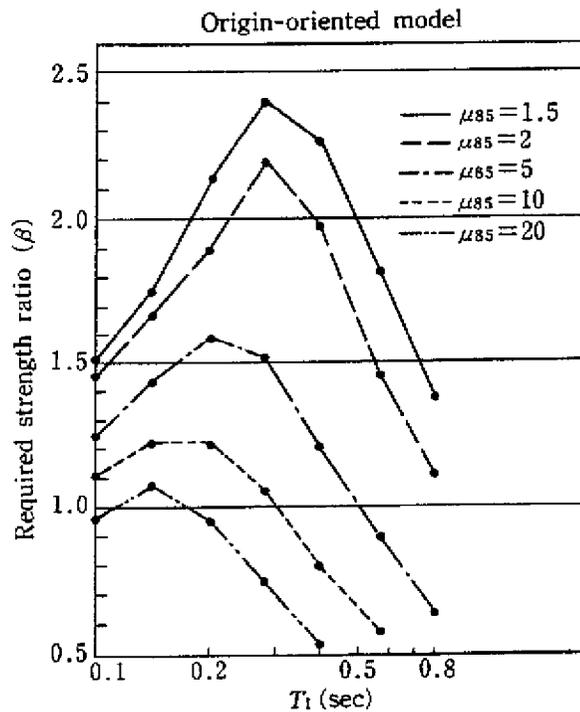


Figura Apéndice I.2.4.5 Espectro de la razón de resistencias requeridas del modelo orientado al origen

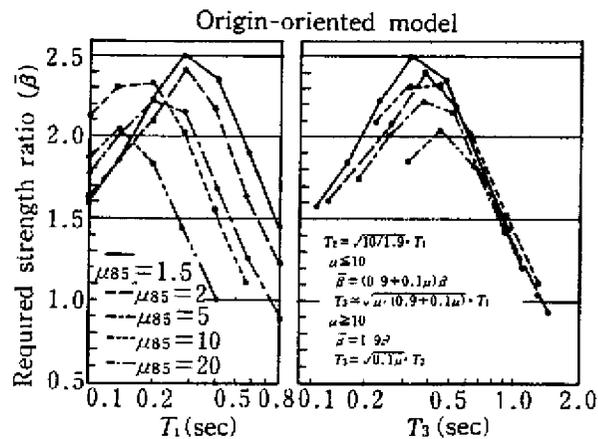


Figura Apéndice I.2.4.6 Espectro de la razón de resistencias requeridas límite del modelo orientado al origen $\bar{\beta}$

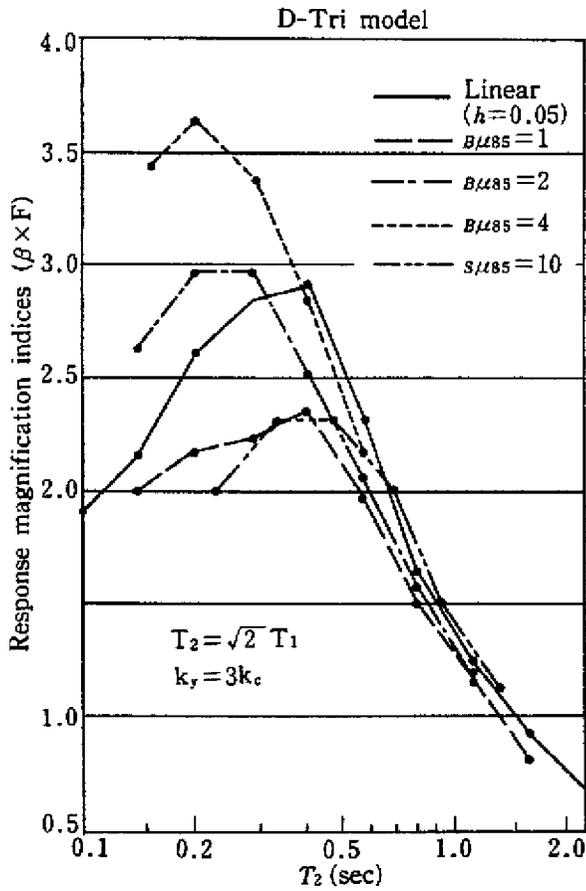


Figura Apéndice I.2.4.7 Espectro de índices de amplificación

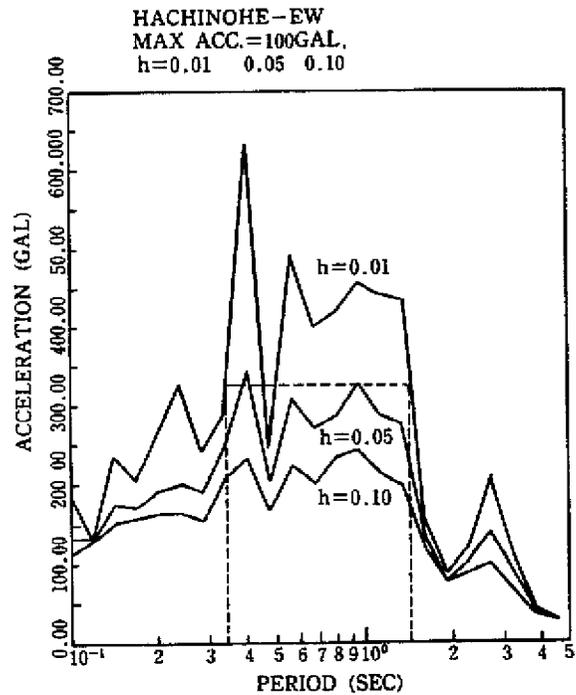


Figura Apéndice I.2.4.8 Espectro de aceleraciones de la excitación "Hachinohe-EO"

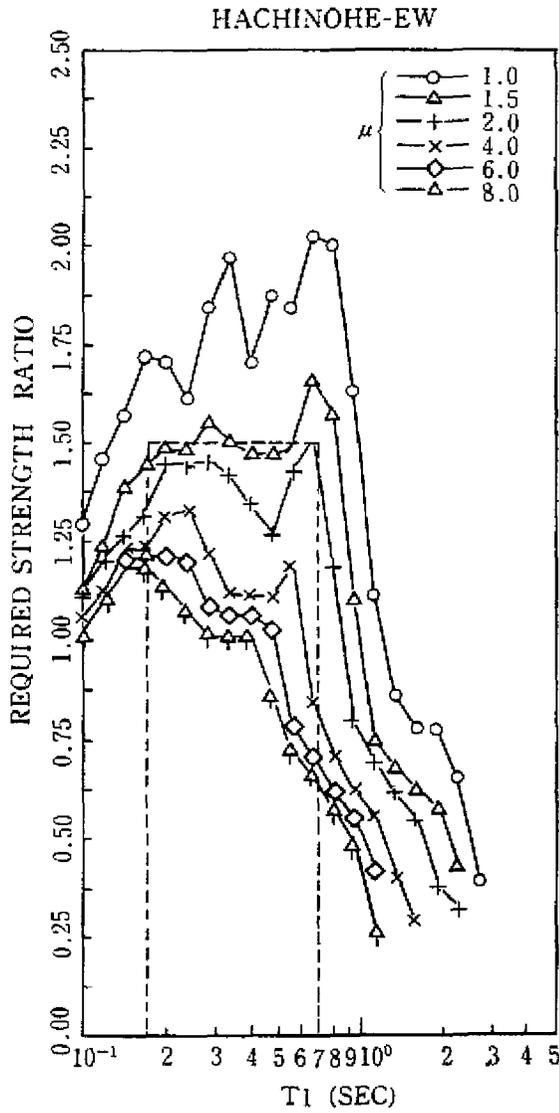


Figura Apéndice I.2.4.8(b) Espectro de la razón de resistencias requeridas de la excitación "Hachinoe-EO" (D-T₁)

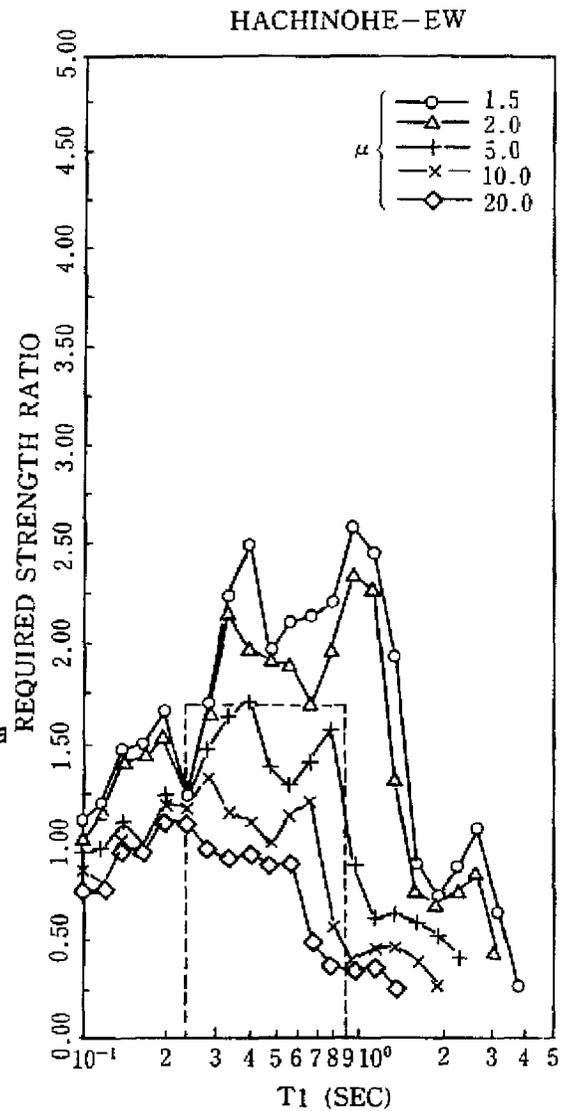


Figura Apéndice I.2.4.8(c) Espectro de la razón de resistencias requeridas de la excitación "Hachinoe-EO" (modelo orientado al origen)

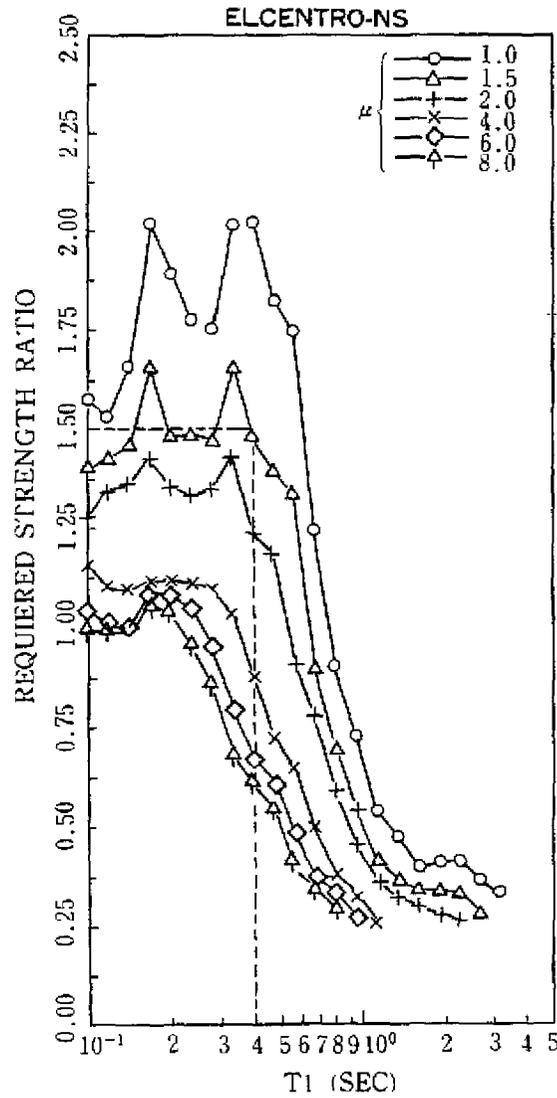


Figura Apéndice 1.2.4.9 Espectro de la razón de resistencias requeridas de la excitación "El Centro-NS" (D-T1)

5. LICUACIÓN DE SUELOS ARENOSOS

En este código, se supone que el suelo es siempre estable para sostener la superestructura aún cuando se presenta el fenómeno de licuación durante un sismo, y se enfoca solamente la capacidad de la superestructura para la evaluación ante sismo. Sin embargo, como los daños presentados en los sismos anteriores indican, existen casos de falla total o inclinación de edificios y daño en pilotes por la pérdida de resistencia del suelo o por deformación grande debida a la licuación del suelo arenoso saturado de agua. Porque este tipo de daño es gradual, es poco probable que cause pérdida de vidas aunque se presente falla total o inclinación de edificios.

Sin embargo, se pierden la función y el valor económico del edificio. La influencia de estas pérdidas sobre la sociedad es especialmente grande cuando el edificio sirve para la base de prevención de desastres.

Por esta razón, además de evaluar la superestructura, se necesita estimar la estabilidad del suelo al evaluar ante sismo el comportamiento de un edificio. A continuación se presentan ejemplos de daños y resumen del método de evaluación y medidas ante daño por la "licuación del suelo arenoso", que es un fenómeno importante que influye sobre la estabilidad de edificios durante un sismo. El método de evaluación de la posibilidad de licuación presentado aquí es sólo para evaluar la posibilidad de licuación del suelo en estudio, y no evalúa el nivel de daño que se presentará en los edificios. Este tipo de método de evaluación todavía no se ha desarrollado en su totalidad, por esta razón, este código presenta los artículos sobre la licuación como referencias en los Apéndices.

5.1 Ejemplo de daño por licuación

"Licuación" significa el cambio del estado físico desde suelo estable hasta suelo líquido e inestable debido a la vibración aplicada al suelo arenoso saturado de agua. El fenómeno del movimiento de arena hacia la parte con la presión baja cuando se aplica una presión en el suelo licuado se denomina como "fluctuación". Si se presenta el fenómeno de licuación en un lecho de suelo subterráneo cerrado herméticamente, no se presenta la fluctuación. Pero si se desarrolla un camino de agua, la arena saturada de agua fluye hacia el terreno, presentándose el fenómeno de "explotación de arena". Si se presenta este fenómeno, la parte que perdió una cantidad de la tierra subterránea se hunde.

El sismo que causó muchos casos de daño por la licuación del suelo arenoso es el de Niigata (1964). La licuación del suelo arenoso causó los siguientes daños:

(i) Se hundieron o inclinaron edificios por la pérdida de resistencia ante la carga axial del suelo.

(ii) Se dañaron pilotes por la pérdida de resistencia ante la carga horizontal del suelo.

(iii) Se dañaron carreteras, diques de protección, tuberías subterráneas y edificios por la deformación del suelo debido a la licuación.

(iv) Se elevaron a la superficie las construcciones subterráneas por la flotabilidad causada por la licuación y por la pérdida de fricción entre construcciones y suelo.

En el sismo de Alaska del mismo año, se reportaron casos de corrimiento grande de tierra causados por la licuación.

El sismo de Niigata fue un sismo que causó un daño estructural de gran escala como nunca se había presentado anteriormente. Sin embargo, desde antes se había conocido el fenómeno de explotación de arena por la licuación en los sismos dañinos para edificios. Recientemente en el sismo de la costa de Miyagi en 1978, se observó un rastro de la explotación de arena en el suelo arenoso blando y saturado de agua a lo largo de la costa de Sendai. Y en el sismo del mar de Japón de 1983, se observaron casos de daño en las casas de madera en la zona costera en donde se presentó el fenómeno de licuación.

En la Fotografía Apéndice 1, se presentan departamentos de concreto reforzado de 4 niveles en la ciudad de Kawagishi, Niigata, sobre un suelo arenoso con la cimentación sin pilotes. Uno de ellos se cayó completamente, y otro se inclinó. La dirección de inclinación o caída es la dirección corta de los edificios. El hecho de que no se presentó agrietamiento en los edificios a pesar del estado de daño, provocó la crítica al diseño de estructuras de concreto reforzado por ser demasiado resistentes. Después del sismo, el edificio, que se cayó, se demolió, y sus piezas se usaron para construir un arrecife artificial para la pesca. Otros edificios, que se inclinaron, se levantaron y están en uso normal.

El edificio de la Fotografía Apéndice 2 era para oficinas, de concreto reforzado de 4 niveles. Aunque se inclinó con gran ángulo, no se presentó ningún daño en la estructura. Después del sismo, se levantó y se trasladó sobre los pilotes nuevamente construidos, y está en uso normal.

En la Fotografía Apéndice 3, se presenta un pilote dañado en el sismo de Niigata excavado después de 15 años. La superestructura era para oficinas, de concreto reforzado de 3 niveles, que se hundió presentando 1.8 m de hundimiento máximo por el daño en los pilotes durante el sismo. Dado que no se presentó daño en la superestructura, se levantó usando gatos hidráulicos, y se reforzó con los pilotes de perfil alrededor de la estructura. Después de 15 años, al remodelar el edificio, se investigaron los pilotes antiguos dañados en el sismo de Niigata. Como se presenta en la Fotografía Apéndice 4 y la Figura Apéndice I.2.5.1, se descubrieron daños graves en los intermedios y extremos de los pilotes por aplastamiento del concreto y pandeo de barras longitudinales. Especialmente la presencia del daño en los extremos de pilotes además de daño en sus zonas medias indica una deformación grande en la superficie de terreno causada por la licuación de los lechos blandos de arena sobre el lecho firme que sostenía los pilotes.

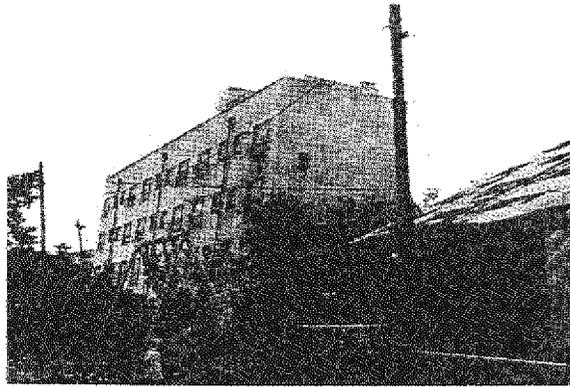
La Fotografía Apéndice 5 presenta un daño por la licuación del suelo en el sismo de la costa de Tokachi (1983). Como se puede observar aquí, los cajones subterráneos ligeros de concreto reforzado pueden flotar por la licuación. Otra parte de cimentación del mismo edificio que se construyó con el método "vibroflotation" que consolida el suelo con vibración para prevenir la licuación no presentó daño.

En la Fotografía Apéndice 6, se presenta un caso de daño en pilote prefabricado en el sismo del mar de Japón (1983). La arena alrededor del extremo superior del pilote fluyó, y se descubrió el pilote. Aunque presenta un agrietamiento notable por flexión y cortante, con esta cantidad de grietas no se causa hundimiento grande. Si no hubieran construido los pilotes, podría causar la caída total del edificio como se observó en el sismo de Niigata. Esto es un ejemplo de uso de pilotes para la prevención de daño por la licuación.

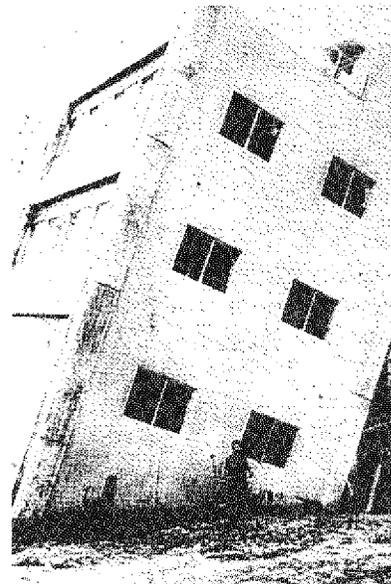
El daño por sismo en las estructuras de cimentación tiene característica como sigue:

- (i) Es difícil encontrar, ya que está enterrado.
- (ii) Es poco probable causar la falla total del edificio.
- (iii) La deformación por el daño aumenta gradualmente después de sismo.

Por estas características, a diferencia del daño en superestructuras, el daño en subestructuras a veces no se advierte. En algunos casos se descubre después de algún tiempo.



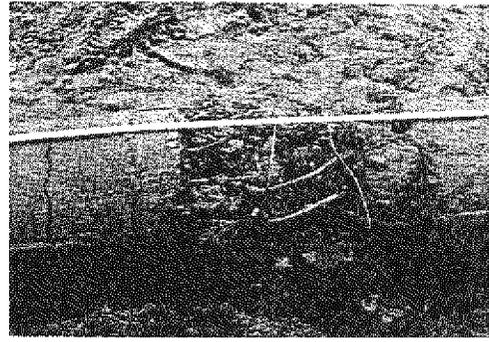
**Fotografía Apéndice 1 Departamento
volteado e inclinado
(sismo de Niigata, 1964)**



**Fotografía Apéndice 2 Edificio de oficinas
inclinado (sismo
de Niigata, 1964)**



Fotografía Apéndice 3 *Excavación de un pilote de concreto reforzado dañado por licuación*



Fotografía Apéndice 4 *Estado de daño en el pilote de concreto reforzado excavado*



Fotografía Apéndice 5 *Tanque de productos farmacéuticos y daño en tubería por licuación (sismo de la costa de Tokachi, 1968)*



Fotografía Apéndice 6 *Falla de pilote de concreto reforzado por licuación sismo del mar de Japón, 1983)*

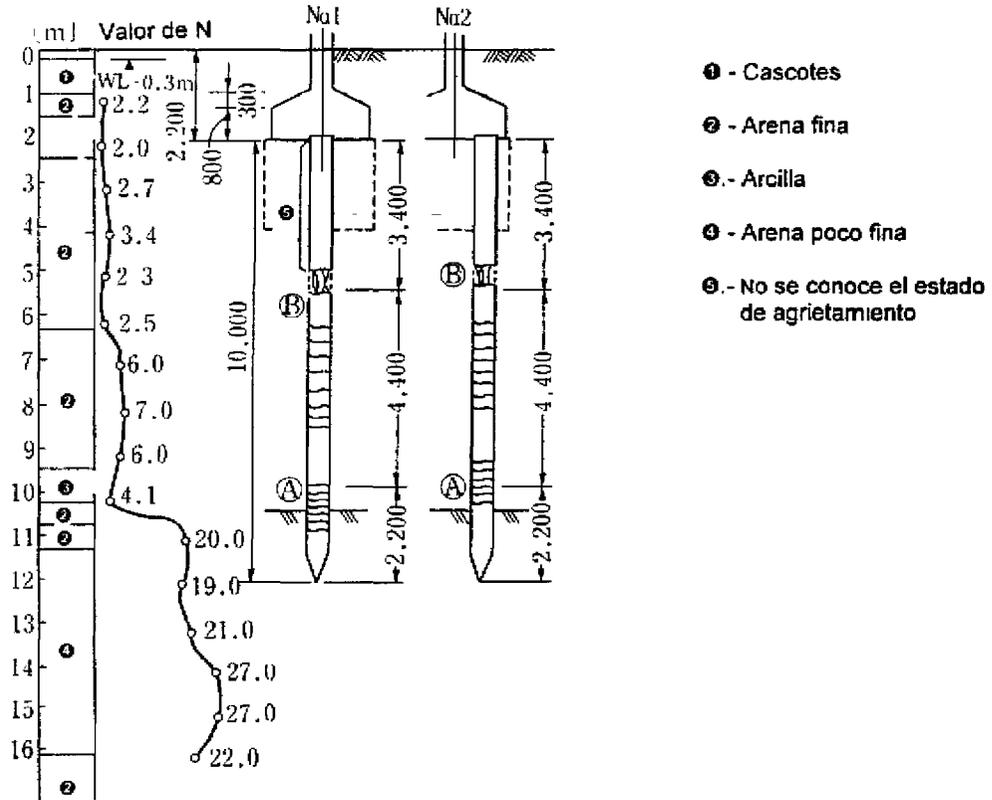


Figura Apéndice I.2.5.1 Estado de daños en el pilote de concreto reforzado excavado

5.2 Procedimiento de evaluación del fenómeno de licuación

El sismo de Niigata (1964) fue el motivo para empezar estudios sobre un método de evaluación de posibilidad de licuación del suelo arenoso saturado de agua, y proporcionó varias propuestas.

El concepto y suposición general de estas propuestas es como sigue:

(i) Se enfoca la arena saturada de agua.

(ii) Se especifica la profundidad desde la superficie del terreno. Generalmente se especifica una profundidad de 20 m desde la superficie del terreno.

(iii) Se especifica la distribución de la dimensión de arena. El suelo homogéneo de arenas medianas es más peligroso. Si mantiene menos de 10 % de arcilla y arenas de diámetro 0.15 a 1.0 mm con el coeficiente de homogeneidad menos que 5, la posibilidad de licuación es especialmente alta.

(iv) Se define el límite del número de golpes dependiendo de la profundidad desde la superficie de terreno o del valor de aceleración. Si este número es más grande que el número de golpes actual, existe la posibilidad de licuación. En otro método, se define la relación de resistencia ante licuación de una profundidad desde la superficie de terreno dependiendo del número de golpes o de diámetro de arena, se calcula el nivel de seguridad ante licuación (porcentaje de resistencia), F_L , a partir de la relación de fuerza cortante durante un sismo calculada con la aceleración en la superficie de terreno, y si F_L es menor que 1, se concluye que existe la posibilidad de licuación.

A continuación se presenta un resumen de las características de los métodos típicos de evaluación.

Guía de Diseño de Estructuras de Cimentación de Edificios (Instituto de Arquitectos del Japón, 1988)

Se considera el procedimiento propuesto por los profesores Tokimatsu y Yoshimi³⁾ con un intervalo de aplicación para planicies con superficie mayor a 20m, porcentaje de suelo limoso menor o igual a 20% (dimensiones de grano menor o igual a 5 μ m), porcentaje de suelo arcilloso menor o igual a 35% (dimensiones de grano menor o igual a 74 μ m).

El nivel de seguridad ante licuación se puede determinar con el procedimiento que se presenta enseguida; si el valor del factor F_L es menor o igual a la unidad, existe una probabilidad alta de licuación.

$$F_L = (\tau_u / \sigma'_z) / (\tau_u / \sigma'_z)$$

$$\frac{\tau_u}{\sigma'_z} = r_n \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} (1 - 0.015z)$$

$$r_n = 0.1(M-1)$$

(Apéndice 1.2.E.1)

$$N_a = N_l + \Delta N_f$$

$$N_l = C_N \cdot N$$

$$C_N = \sqrt{10 / \sigma_z'}$$

El valor del producto τ / σ_z' , se determina de la Figura Apéndice I.2.5.2. ΔN_f , se determinará de la Figura Apéndice I.2.5.3. El valor de N se determinará con base en pruebas de cono, restándole un promedio de 1 ó 2.

- donde
- τ : Resistencia a la licuación en la superficie de aplicación de carga (t/m^2)
 - τ : Resistencia a la degradación en la superficie de aplicación de carga (t/m^2)
 - σ_z' : Resistencia a profundidad en la superficie de aplicación de carga (t/m^2)
 - σ_z : Resistencia a la licuación en la superficie de aplicación de carga (t/m^2)
 - α_{max} : Aceleración de diseño en la superficie del terreno (cm/s^2)
 - g : Aceleración de la gravedad ($= 980 \text{ cm/s}^2$)
 - z : Profundidad para la que se analiza el problema de licuación (m)
 - M : Magnitud del sismo (Richter)
 - N : Valor experimental de N según pruebas de vibración local

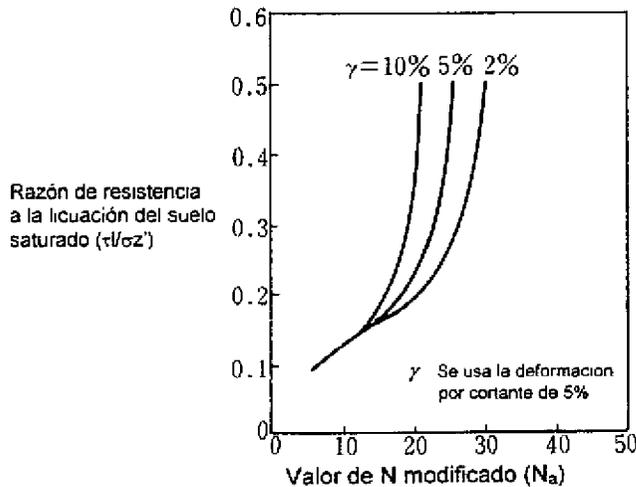


Figura Apéndice I.2.5.2 Valor de N modificado (N_a) y razón de resistencia a la licuación (τ/σ_z')

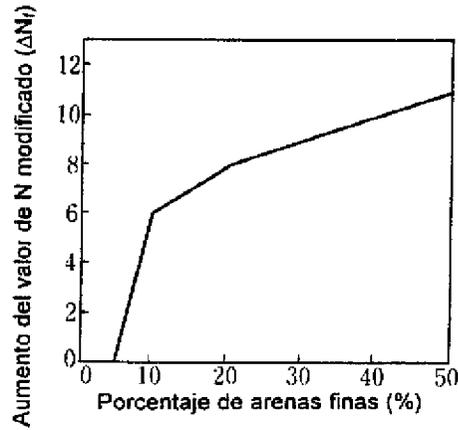


Figura Apéndice I.2.5.3 Porcentaje de arena fina y aumento del valor de N modificado ΔN_f

Guía de Diseño por Sismo de la Asociación de Transporte Ferroviario (Instituto de Ferrocarriles del Japón, 1980)

Esta especificación se basa en el método de Iwasaki, Tatsuoka, et al ⁴⁾. Se enfoca la arena saturada de agua desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 20 m en el aluvión en donde el nivel de agua subterránea se encuentra dentro de 10 m desde la superficie de terreno. Si 50 % de arenas tiene diámetro de 0.2 a 2.0 mm, existe la posibilidad de licuación, y se evalúa usando el valor de F_L . Si resulta positiva, se reduce la constante de propiedad de terreno para el diseño ante sismo.

Los valores de F_L se determinarán como se indica, si F_L es menor o igual a la unidad, existe posibilidad de presencia de licuación.

$$F_L = \frac{R}{L}$$

$$L = (1 - 0.015x) k_s \frac{\sigma_v}{\sigma_v'}$$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} + 0.19 \quad (0.02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.05 \text{ mm})$$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \left[\frac{0.35}{D_{50}} \right] \quad (0.05 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.6 \text{ mm})$$

Apéndice I.2.5.2

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} - 0.05 \quad (0.6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 2.0 \text{ mm})$$

$$k_s \text{ (intensidad del sismo en la superficie del terreno)} = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \times 0.15$$

$$\left. \begin{array}{l} v_1 \text{ (factor de corrección por sonación)} = 0.7, 0.85, 1.0 \\ v_2 \text{ (factor de corrección por tipo de suelo)} = 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 \\ v_3 \text{ (factor de corrección por importancia)} = 0.8, 1.0 \end{array} \right\} \text{ existen otras formas de definición}$$

donde, x:

profundidad (m),

N: Valor experimental de N,

σ' : Esfuerzo de compresión por peso del suelo (kg/cm^2),

σ'_v : Esfuerzo de compresión efectivo (kg/cm^2)

5.3 Medidas contra la licuación de suelos

Existe dos métodos de prevención de licuación del suelo arenoso.

(i) Se mejora el suelo para que no presente el fenómeno de licuación.

(ii) Se emplean los pilotes que se han diseñado considerando el caso de licuación, para que no se incline o caiga el edificio en caso de que se presente el fenómeno de licuación.

Para elegir uno de ellos, se consideran la confiabilidad del método, costo y duración de la construcción.

El principio de mejora del suelo ante licuación se puede clasificar en dos categorías que se presentan en la Tabla Apéndice I.2.5.1. Basándose en este principio, varios métodos se han desarrollado y están en uso actualmente. ²⁾

Tabla Apéndice I.2.5.1 Método de mejoramiento del suelo ante licuación ²⁾

Clasificación	Principio
Método de cambio de las características del suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar la densidad (hacer el suelo firme). - Cambiar a suelo no licuable o densificar y mejorar el suelo inyectando o mezclando con aditivos. - Reducir el grado de saturación.
Método de cambio de los esfuerzos o condiciones de deformación	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar el esfuerzo efectivo bajando el nivel de aguas freáticas o cargando con más tierra. - Disipar la presión excesiva de agua. - Interrumpir la transferencia de la presión excesiva de agua desde los suelos alrededores. - Confinar el suelo para reducir la deformación repetida por cortante durante sismo.

(1) Método para aumentar la densidad (método de consolidación)

Este método está en uso general después de que había confirmado su efecto en el sismo de Niigata. En caso de consolidar el suelo a una profundidad de 10 a 20 m desde la superficie del terreno, los métodos como compactación de arena, vibroflotación, compactación con rodillos o compactación dinámica son adecuados. En caso de consolidar sólo la superficie del terreno, el método vibración amortiguada es adecuado. El método de consolidación, además de aumentar la densidad del suelo, aumenta la presión estática del suelo, mejorando la resistencia ante licuación. Sin embargo, se necesita considerar la contaminación por la vibración al consolidar el suelo. Especialmente, el método compactación dinámica, que requiere menos costo, provoca alta vibración, por lo que es adecuado para usarse en lugar abierto como la tierra ganada al mar.

(2) Método para mejorar la propiedad de arena

Se excava el lecho de alta posibilidad de licuación para sustituir con otro material, o se inyecta o mezcla con cemento para evitar la licuación. En caso de sustituir con otro material, existe restricción de la profundidad del lecho. En caso de inyección o mezcla, existe restricción del costo de construcción.

(3) Método para reducir el nivel de saturación (método de profundización del nivel de agua)

Existen métodos como "well point" o "deep well" para profundizar el nivel del agua, y un método para bajar el nivel de agua dentro de la tierra amontonada instalando un tubo de drenaje. Con la bajada del nivel de agua, el espesor del lecho superior con menos posibilidad de licuación aumenta. En los lechos bajo el nivel de agua disminuye la posibilidad de licuación por el aumento de la presión vertical efectiva. Sin embargo, estos métodos pueden provocar el hundimiento del suelo en caso de que exista un lecho inferior blando de arcilla, o bajar el nivel del agua en la zona vecina. Últimamente, se usa el método de profundización del nivel del agua en la zona entera de construcción.

(4) Método para disipar la presión de agua (método de drenado)

Existen métodos como "gravel drain" que usa piedras quebradas y "pipe drain" que usa tubos. También existe un método que construye un tubo vertical de drenaje como el método "vertical drain", y método que construye muros de piedras quebradas alrededor de la subestructura. El anterior, que usa perforador que no provoca mucho vibración, es adecuado para el caso de construcción en un lugar cerrado o para las estructuras existentes. Aunque el posterior necesita la construcción de muros de piedras quebradas antes de construir la estructura, requiere menor costo y menor consideración accesorias, siendo adecuado para la construcción de estructuras subterráneas. Con estos métodos se puede disipar la presión de agua, reducir el tiempo en que la presión de agua está aumentada o limitar la cantidad de su aumento.

(5) Método para controlar la deformación por cortante (método de confinar la deformación)

Se reduce la carga cíclica horizontal causada por sismo, instalando muros de pilotes impermeables o muros continuos alrededor de la estructura, para prevenir la licuación o para evitar el hundimiento de la estructura.

Referencias

1. Umemura H., et al.; Fundamentos de diseño sísmico. Editorial Ohmu.
2. Yasuda S.; Medidas para controlar licuación de suelo. Editorial Kajima.
3. Tokimatsu K., et al.; Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content". Revista de la Asociación Japonesa de Mecánica de Suelos, Vol. 23, No. 4, 1983.
4. Iwasaki T., et al.; Procedimiento simplificado para evaluar la licuación de suelos arenosos y ejemplo de aplicación. Quinto Simposio Japonés sobre Ingeniería Sísmica, 1978.

6. INDICE DE EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO ANTE SISMO CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA EN SUELOS ESTRATIFICADOS Y LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURAL

La evaluación de posible daño en edificios durante un sismo se realiza comparando la resistencia y capacidad de deformación del edificio con la respuesta sísmica correspondiente al sismo en estudio.

Esta sección trata de un método de evaluación del índice I_{so} , para la evaluación ante sismo usando el espectro de respuesta de aceleración en la superficie del terreno. Este método expresa la característica dinámica de la superficie del suelo en forma de espectros de respuesta de aceleración correspondientes a los tipos de suelo, suponiendo un sismo y considerando la característica de amplificación de la superficie de suelo. Además, considera el alargamiento del período de vibración, aumento del amortiguamiento y cambio de las formas modales debidos a la interacción suelo - estructura. El índice de evaluación ante sismo, I_{so} , que se obtiene en este método, es para el caso de que se presenten daños similares en los entresijos, conservándose los formas modales del modelo elástico, y que no corresponde al índice de resistencia I_s , del código de evaluación ante sismo. Es decir, al calcular el índice de resistencia I_s , no se puede usar la ecuación (6) del artículo 1, sección 2, capítulo 3 del código de evaluación, y en caso de que sólo algunos entresijos se dañen, se necesita reducir el índice de resistencia I_s , del código de evaluación, por ejemplo, dividiéndolo con el coeficiente de la ecuación (6), $\frac{2}{3} \times \frac{2n+1}{n+1}$.

6.1 Procedimiento de evaluación del comportamiento ante sismo

El procedimiento de evaluación del comportamiento ante sismo es como se indica en la Figura Apéndice I.2.6.1. Los conceptos de mayor importancia que se consideran en dicho procedimiento se indican enseguida.

- (1) Definición del sismo en la superficie del terreno
- (2) Determinación de la respuesta del sistema estructural (índice I_{so} de evaluación)
- (3) Determinación de la resistencia y capacidad de deformación del edificio (índice I_s de comportamiento estructural ante sismo)

A continuación se presenta una explicación detallada sobre los conceptos (1) y (2).

6.2 Definición del sismo en la superficie del terreno

La característica dinámica de la superficie se expresa en la forma de los espectros de respuesta de aceleración correspondientes a los tipos de suelo suponiendo el amortiguamiento igual a 5 %.

Al determinar la curva envolvente del espectro de respuesta de aceleración, se consideran la característica de onda incidente correspondiente al sismo supuesto y la

característica de ampliación de la superficie. También, se considera la influencia de deformación sobre la característica física del suelo.

A continuación, se describe la determinación del espectro de respuesta de aceleración (Figura Apéndice I.2.6.2) en la superficie del suelo para la evaluación de la resistencia ante sismo, correspondiente a la característica dinámica de la superficie, suponiendo un caso de cierta ciudad de la región Kantou y un cierto sismo.

(1) Descripción del suelo

La zona se divide en cuadros de 500 m por 500 m. El suelo superficial de cada cuadro se clasifica en A_p (humus aluvial), A_c (arcilla aluvial), A_s (arena aluvial), A_g (grava aluvial), L_m (marga) y D_s (arena diluvial). Además se clasifica en las categorías más detalladas, considerando el espesor y la composición de los lechos.

Al prever la aceleración del suelo, se usan modelos del suelo que representan todos los lechos del suelo desde la superficie hasta la base de incidencia para cada cuadro.

(2) Método de cálculo de la aceleración superficial

En la Figura Apéndice I.2.F.3, se presenta el procedimiento del cálculo del espectro de respuesta de aceleración en la superficie. Se supone un sismo de escala del gran sismo de Kanto ($M = 7.9$), y para la onda incidente en la base (en donde la velocidad de la onda S es aproximadamente igual a 3.0 km/s) se usa el espectro de respuesta determinado por la ecuación propuesta por Kobayashi, et al ⁷⁾ transformada de Fourier en el dominio de tiempo. La aceleración máxima de la onda incidente fue aproximadamente igual a 125 Gal. La función de transformación de la superficie se determinó suponiendo el ángulo incidente igual a 45 grados, y para el valor de Q , que presenta el nivel de amortiguamiento, se usó la ecuación: $Q = V_s/15$.

Se calculó la aceleración de la superficie usando el método lineal y el método lineal equivalente. Al usar el método posterior, se empleó el promedio de los resultados experimentales en laboratorio para el nivel de influencia de deformación sobre la rigidez y el amortiguamiento del suelo. ⁹⁾

(3) Clasificación de los espectros de respuesta de aceleración de la superficie

Se calcularon los espectros de respuesta de aceleración de la superficie, suponiendo la homogeneidad de cada cuadro de suelo, y se clasificaron. A continuación se describe la línea principal del procedimiento.

(i) Se expresa la característica dinámica de la superficie en la forma del espectro de respuesta de aceleración con amortiguamiento de 5 %.

(ii) Se obtienen las curvas envolventes de los espectros de respuesta de aceleración para cada tipo de suelo clasificado.

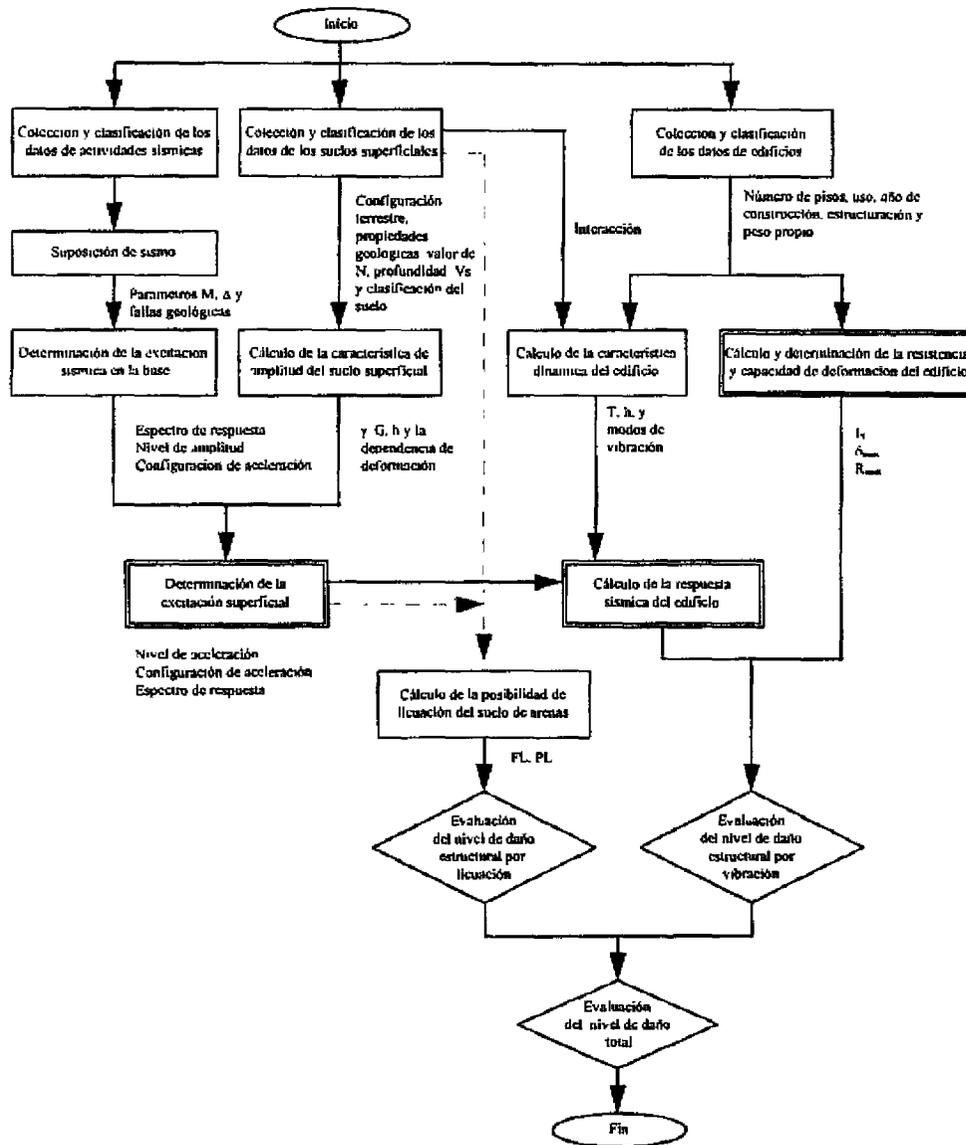


Figura Apéndice I.2.6.1 Procedimiento de evaluación de la resistencia a sismo

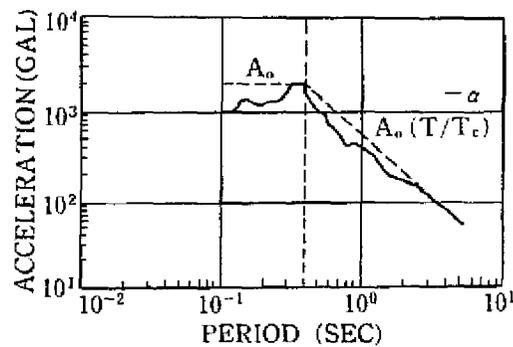


Figura Apéndice I.2.6.2 Envoltura del espectro de respuesta de aceleración

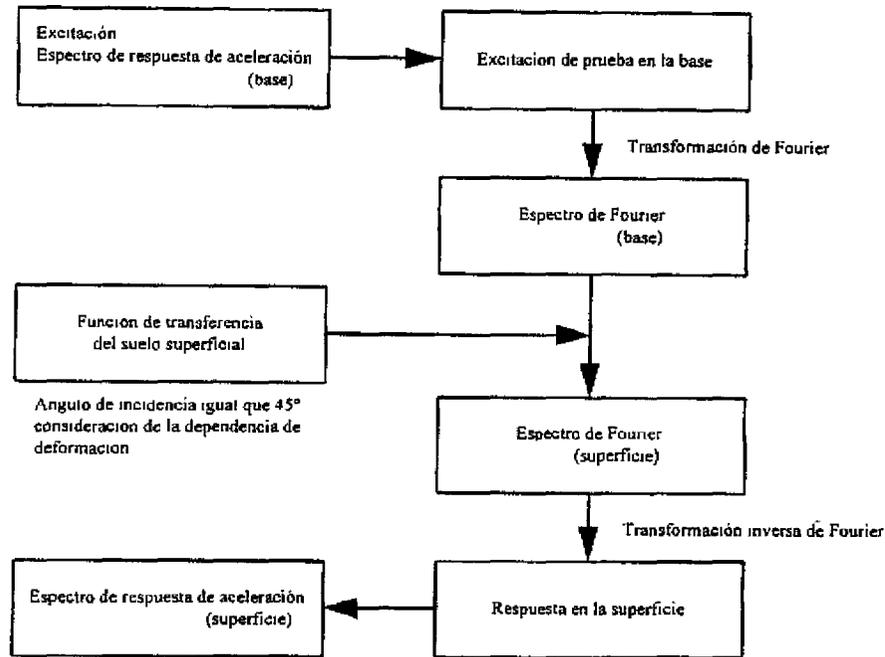


Figura Apéndice I.2.6.3 Procedimiento de cálculo del espectro de respuesta de aceleración en la superficie

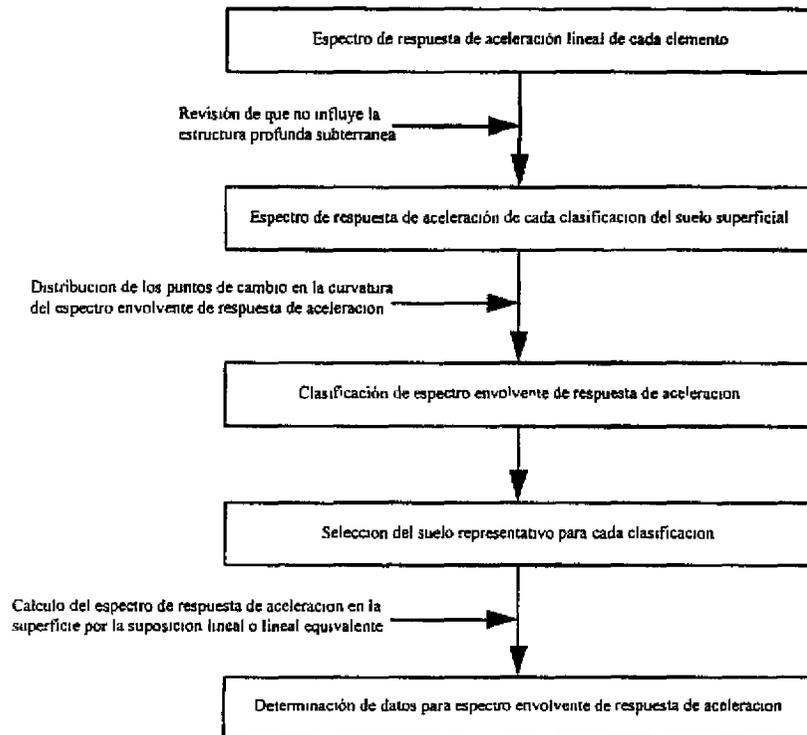
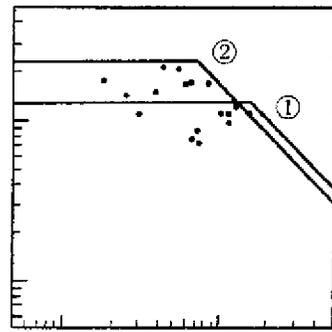
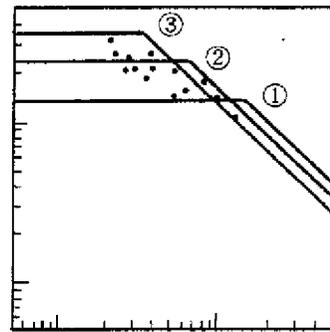


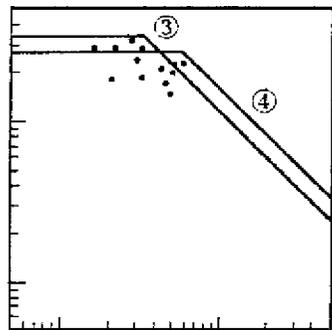
Figura Apéndice I.2.6.4 Diagrama de flujo del procedimiento para la determinación de datos de la envoltura del espectro de respuesta de aceleración



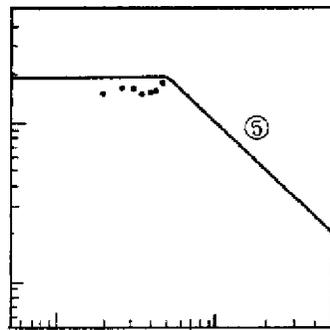
As



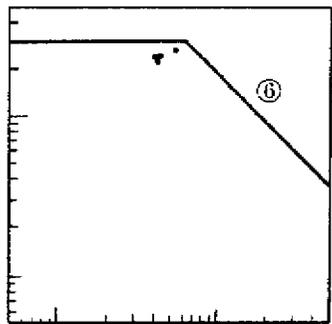
Ac



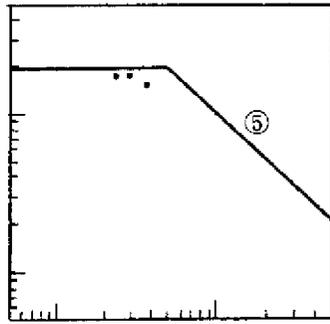
LM



AG



AP



Ds

Figura Apéndice I.2.6.5 Distribución de los puntos de quiebre del espectro envolvente y su clasificación (los números significan los números de grupo de clasificación)

(iii) Se clasifican los tipos de suelo dependiendo del espectro de respuesta de aceleración de la superficie calculado con el método lineal.

(iv) Al clasificar, se considera el tipo del suelo superficial.

(v) Al determinar la curva envolvente del espectro de respuesta, se considera la influencia de deformación sobre la característica física del suelo.

En la Figura Apéndice I.2.6.4, se presenta el procedimiento para obtener la curva envolvente del espectro de respuesta de aceleración de acuerdo con estas líneas principales, clasificando los tipos de suelo.

El procedimiento es como sigue:

(1) Se revisan los espectros de respuesta de aceleración de cada cuadro de suelo para confirmar que el efecto de la característica del suelo superior es más grande que el efecto de la estructura profunda del suelo.

(2) Se determina la curva del espectro lineal de respuesta de aceleración que corresponde al tipo del suelo superficial como se presenta en la Figura Apéndice I.2.6.2. Hasta el período T_c , el espectro de aceleración es constante, A_0 , y después en el rango de los períodos más largos, es una curva descendente proporcional al cuadrado de período.

(3) Se clasifica en 6 grupos la forma del espectro envolvente (Figura Apéndice I.2.6.5).

(4) Se selecciona un suelo representativo para cada tipo de sitio, se calcula la respuesta en la superficie con el método lineal y el método lineal equivalente, y de acuerdo con el resultado, se determina el espectro envolvente de respuesta de aceleración para cada tipo de suelo.

En la Figura Apéndice I.2.6.6 y en la Tabla Apéndice I.2.6.1, se presentan los parámetros y las formas de los espectros envolventes de respuesta de aceleración para cada tipo de suelo, que se han determinado de acuerdo con el procedimiento anterior. El nivel de amplificación de aceleración está entre 0.7G y 1.6G, y el período de cambio de curvatura está entre 0.4 seg y 1.5 seg.

Se observa que la clasificación de los espectros envolventes de respuesta de aceleración no coincide con la clasificación de los suelos superficiales, lo que significa que la característica dinámica no se determina sólo con el tipo del suelo superficial.

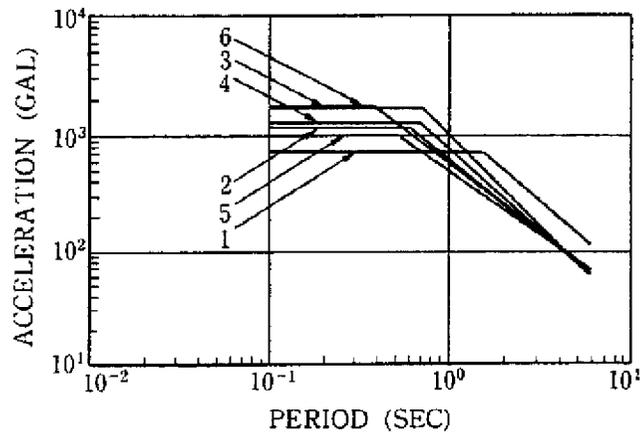


Figura Apéndice I.2.6.6 Seis tipos de espectro envolvente de respuesta de aceleración

Tabla Apéndice I.2.6.6 Tipos de espectro envolvente de respuesta de aceleración

Clasificación del Suelo	Punto de Cambio en la Curvatura		α
	Amplitud	Período	
Tipo-1	0.7G	1.5sec	1.3
Tipo-2	1.1G	0.6sec	1.3
Tipo-3	1.5G	0.4sec	1.2
Tipo-4	1.2G	0.7sec	1.4
Tipo-5	1.0G	0.5sec	1.1
Tipo-6	1.6G	0.7sec	1.5

donde α : constante determinada por $A \propto T^{-\alpha}$, en donde A es la amplitud de aceleración y T es el período

6.3 Determinación de la respuesta del sistema estructural (índice I_{so} de evaluación)

(1) Método de cálculo del índice de evaluación I_{so}

El valor del índice I_{so} se calcula con el procedimiento que se indica a continuación y se representa en el diagrama de flujo de la Figura Apéndice I.2.6.7.

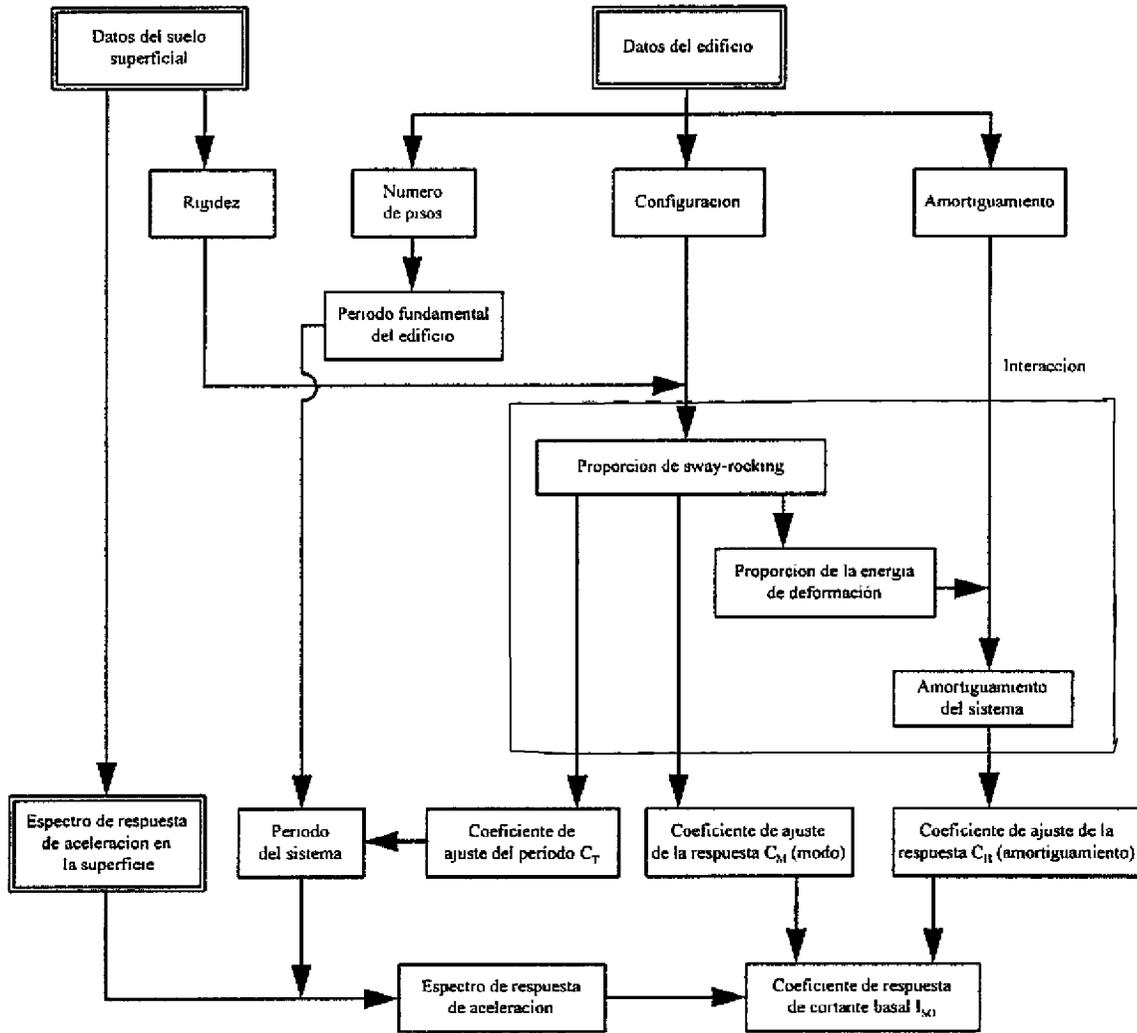


Figura Apéndice I.2.6.7 Diagrama de Flujo del Cálculo de Respuesta del Edificio

(i) Se determina el espectro envolvente de respuesta de aceleración correspondiente al tipo del suelo de la zona de construcción.

(ii) Se obtienen los coeficientes de ajuste de período (C_T) y de ajuste de respuesta (C_M , C_H) que corresponden al tipo del suelo, clase de estructura, dimensión plana y número de niveles.

(iii) Se calcula el período T del modelo de interacción suelo - estructura con la ecuación: $T = T_B \cdot C_T$, y se obtiene el valor a_0 del espectro envolvente de respuesta de aceleración correspondiente. Se calcula el valor de I_{s0} usando los coeficientes de ajuste (C_M , C_H) con la siguiente ecuación:

$$I_{s0} = (a_0 / g) \times (C_M \times C_H)$$

donde, g : aceleración de la gravedad

Las características de este método son como siguen:

(i) Se calcula la fuerza sísmica aplicada al edificio, considerando el efecto dinámico obtenido a partir del espectro de respuesta de aceleración en la superficie de terreno que toma en cuenta la característica del suelo, y la característica dinámica del edificio.

(ii) Se considera la interacción dinámica del suelo, pilotes y edificio, introduciendo el coeficiente de ajuste del período con respecto al período del edificio empotrado (porcentaje de alargamiento del período) y el coeficiente de ajuste de respuesta (cambio en los modos de vibración y amortiguamiento). Se usan modelos lineales equivalentes para el suelo, pilotes y edificio.

(2) Filosofía de modelado

El modelo que se usa para calcular el coeficiente de ajuste es como se presenta en la Figura Apéndice I.2.F.8, un modelo de 3 grados de libertad, que representa la superestructura condensada en un grado de libertad, y la resistencia del suelo y de los pilotes con los resortes de deslizamiento y rotación o volteo.

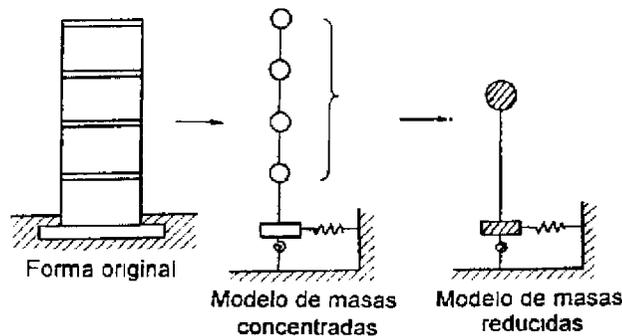


Figura Apéndice I.2.6.8 Modelado del edificio

(3) Factor de corrección del período: (C_T)

El coeficiente de ajuste del período representa el alargamiento del período del modelo que considera la interacción suelo - estructura con respecto al período del modelo empotrado, que se calcula con la Ecuación Apéndice I.2.6.1, usando el porcentaje de desplazamiento lateral y de volteo del edificio. Se supone que el suelo sea totalmente elástico, y los resortes del suelo y de los pilotes se suman mediante el coeficiente de ajuste. ¹⁾

$$C_T = \frac{T}{T_B} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\eta_H + \eta_R)}} \quad (\text{Apéndice I.2.6.1})$$

- T : Período del primer modo
- T_B : Período considerando empotrado el edificio
- η_H : Porcentaje de desplazamiento
- η_R : Porcentaje de rotación o volteo

(4) Factor de corrección de la respuesta (según el modo de vibrar): (C_M)

La ecuación para el coeficiente de ajuste de la respuesta dependiendo del cambio de los modos (Ecuación Apéndice I.2.6.2) representa la relación del coeficiente de cortante basal del modelo con interacción con respecto al coeficiente de cortante basal del modelo empotrado. Esto se obtiene suponiendo la forma rectangular del primer modo del modelo de n grados de libertad.

$$C_M = \beta \cdot \frac{1}{2n} \{ (n+1) + (n-1)\eta_H \} \quad (\text{Apéndice I.2.6.2})$$

β : Factor de participación del primer modo

η_H : Porcentaje de desplazamiento

n : Número de niveles

(5) Factor de corrección de la respuesta (según su amortiguamiento)

La ecuación para el coeficiente de ajuste de la respuesta dependiendo del cambio de amortiguamiento (Ecuación Apéndice I.2.6.3) representa el coeficiente de ajuste con respecto a la respuesta del modelo con amortiguamiento (h) igual a 0.05, que usa el amortiguamiento (h) y el período (T) (seg) del modelo con interacción.

T se calcula con el coeficiente de ajuste del período. h se obtiene de los amortiguamientos del suelo, pilotes y edificio, y del porcentaje de energía de distorsión.

Factor de corrección de la respuesta (según amortiguamiento) C_H

Cuando $h \geq 0.05$

$$C_H = 1 - \left(1 - \frac{2.25}{1.75 + 10h} \right) \cdot t$$

$$t = \begin{cases} 0 & T \leq 0.05 \\ \frac{1}{0.30} (\log T + 1.30) & 0.05 < T \leq 0.1 \\ 1 & 0.1 \leq T \leq 2.5 \end{cases} \quad (\text{Apéndice I.2.6.3})$$

Cuando $h < 0.05$

$$C_H = 1 + \left(\frac{1.5}{1 + 10h} - 1 \right) \cdot t$$

h : coeficiente de amortiguamiento viscoso

T : Período del sistema estructural (seg)

Los amortiguamientos de cada parte estructural se obtienen como sigue:

(i) Amortiguamiento del edificio empotrado

Se toma entre 0.02 y 0.04 para un edificio de concreto reforzado, considerando el resultado de la prueba de vibración y la variación debida a la cantidad de muros.

(ii) Amortiguamiento del suelo

Teniendo en cuenta los resultados existentes de la prueba del suelo, para el amortiguamiento interior del suelo correspondiente a la distorsión durante un sismo grande (entre 10^{-4} y 10^{-3}), se toma 0.05. Considerando la dispersión debida a la estratigrafía del suelo, se toma 0.15 para desplazamiento y 0.07 para volteo.

(iii) Amortiguamiento de los pilotes

Se supone que el amortiguamiento de los pilotes es, por lo menos, igual que el amortiguamiento del interior del suelo, tomando el valor de 0.05 para desplazamiento y volteo.

6.4 Ejemplo de cálculo del índice de evaluación I_{so}

Se presenta el resultado del ejemplo de cálculo del valor I_{so} (coeficiente de cortante basal de respuesta) para un edificio de concreto reforzado (CR), obtenido del coeficiente de ajuste del período, coeficiente de ajuste de la respuesta (para modos y amortiguamiento) y el espectro envolvente de respuesta de aceleración de la superficie del terreno.

(1) Método de cálculo de los coeficientes de ajuste del período y la respuesta

Se supone que los edificios, los pilotes y el suelo son lineales.

Los edificios para analizar tienen dimensiones de 5 m × 5 m, 10 m × 10 m y 30 m × 30 m, y de 1 a 15 niveles. Considerando la variación del promedio del período T_b y el amortiguamiento h_b de edificio empotrado, se suponen los siguientes:

$$T_b = (0.06 \pm 0.02)N \quad h_b = 0.02 \sim 0.04$$

N: número de niveles

Se calculan los coeficientes de ajuste del período y la respuesta (para modos y amortiguamiento) con las ecuaciones (Apéndice I.2.6.1), (Apéndice I.2.6.2) y (Apéndice I.2.6.3).

(2) Resultado del cálculo de los coeficientes de ajuste del período y la respuesta

Se calcularon los coeficientes de ajuste para 6 tipos de suelo que se han definido anteriormente. El período y amortiguamiento del edificio empotrado se supusieron como $0.06N$ (N: número de niveles) y 3% respectivamente.

En la Figura Apéndice I.2.6.9, se presenta el resultado para el suelo tipo 2. Se puede observar una variación grande del coeficiente de ajuste del período (C_T) para edificios bajos de niveles 1 a 3, dependiendo de la dimensión plana de edificio. Sin embargo, para los edificios con más de tres niveles, el porcentaje de desplazamiento se acerca a 0 mientras que la rigidez lateral de los pilotes aumenta, y para edificios de dimensión plana más que 10m por 10m, el porcentaje de volteo es pequeño. Por lo tanto los edificios son casi empotrados, teniendo el valor del coeficiente de ajuste del período cercano a 1.

El coeficiente de ajuste de la respuesta ($C_M \times C_H$) varía dependiendo de la dimensión plana para edificios bajos, y se establece para edificios altos de más de 3 niveles.

Los anteriores se han observado de manera similar para otros 5 tipos de suelo.

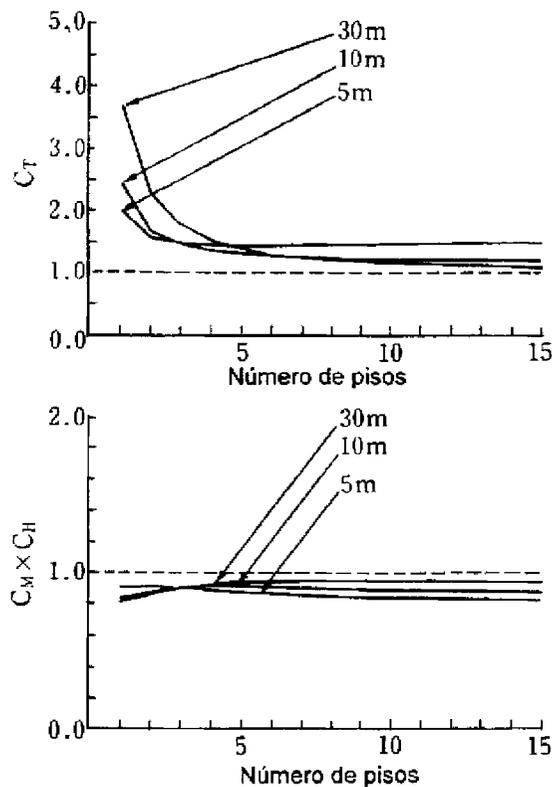


Figura Apéndice I.2.6.9 Coeficiente de ajuste del período y de la respuesta (suelo tipo 2)

(3) Resultados del cálculo del índice de evaluación I_{50}

Se calcularon los valores de I_{50} para los 6 tipos de suelo. En la Figura Apéndice I.2.6.10 y la Tabla Apéndice I.2.6.2, se presentan los resultados para el suelo tipo 2.

Estas gráficas se obtuvieron como sigue:

(i) Los parámetros que influyen en I_{so} son la dimensión plana, el período y amortiguamiento del edificio empotrado. Se supuso que el amortiguamiento es igual al promedio de 3%, y se calcularon los valores de I_{so} variando la dimensión plana para el promedio y los valores máximo y mínimo del período del edificio.

(ii) Se calcularon los valores de I_{so} correspondientes a los valores límites de amortiguamiento para cada período del edificio. Luego, se obtuvo el promedio de la variación de I_{so} , que se definió como el coeficiente de ajuste del amortiguamiento.

En la Figura Apéndice I.2.6.10, se presenta el resultado de cálculo de I_{so} para el promedio de amortiguamiento. En la Tabla Apéndice I.2.6.2, se presenta el resultado acompañado con los coeficientes de ajuste de amortiguamiento.