

BOLETÍN TÉCNICO NO. 7

MEJORAMIENTO DE LA CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS UTILIZANDO SISTEMAS GEOPIER

Este Boletín Técnico discute sobre las secciones de diseño sísmico del manual 2015 International Building Code (IBC) del 2015, adoptadas en múltiples áreas de los Estados Unidos y a nivel internacional. Este boletín se enfoca en las clasificaciones geotécnicas utilizadas para determinar los espectros de respuesta y describe cómo el uso de las Pilas de Agregado Compactado (RAP – por sus siglas en inglés), al rigidizar los suelos, permite mejorar la clasificación sísmica de suelos y reduce las aceleraciones de diseño.

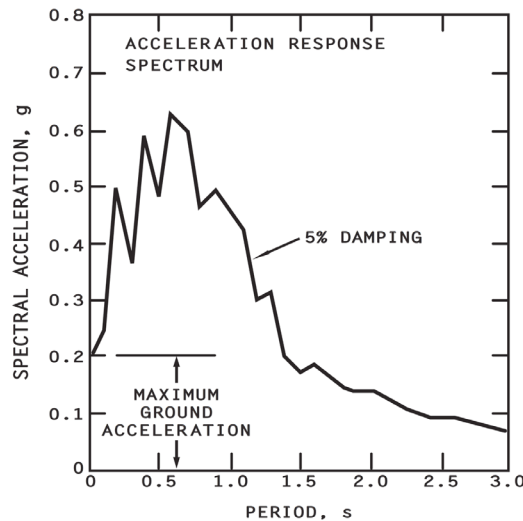
1. MOVIMIENTOS SÍSMICOS EN EL IBC 2015

Los sismos ocasionan que la superficie de la tierra acelere de forma aleatoria en sentido horizontal y vertical. Las vibraciones que llegan a la superficie desde la roca subyacente dependen de las propiedades del suelo. Generalmente, la mayoría de las estructuras construidas en superficie o cerca de ella son diseñadas para resistir solamente las componentes horizontales de las aceleraciones, mientras que la componente vertical usualmente es ignorada. Uno de los métodos más simples y comúnmente utilizados para el diseño sísmico de estructuras es el Método de Fuerza Lateral Equivalente, donde los movimientos sísmicos del suelo, complicados y aleatorios, son simplificados y reducidos a una fuerza estática equivalente. Generalmente, la magnitud de esta fuerza estática equivalente está en función de la masa de la estructura, su periodo fundamental de vibración, la proximidad al origen del sismo, las características de amortiguamiento, y las condiciones locales de los suelos. La fuerza lateral, a grueso modo, equivale a la masa multiplicada por la aceleración.

ESPECTRO DE RESPUESTA

Cuando la base de una estructura se somete a movimientos laterales estas responden con un movimiento oscilatorio. Los ingenieros comúnmente utilizan una herramienta conocida como el espectro de respuesta para relacionar la respuesta de la estructura con su periodo fundamental de vibración. Una gráfica de espectro de respuesta puede relacionar el desplazamiento, velocidad o la aceleración a un periodo fundamental para un movimiento sísmico dado o una serie de movimientos sísmicos dados. De tal forma, es posible graficar la respuesta de la estructura para varios espectros de diseño. La Figura 1 muestra una gráfica de la respuesta de aceleración contra el periodo para un movimiento sísmico hipotético. Por ejemplo, para una estructura con un periodo fundamental de 0.5 segundos, sujeta a este movimiento en particular, la respuesta de aceleración máxima sería de 0.5g o cinco décimos de la aceleración por gravedad.

Figura 1.
Aceleración Espectral Típica contra Período
para un Sismo Hipotético.



ACELERACIÓN PICO DEL TERRENO VS ACELERACIÓN ESPECTRAL

En referencia a la Figura 1, note que la máxima aceleración de la superficie o Aceleración Pico del Terreno (PGA – por sus siglas en inglés), equivale a 0.2g y es representado por la respuesta espectral a un periodo natural de cero. Para estructuras con periodos de hasta 1.5 segundos, la aceleración espectral de la estructura es mayor o igual al PGA y para estructuras con periodos mayores a 1.5 segundos, la aceleración espectral de la estructura es menor al PGA. Esto sería para el caso de este sismo hipotético. El espectro de respuesta para diseño utilizado en códigos sísmicos incluye múltiples sismos potenciales que podrían afectar un área dada.

AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL

Cuando las estructuras entran en movimiento debido a una aceleración sísmica, ellas tienden a regresar rápidamente a su posición inicial una vez que ha cesado el movimiento del terreno (asumiendo un comportamiento elástico). El amortiguamiento es la propiedad de una estructura que previene que ocurra una oscilación indefinida de la estructura. El amortiguamiento crítico es el nivel de amortiguamiento requerido

para prevenir la oscilación. Esto significa que una estructura amortiguada críticamente regresaría a su posición original sin oscilar al ser sujeta a un movimiento lateral. En cambio, una estructura idealizada con cero amortiguamiento (sin pérdidas de energía debido a fricción, ductilidad, etc.) oscilaría indefinidamente. Las estructuras reales obtienen su capacidad de amortiguamiento de las características de los materiales constructivos, conexiones, elementos no estructurales y muchos otros factores. Empíricamente, el amortiguamiento de un edificio se asume en el rango de 2% a 15% del amortiguamiento crítico, siendo 2% a 5% los valores más comúnmente usados. Cuando se considera el amortiguamiento estructural, la forma general del espectro de respuesta permanece igual y es solamente reducido en escala (con la excepción a un periodo de cero).

LA PRÁCTICA ACTUAL

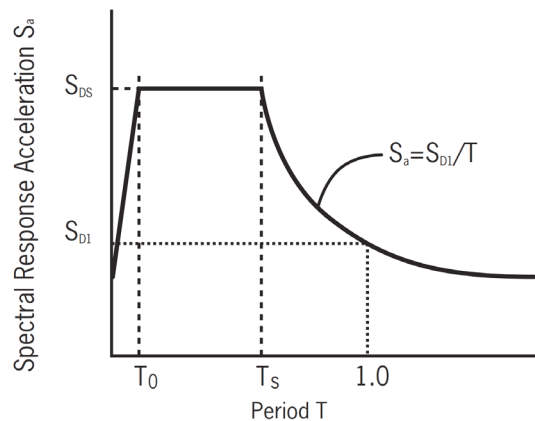
El IBC del 2015 se basa en mapas de riesgo sísmico desarrollados para los Estados Unidos por el US Geological Survey (USGS). El IBC representa el movimiento sísmico del Sismo Máximo Considerado (MCE – por sus siglas en inglés) en un área geográfica específica utilizando mapas de respuesta de aceleración espectral. El MCE se define como el

movimiento sísmico con un 2% de probabilidad de ser excedido en 50 años (período de retorno de 2500 años). Se generaron dos mapas distintos; uno para estructuras con periodos cortos (se seleccionó 0.2 segundos para representar el periodo corto del espectro de respuesta para todos los Estados Unidos) y uno para estructuras con un periodo de un segundo, ambas considerando el 5% de amortiguación crítica. Al reconocer los factores de seguridad inherentes en las guías de diseño del código, se pueden utilizar para diseño dos tercios de los valores espectrales en el mapa. Con estos dos valores, aumentados o disminuidos por efectos

de sitio, se puede elaborar un espectro de respuesta de diseño que represente la respuesta de una estructura en esa localización.

La Figura 2 muestra el espectro de respuesta generalizado de diseño del IBC, donde, S_{DS} es la aceleración espectral de diseño a periodos cortos y S_{D1} es la aceleración espectral de diseño para periodos de un segundo. El punto T_0 se define en la IBC como $0.2S_{D1}/S_{DS}$ y T_s equivale a S_{D1}/S_{DS} . La ecuación de la línea para periodos menores que T_0 es $S_a = 0.6 S_{DS}/T_0 + 0.4S_{DS}$.

Figura 2.
Espectro de Respuesta de Diseño, dado por la IBC.



LA INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ DEL SUELO EN EL ESPECTRO DE RESPUESTA

El IBC define cinco clasificaciones de sitio, de la clasificación A hasta la F, basado en el tipo de suelo o roca encontrado y sus propiedades (por referencia al American Society of Civil Engineers Publication ASCE 7). La rigidez del suelo bajo un edificio influye en la aceleración espectral sentida por el mismo. En general, los suelos blandos tienden a amplificar los movimientos sísmicos. Estos conceptos se representan en la Tablas 1613.3.3(1) y 1613.3.3(2) del IBC 2015. El espectro de respuesta de diseño dado en el IBC fue desarrollado para una clasificación de sitio B, por lo que los espectros de respuesta para sitios con clasificación distinta a B deben ser multiplicados por el coeficiente apropiado dado en las tablas. Los

coeficientes varían entre 0.8 para la Clasificación A hasta 3.5 para la clasificación E. (Note que el IBC requiere una investigación geotécnica específica de sitio para sitios con clasificación F).

Entonces, para un edificio diseñado en suelos más blandos, la aceleración espectral de diseño sería mayor que para una obra con suelos más rígidos. Debido a la relación entre fuerza y aceleración, los edificios diseñados para aceleraciones espectrales mayores serán sujetos a fuerzas de mayor magnitud, necesitando elementos estructurales más grandes, conexiones más resistentes y consideraciones especiales para el anclaje de componentes no estructurales. Todo ello se traduce en mayores costos de construcción.

2. MODIFICACIONES AL CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN

CLASIFICACIÓN E AUTOMÁTICA

El IBC 2015 señala que los sitios con más de 10 pies (3 metros) de suelos blandos deben ser clasificados automáticamente como tipo E (en referencia al ASCE 7). Este tipo de clasificación será descrito con mayor detalle más adelante. Los suelos blandos son descritos por el código como aquellos que poseen una resistencia al corte no drenado de menos de 500 psf (24 kPa), contenido de agua mayor a 40% y un índice de plasticidad mayor a 20.

JUSTIFICACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Las aceleraciones de diseño aumentadas para edificios construidos sobre suelos blandos, especialmente los que poseen menos de 8 niveles, resultan en grandes aumentos en las dimensiones de los elementos estructurales para resistir las cargas laterales calculadas usando el código de construcción. El aumento en la dimensiones de los elementos estructurales trae un gran impacto en los costos de un proyecto. Por estas razones, aumentar la rigidez de los suelos (clasificación de sitio) en ciertos casos puede significar ahorros en la construcción del edificio.

3. EVALUACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE SITIO SEGÚN EL IBC.

El IBC 2015, haciendo referencia al ASCE 7, utiliza los siguientes tres métodos para estimar la clasificación de sitio: método por velocidad de onda de corte, método por valores N del ensayo SPT, método por la resistencia al corte no drenado. Los tres métodos calculan la rigidez promedio del subsuelo hasta a una profundidad de 100 pies (30 metros) bajo la superficie y luego comparan la rigidez promedio a un valor de referencia. El cálculo del promedio ponderado para el método de velocidad de onda de corte se describe mediante la siguiente ecuación, donde v_{si} es la velocidad de onda de corte para un estrato (pies por segundo) y d_i es el espesor del estrato entre 0 a 100 pies (30m).

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

Ec. 1.

Los métodos de valor N del ensayo SPT y el de la resistencia a corte no drenada utilizan el mismo promedio ponderado simplemente sustituyendo el valor N de SPT o resistencia al corte no drenada para cada estrato, respectivamente.

VALORES DE REFERENCIA PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La información contenida en la Tabla 1 fue tomada del ASCE 7 y describe diferentes clasificaciones de sitio basadas en velocidades de onda de corte, valores N de ensayos SPT, y resistencias al corte no drenado. El promedio ponderado de los parámetros calculados para el perfil de suelos específico del sitio es comparado con los rangos de valores dados en la Tabla 1 para determinar la clasificación del sitio.

Tabla 1.
Clasificación de Sitio según el IBC.

SITE CLASS	SOIL PROFILE NAME	SHEAR WAVE VELOCITY, v_s IN TOP 100 FEET (FT/S)	STANDARD PENETRATION RESISTANCE, N	SOIL UNDRAINED SHEAR STRENGTH S_u (PSF)
A	Hard Rock	$v_s > 5,000$	Not applicable	Not applicable
B	Rock	$2,500 < v_s \leq 5,000$	Not applicable	Not applicable
C	Very dense soil and soft rock	$1,200 < v_s \leq 2,500$	$N > 50$	$S_u > 2,000$
D	Stiff soil profile	$600 < v_s \leq 1,200$	$15 \leq N \leq 50$	$1,000 \leq S_u \leq 2,000$
E	Soft soil profile	$v_s < 600$	$N < 15$	$S_u < 1,000$

La selección del método más apropiado para evaluar la clasificación de sitio depende de la disponibilidad de información específica a la obra y de las condiciones de suelos. La sección siguiente presenta correlaciones útiles para estimar la clasificación de suelos utilizando el método de velocidades de onda de corte.

VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE DEL SUELO MATRIZ

El módulo de corte de un suelo no cohesivo puede ser determinado de mediciones en sitio o de las siguientes correlaciones con valores N de ensayos SPT:

$$G_{\max} = 20,000 (N_1)_{60}^{0.333} (\sigma'_m)^{0.5} \quad \text{Ec. 2.}$$

[Seed et al.1986]

$$G_{\max} = 325 N_{60}^{0.68} \quad \text{Ec. 3.}$$

[Imai and Tonouchi 1982]

donde $(N_1)_{60}$ es el valor N corregido para eficiencia de energía y sobrecarga, σ'_m es el esfuerzo efectivo promedio y N_{60} es el valor N corregido para eficiencia

de energía. $G_{\max}$ y σ'_m están en unidades de libras por pie cuadrado (psf). La velocidad de onda de corte se puede calcular utilizando los resultados de módulo de corte provisto en las Ecuaciones 2 y 3 y el peso unitario como se indica a continuación:

$$v_s = (G/p)^{0.5} \quad \text{Ec. 4.}$$

donde p equivale al peso unitario del suelo (densidad dividido por el coeficiente de gravedad de 9.81 m/s^2 o 32.2 ft/s^2).

VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE EN PILAS DE AGREGADO COMPACTADO GEOPIER®

Se han realizado investigaciones en la Iowa State University para medir las velocidades de onda de corte utilizando geófonos para registrar la propagación de las ondas dentro de los elementos Geopier. Los resultados de las investigaciones indican módulos de corte del orden de 300 MPa (6300 ksf) (White 2004). Utilizando la relación de la Ecuación 4, se calculan velocidades de onda de corte de 366 m/s (1,200 ft/s) para los elementos Geopier.

4. USO DE PILAS DE AGREGADO COMPACTADO PARA MEJORAR LA CLASIFICACIÓN DE SITIO

Los sitios con suelos más rígidos tienen clasificaciones de sitio que resultan en una disminución en las aceleraciones espectrales de diseño para edificios de menos de ocho niveles. Las Pilas de Agregado Compactado (RAP por sus siglas en inglés) pueden utilizarse para aumentar la rigidez de algunos estratos de suelo y en consecuencia cambiar la clasificación de sitio y reducir las aceleraciones espectrales. Los elementos son construidos utilizando el método de remplazo o desplazamiento. En el método de remplazo se crea una cavidad y se compacta el agregado dentro de la cavidad en capas delgadas utilizando un apisonador patentado; mientras que el método de desplazamiento comprende penetrar un mandril hueco dentro del terreno para desplazar el subsuelo, levantando luego el mandril para dejar fluir el agregado y bajar nuevamente el mandril, compactando así capas de 30 cm (1 ft). La alta energía de compactación impartida al agregado causa que este se compacte en sentido vertical y que empuje lateralmente contra las paredes de la cavidad, ocasionando un incremento del esfuerzo horizontal del suelo matriz y una reducción en la compresibilidad del suelo matriz entre los

elementos. La construcción de elementos RAP resulta en elementos de agregado de alta densidad y con una rigidez muy elevada, lo cual resulta en una rigidez compuesta del suelo considerablemente mejorada dentro de la zona reforzada.

VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE COMPUESTA DENTRO DE LA ZONA REFORZADA POR PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

La instalación de los elementos RAP aumenta la velocidad de onda de corte compuesta de los estratos reforzados por dichos elementos. La velocidad de onda de corte compuesta dentro de esta zona reforzada ($v_{s, comp}$) se calcula utilizando la siguiente relación:

$$v_{s, comp} = (R_a) v_g + (1-R_a)v_s \quad \text{Ec. 5.}$$

donde v_g es la velocidad de onda de corte dentro del elemento Geopier, v_s es la velocidad de onda de corte del suelo matriz dentro de la zona reforzada y R_a es la razón de remplazo de área de los elementos RAP. La razón de remplazo de área es la razón entre el área transversal total de elementos RAP y el área total de terreno a reforzar.

5. EJEMPLO

El siguiente ejemplo ilustra el método para determinar la clasificación de sitio para el perfil de suelos no reforzado mostrado en la Figura 3 y la clasificación de sitio al incorporar las Pilas de Agregado Compactado.

Figura 3.
Ejemplo de Perfil de Suelos

0 ft.	MEDIUM STIFF CLAY
20 ft.	$v_s = 600 \text{ ft/s}$
70 ft.	DENSE SAND $v_s = 1,050 \text{ ft/s}$
100 ft.	BEDROCK $v_s = 5,000 \text{ ft/s}$

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SIN REFORZAR

Del IBC 2015, el promedio ponderado de la velocidad de onda se calcula como sigue:

$$v_{s-avg} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} = \frac{100 \text{ ft}}{\frac{20 \text{ ft}}{600 \text{ ft/s}} + \frac{50 \text{ ft}}{1,050 \text{ ft/s}} + \frac{30 \text{ ft}}{5,000 \text{ ft/s}}} = 1,150 \text{ ft/s}$$

Ec. 6.

Los resultados de este cálculo indican una velocidad de onda de corte promedio en los primeros 100 pies (30 m) del perfil de 1,150 ft/s (350 m/s). Utilizando esta velocidad en la Tabla 1 la clasificación de suelos indicada es la D.

CLASIFICACIÓN DE SITIO AL REFORZAR CON GEOPIER

$$v_{s-avg} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

Ec. 7.

Si el estrato de arcilla medianamente rígida se refuerza con elementos RAP con una razón de remplazo de área del 15%, la velocidad de onda de corte compuesta en los primeros 20 pies (6m) de profundidad equivaldría a:

$$v_{s-comp} =$$

Ec. 8.

$$R_a(v_g) + (1 - R_a)v_s = (0.15)(1,200 \text{ ft/s}) + (1 - 0.15)(600 \text{ ft/s}) = 690 \text{ ft/s}$$

La velocidad de onda de corte promedio para el sitio usando la velocidad de onda de corte compuesta para la zona reforzada con Geopier equivale a:

$$v_{s-avg} = \frac{100 \text{ ft}}{\frac{20 \text{ ft}}{690 \text{ ft/s}} + \frac{50 \text{ ft}}{1,050 \text{ ft/s}} + \frac{30 \text{ ft}}{5,000 \text{ ft/s}}} = 1,210 \text{ ft/s}$$

Ec. 9.

La instalación de elementos RAP a una razón de remplazo de área del 15% (espaciamiento aproximado de 5.5 pies o 1.66 metros centro a centro) aumenta el promedio de la velocidad de onda de corte de 1,150 ft/s a 1,210 ft/s (350 m/s a 369 m/s). Basándose en este mejoramiento, la clasificación de sitio mejora de Clasificación D a Clasificación C.

6. RESUMEN

Los elementos de refuerzo Geopier pueden utilizarse para aumentar la rigidez de los suelos, aumentando así la velocidad de onda de corte compuesta y mejorando la clasificación sísmica de sitio de diseño.

Mejorar la clasificación sísmica de sitio reduce los valores de aceleración espectral de diseño y puede reducir por ende el costo de la estructura.

REFERENCIAS

American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 3rd Edition, Reston, VA.

Imai, T. and Tonoghi, K., 1982, "Correlation of N-value with s-wave velocity and shear modulus," Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 57-72.

International Code Council, Inc., 2014. 2015 International Building Code. 3rd Edition, Country Club Hills, IL.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K., 1986, "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils." Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, Vol. 112, No. GT11, 1016-1032.

White, D.J, 2004, Personal communication. September 8, 2004.

RECONOCIMIENTOS

Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E. | Brendan T. FitzPatrick, P.E. | John Miller, P.E.

REFUERZO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LOS SISTEMAS GEOPIER®

Trabaje con nuestros ingenieros alrededor del mundo para resolver sus retos de refuerzo y mejoramiento de suelos. Para más información, llame al **800-371-7470**, correo electrónico info@geopier.com, o visite geopier.com.

130 Harbour Place Drive, Suite 280, Davidson, NC 28036
800.371.7470 | info@geopier.com | marketing@geopier.com
www.geopier.com

GEOPIER®
Tensor.

©2016 Geopier Foundation Company, Inc. La tecnología Geopier® y las marcas de fábrica están protegidas bajo patentes de los EUA y marcas de fábrica listadas en www.geopier.com/patents y otras aplicaciones de marca y patentes pendientes. Existen otras patentes extranjeras, aplicaciones de patentes, marcas registradas y marcas de fábrica.

GEOPIER_TB_7_04.16