

Documento Anexo de Objetivos de Desempeño

# Recomendaciones para análisis de interacción suelo y estructura, y amplificación por efectos locales



Versión Borrador

Marzo de 2023

Secretaría General de la Comisión Permanente del Código Modelo Sísmico:

**INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN – CHILE**



## Contenido

1.	Introducción.....	3
2.	Criterios para la caracterización del suelo.....	3
3.	Consideraciones generales para análisis de interacción suelo estructura .....	4
3.1.	Criterio para predefinir si un análisis inercial de SSI puede tener una afectación en el diseño .....	4
3.2.	Lineamientos para considerar efectos de interacción suelo estructura de tipo cinemático .....	5
3.2.1.	Promedio de losas de base.....	5
3.2.2.	Efectos de empotramiento.....	6
3.3.	Lineamientos para considerar efectos de interacción suelo estructura de tipo inercial.....	8
3.3.1.	Alargamiento del periodo .....	8
3.3.2.	Amortiguamiento de cimentación .....	8
3.4.	Flexibilidad del suelo y de la fundación.....	9
3.5.	Lineamientos para la modelación de subterráneos.....	9
4.	Consideraciones de amplificación por efectos locales .....	17
4.1.	Efectos topográficos .....	17
4.2.	Suelos licuables .....	18
4.3.	Efectos de la geometría de basamento rocoso.....	19

# 1. Introducción

En un marco general, la Interacción Suelo-Estructura o Interacción Suelo-Fundación-Estructura, SSI por sus siglas en inglés, se puede definir como la influencia en la respuesta estática o dinámica del terreno provocado por la presencia de un sistema de cimentación y su correspondiente estructura y viceversa.

A nivel estático, esta influencia tiene relación con las modificaciones de esfuerzos en la cimentación y la superestructura, principalmente generadas por las variaciones de los estados de esfuerzos y de las deformaciones en el suelo producto de las cargas aplicadas. Por su parte a nivel dinámico, la influencia en la respuesta del sistema suelo-fundación-estructura, ante sollicitaciones dinámicas que se propagan a través del terreno de cimentación, están condicionadas por efectos de tipo inercial, como son: la disipación de energía por amortiguamiento en el suelo, y la alteración del periodo de la estructura debido a la flexibilidad y deformaciones permanentes del suelo; y de efectos de tipo cinemático, como la variación que genera la rigidez de la cimentación en las ondas sísmicas incidentes, produciendo una alteración en el movimiento del suelo bajo la estructura respecto del movimiento en campo libre. El efecto de interacción suelo estructura modifica la respuesta dinámica respecto de la consideración de estructura con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en la vecindad de la cimentación.

## 2. Criterios para la caracterización del suelo

Las metodologías para los análisis de interacción suelo estructura presentan variadas formulaciones que van desde métodos directos, que deben involucrar un importante número de parámetros tanto del suelo como del entorno geomorfológico, hasta modelos simplificados, en los cuales el terreno es caracterizado mediante pocos parámetros. Por lo tanto, la caracterización va de la mano con la metodología seleccionada, la tiene consigo parámetros mínimos, los que deberán ser preferentemente medidos, más que correlacionados. Cabe indicar que el uso de modelos simplificados para los análisis de interacción, son una herramienta práctica de fácil implementación para el diseño, más aun considerando, que los parámetros requerido de dicho modelos, pueden articularse con parámetros ya incluidos en las caracterización sísmica de los código de diseño, como es el caso de la velocidad de propagación de onda de corte del terreno.

El uso de modelos de análisis directo permite obtener un importante número de parámetros de respuesta del suelo y de la estructura, pero su uso debe está limitado a los casos en los que se cuente con información de calidad, tanto del predio en estudio, como información regional. Lo anterior es de gran importancia, ya que, dado el tipo y cantidad de parámetros requeridos, se debe evitar que el uso de una cantidad importante de estimaciones, finalmente generen un modelo, que no responde a las condiciones reales de la zona de estudio. Por lo que es estos casos, el uso de modelos simplificados, teniendo claro su alcance, son una alternativa de gran utilidad práctica.

Teniendo claro que el método seleccionado condiciona la cantidad y tipo de parámetros requeridos. En lo que respecta al terreno, se debe contar con un perfil de caracterización de parámetros de rigidez y una identificación clara, de la estratigrafía del perfil, de preferencia hasta al basamento rocoso, o hasta un estrato con velocidad de onda de corte correspondiente a una alta rigidez. Lo anterior, bajo la premisa de no estar afectos a amplificación generadas por la topográfica, geometría del basamento rocoso, o cualquier singularidad geomorfológica, la cual deberá ser análisis de manera independiente, con información regional, acompañada de modelos bidimensional que permitan evaluar la respuesta dinámica del terreno en el dominio de la frecuencia.

### 40 3. Consideraciones generales para análisis de interacción suelo estructura

41 Con el fin de evaluar la respuesta del sistema de fundación se podrá usar los métodos de interacción suelo  
42 estructura. Para lo cual se definen dos tipos de modelación:

43 “Substructure approach”: en este modelo la respuesta del suelo es representada mediante resortes orientados  
44 verticalmente en la mayoría de los casos, aunque puede ser incorporados resortes horizontales que permiten  
45 evaluar la respuesta horizontal de la fundación.

46 “Direct analysis approach”: en este modelo la respuesta del suelo y de la estructura, cinemática e inercialmente,  
47 son modeladas mediante elementos finitos. Este modelo requiere una cantidad importante de parámetros de  
48 entrada para garantizar un análisis de respuesta confiable o acorde a las condiciones de un sitio. Su uso  
49 habitualmente se limita a proyectos de gran envergadura.

50 Los efectos de la respuesta sísmica de una estructura analizados mediante SSI generalmente son analizados de  
51 manera desacoplada, mediante lo cual se identifica la variación en la respuesta sísmica de un sistema de  
52 fundación respecto de la respuesta en campo libre para un tipo de suelo determinado. Por lo cual el efecto de  
53 interacción se puede dividir en una componente de **interacción cinemática**, la cual permite evaluar la respuesta  
54 sísmica considerando sólo el efecto de la rigidez del sistema de fundación; y en una componente **interacción**  
55 **inercial** que permite evaluar la respuesta considerando la sollicitación inercial de la estructura, así como las  
56 deformaciones que ella produce en el sistema de fundación producto de la rigidez del suelo.

57 **Interacción cinemática:** principalmente lo componen dos tipos de efectos, “base slab averaging” y “embedment  
58 effects”.

59 **Interacción inercial:** principalmente lo componen tres tipos de efectos, “period lengthening”; “radiation  
60 damping” y “soil damping”.

#### 61 3.1. Criterio para predefinir si un análisis inercial de SSI puede tener una 62 afectación en el diseño

63 En una cantidad importante de casos, el uso de modelos de interacción suelo estructura, SSI, permiten reducir  
64 la demanda sísmica sobre una estructura, por lo que los límites de la máxima reducción deberán estar  
65 articulados con los requerimientos de las normativas de cada país. Por ejemplo, para incorporar efectos de  
66 interacción de tipo cinemático, la norma ASCE/SEI7/2016, define que se podrán incorporar factores de  
67 reducción, solo si se usa “nonlinear response history analysis”. Asimismo, no en todas las situaciones se tienen  
68 grandes variaciones en la respuesta cuando se realizan análisis inerciales de SSI, por lo que FEMA P-2091/2020,  
69 propone una relación, indicada en la Eq. 1, que permite predefinir en qué casos se puede esperar una implicancia  
70 práctica para el diseño con la incorporación de efectos derivados de un análisis SSI, definido como:

$$71 \quad \frac{h'}{v_s T} > 0.1 \quad (\text{Eq. 1})$$

72 donde  $h'$  es la altura efectiva de la estructura, medida desde la base de la fundación al centro de masa del modo  
73 fundamental;  $v_s$  es la velocidad de onda de corte efectiva promedio, definida de acuerdo con ASCE/SEI 7-16  
74 Tabla 19 3-1;  $T$  es el periodo fundamental de la estructura asumiendo base fija. Si la relación indicada en la Eq.

75 1 es superior a 0.1, se esperaría que la incorporación de análisis inerciales de interacción suelo estructura,  
76 tendría efectos relevantes en el diseño.

77 **3.2. Lineamientos para considerar efectos de interacción suelo estructura de**  
78 **tipo cinemático**

79 La incorporación de efectos cinemáticos permite generar la reducción del espectro de diseño en un rango de  
80 valores definidos, para lo cual se determinan factores asociados a la influencia del sistema de fundación y del  
81 enterramiento, cuyos efectos en suma, de acuerdo con ASCE/SEI 7-16, no podrán generar una reducción inferior  
82 al 70% del espectro de diseño. Para evaluar los efectos de tipo cinemático, se podrán usar los lineamientos  
83 definidos en el manual FEMA (2020), cuyas definiciones están articuladas con el código ASCE/SEI 7-16, el cual  
84 a continuación se presenta.

85 **3.2.1. Promedio de losas de base**

86 La presencia de sistemas de fundación de gran área, genera variaciones en las vibraciones del movimiento  
87 sísmico, lo cual produce la reducción de la demanda sobre la estructura. Así, estructuras rígidas con una mayor  
88 área de su base, la cual estará compuesta por fundaciones conectadas rígidamente, experimentarán la reducción  
89 en el movimiento del terreno que se transmite a la estructura. Para considerar este efecto cinemático, FEMA  
90 2020, presente una método que puede ser usado para un rango de velocidades de propagación de ondas de  
91 corte del suelo entre 200 y 500 m/seg. Dichos valores corresponden al rango para el cual el análisis presentado  
92 fue validado, por lo que dicho análisis no aplica para terrenos que clasifiquen sísmicamente como tipo roca.

93 Como fue indicado anteriormente, si bien los lineamientos del FEMA (2020), tienen vinculado los criterios  
94 normativos definidos en ASCE/SEI 7-16, el método para considerar efecto del sistema de fundación puede ser  
95 fácilmente implementado de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- 96 • Calcular el ancho de fundación equivalente:  $b_e = \sqrt{A_{base}} < 75 \text{ m}$
- 97 • Calcular factor de modificación  $RRS_{bsa}$ :

98 
$$RRS_{bsa} = 0.25 + 0.75 \left\{ \frac{1}{b_0^2} \left[ 1 - \left( \exp(-2b_0^2) \right) B_{bsa} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 2})$$

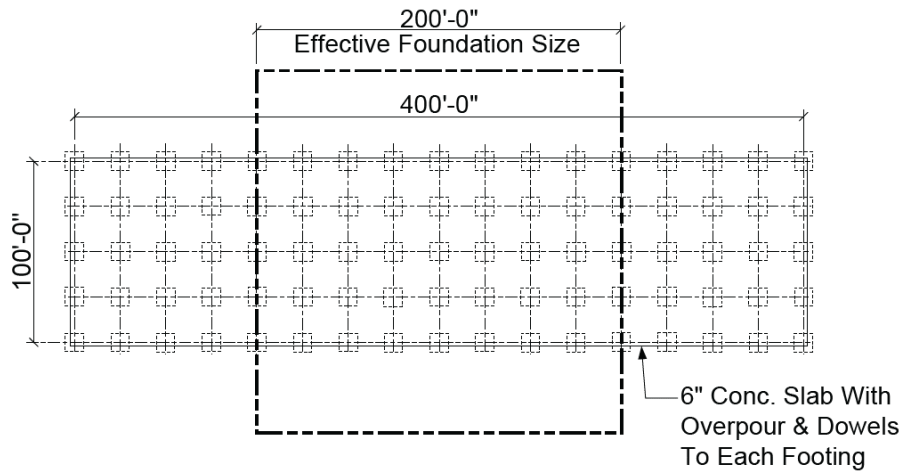
99 siendo  $b_0 = 0.0023 \left( \frac{b_e}{T} \right)$ , y

$$B_{bsa} = 1 + b_0^2 + b_0^4 + \frac{b_0^6}{2} + \frac{b_0^8}{4} + \frac{b_0^{10}}{12} \text{ for } b_0 \leq 1$$
$$B_{bsa} = \exp(2b_0^2) \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi b_0}} \left( 1 - \frac{1}{16b_0^2} \right) \right] \text{ for } b_0 > 1$$

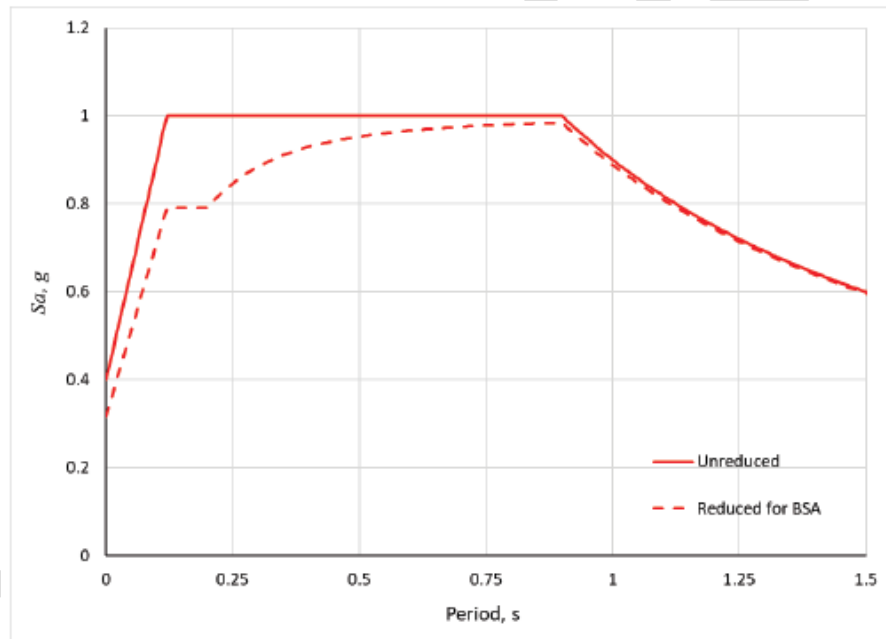
100

101 El factor  $RRS_{bsa}$ , se multiplicará por la ordenada espectral para cada periodo, generando una reducción del  
102 espectro, y sólo deberá ser usado para losas y sistemas de fundación interconectados rígidamente.

103 Para un sistema de fundación, un ejemplo de la reducción de la demanda en el espectro de diseño se muestra  
104 en la Figura 1.



105



106

107

Figura 1.

108

### 3.2.2. Efectos de empotramiento

109 El enterramiento de una estructura genera una variación en la respuesta sísmica respecto de la respuesta en  
110 campo libre, reduciendo el movimiento en el sistema de fundación, lo que se traduce en una menor demanda  
111 sobre la estructura. De acuerdo con el código ASCE/SEI 7-2017, para considerar el efecto del enterramiento,  
112 más del 75% del sistema de fundación deberá tener la cantidad de enterramiento mínimo considerado.

113 Para determinar el factor de reducción por enterramiento  $RRSe$ , el código ASCE/SEI 7-16 define la siguiente  
114 ecuación:

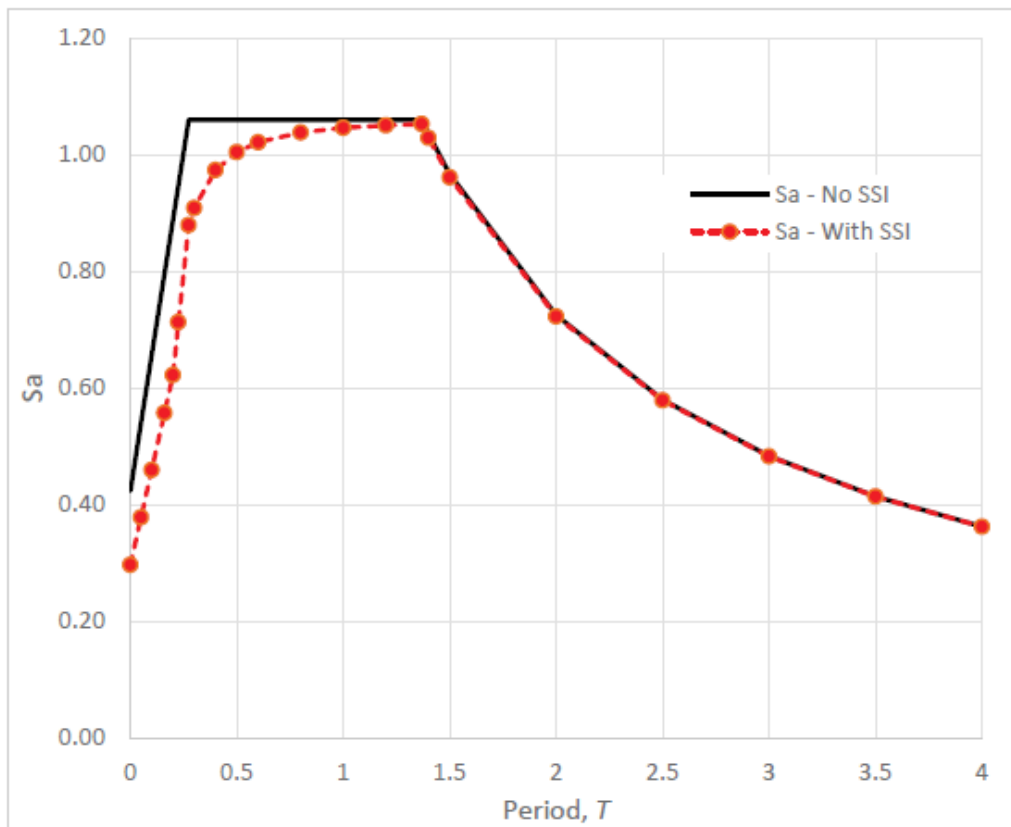
$$RRS_e = 0.25 + 0.75 \times \cos(2\pi e / Tv_s) \quad (\text{Eq. 3})$$

115

116 Siendo:  $e$  el enterramiento de la fundación, el cual no podrá ser superior a 6.0 m para efecto del uso de la Eq.  
117 3;  $v_s$  es la velocidad de onda de corte promedio (calculada de acuerdo con ASCE/SEI 7-16 Tabla 19.3-1), la cual  
118 no podrá ser inferior a 200 m/seg.

119 Un ejemplo del factor de reducción para una estructura con un enterramiento  $e$ , se muestra en la Figura 2.

120



121

122

123

Figura 2.

124 **3.3. Lineamientos para considerar efectos de interacción suelo estructura de**  
125 **tipo inercial**

126 **3.3.1. Alargamiento del periodo**

127 Cuando se realiza un análisis de interacción suelo estructura, es claro que se deben considerar las propiedades  
128 de rigidez del suelo, las cuales, al ser incorporadas junto con la rigidez de la fundación, genera un aumento en  
129 el periodo fundamental de la estructura, lo que se traduce en un incremento de la respuesta de desplazamiento,  
130 y una variación en la aceleración.

131 Para considerar el efecto inercial de alargamiento del periodo, se pueden seguir los lineamientos y  
132 procedimientos definidos en la ASE/SEI 7-19 (Eq. 19.2-2), resumidos en el capítulo 7 del manual FEMA, 2022.  
133 En dicho procedimiento, el efecto del alargamiento del periodo sobre el cortante basal, es determinado  
134 comparando el periodo fundamental, y los coeficientes de respuesta sísmica para modelos de base-fija y de  
135 base-flexible.

136 **3.3.2. Amortiguamiento de cimentación**

137 El amortiguamiento de la fundación es un efecto de tipo inercial, el cual está compuesto de dos componentes,  
138 el **amortiguamiento del suelo** y el **amortiguamiento por radiación**. El primero, corresponde al amortiguamiento  
139 histerético del suelo, el cual se puede asemejar al efecto de un amortiguador viscoso. Por su parte el  
140 amortiguamiento por radiación, el cual es mayor con el aumento de la relación de rigidez del suelo y la estructura,  
141 corresponde al efecto sobre el sistema suelo estructura causado por la generación y propagación de ondas  
142 fuera de la fundación, los cuales son generados por el desplazamiento relativo del sistema de fundación respecto  
143 de la respuesta en campo libre.

144 Es común que los procedimientos de análisis lineal consideren una relación de amortiguamiento viscoso  
145 equivalente para la estructura de 5%. En los casos donde se considera el efecto del amortiguamiento de la  
146 fundación, lo que se busca es determinar la relación de amortiguamiento efectivo para el sistema suelo-  
147 estructura, incorporando el efecto tanto de la estructura como de la interacción suelo-fundación.

148 La determinación de efectos inerciales debido al amortiguamiento de la fundación es compleja, por lo que en la  
149 práctica regular para el diseño, sus efectos son menos considerados, respecto de los otros factores de  
150 interacción. Sin embargo, se podrá seguir la detallada metodología presentados en NIST (2012), donde el  
151 análisis permite la incorporación de las dos componentes de amortiguamiento, y que también se encuentran  
152 alineadas con las definiciones contenidas en ASCE/SEI 7-16.

153 Finalmente es muy importante acotar que el procedimiento antes mencionado, de acuerdo con ASCE/SEI 7-16,  
154 sección 19.3.1, no está permitido para: fundaciones completamente aisladas, es decir, sin elementos de  
155 conexión rígidos que generen un comportamiento como sistema de fundación; fundaciones profundas, donde  
156 el fenómeno de amortiguamiento es aún más complejo, y debe seguir siendo estudiado; y finalmente para  
157 fundaciones conectadas por losas.



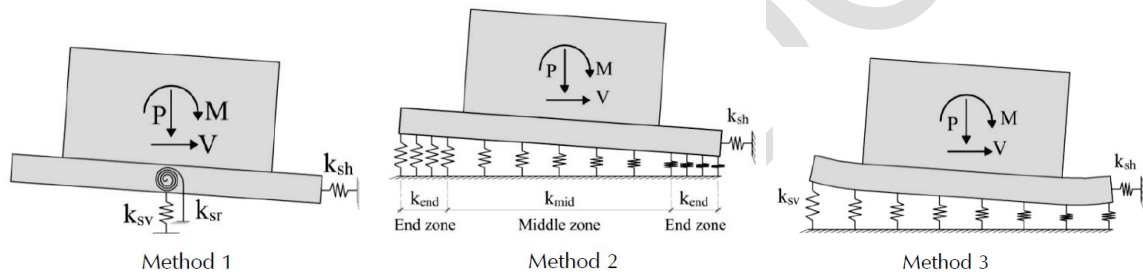
158

### 3.4. Flexibilidad del suelo y de la fundación

159 Para realizar los análisis de interacción suelo-estructura, contrario a lo presentado en un modelo de base-fija,  
160 se requiere la evaluación y caracterización de las propiedades de rigidez o flexibilidad tanto de la fundación,  
161 como de la estructura y del suelo. Generalmente, su incorporación se realiza mediante modelos analíticos,  
162 incorporando la flexibilidad vertical, horizontal y rotacional del sistema de fundación y del suelo. Para el efecto  
163 del sistema de fundación, se pueden seguir los métodos convencionales. Sin embargo, para el suelo, los códigos  
164 de diseño no incorporan criterios o procedimientos para determinar la flexibilidad del suelo.

165 La flexibilidad del suelo es habitualmente considerada, realizando un modelo simplificado donde la conexión del  
166 sistema de fundación al suelo se realiza mediante el uso de resortes, los cuales pueden ser puntuales, o  
167 distribuidos por la planta de fundación.

168 Con el objetivo de evaluar la flexibilidad del suelo, el manual FEMA (2020), define las metodologías que  
169 esquemáticamente se muestran en la Figura 3, y entrega ecuaciones para la caracterización de los resortes de  
170 acuerdo con las propiedades del suelo.



171

Method 1

Method 2

Method 3

172

Figura 3.

- 173 • Método 1. Recomendado para fundaciones muy rígidas respecto del suelo, este método define resortes  
174 puntuales, modelando cada grado de libertad como un resorte desacoplado.
- 175 • Método 2. Recomendado para análisis no lineales donde el acoplamiento explícito de la rigidez axial y  
176 rotacional se modela con resortes no lineales.
- 177 • Método 3. Recomendado cuando la flexibilidad de los elementos estructurales de la fundación se modela  
178 explícitamente.

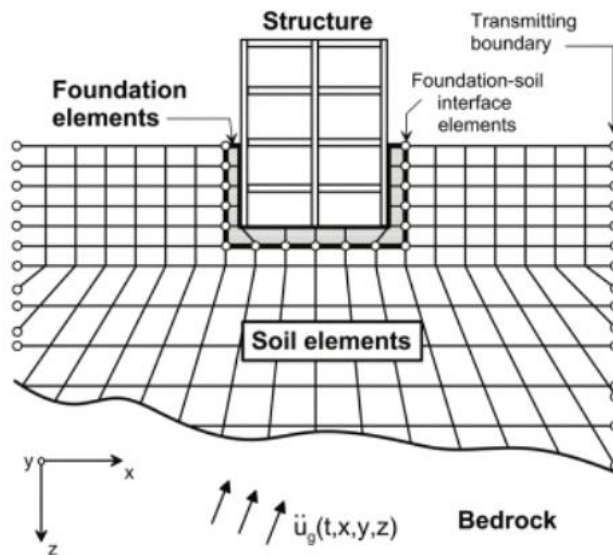
179

### 3.5. Lineamientos para la modelación de subterráneos

180 Típicamente, los códigos de diseño no proporcionan lineamientos explícitos respecto de cómo modelar el efecto  
181 de interacción considerando el subterráneo y las fundaciones. Sin embargo, existen manuales y guías prácticas  
182 como, el manual NIST (2012) y guía práctica FEMA P-2091, que presentan una categorización de los métodos  
183 de modelación que se pudieran considerar para evaluar este efecto (Interacción suelo estructura), los cuales  
184 son el método de análisis directo y el método de subestructura.

185 El método de análisis directo, como indica su nombre, el cual es explicado en detalle en NIST (2012) y resumido  
186 acá, el suelo y la estructura son incorporados directamente en el mismo modelo y se realiza un análisis como  
187 un sistema completo. Como se observa en la figura 4(a), el suelo se representa comúnmente como un continuo  
188 (por ejemplo, elementos finitos) junto con elementos de cimentación (fundación) y estructurales, y la conexión  
189 de estos se realiza mediante el uso de elementos de contacto o interfaz entre los bordes de la cimentación y el

190 límite de la malla del suelo. Adicionalmente, este método utiliza un enfoque mediante el análisis de propagación  
191 de ondas a través del suelo, para así evaluar la respuesta del sitio y como se ve excitada la estructura por esta  
192 acción, como dato de entrada del sismo se usan ondas sísmicas en el límite exterior del mallado del suelo. Este  
193 tipo de metodología permite incorporar y abordar todos los efectos de la interacción suelo-estructura, pero la  
194 solución directa del problema de la interacción suelo-estructura es difícil desde un punto de vista computacional,  
195 especialmente cuando el sistema es geoméricamente complejo o contiene no linealidades significativas en el  
196 suelo o en los materiales estructurales, por lo cual no es utilizado en la práctica común, y solo en proyectos de  
197 gran envergadura o especiales.

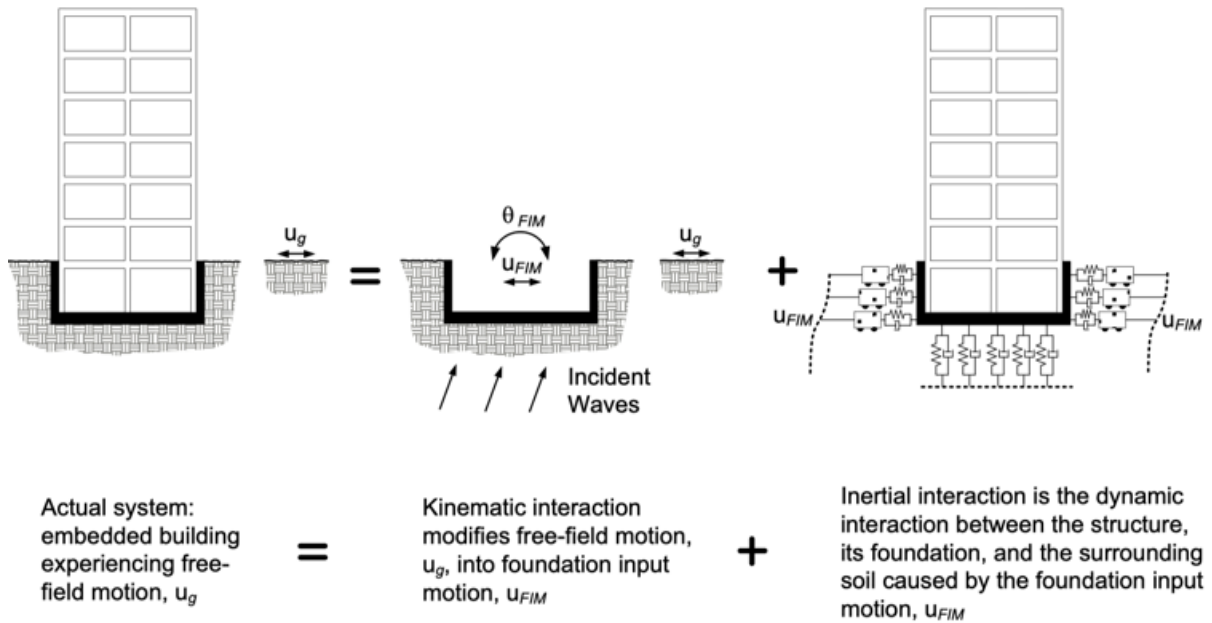


198

199

Figura 4. NIST 2012

200 Por otro lado, el método de subestructuración, como es descrito en NIST 2012 y FEMA P2091, y resumidos  
201 acá, aborda el problema de interacción suelo estructura particionando este, para abordar las diferentes  
202 complejidades del problema y posteriormente combinar los resultados de estas partes para resolver el problema  
203 completo, como se observa en forma simplificada en figura 4b. En este caso, el movimiento en la superficie del  
204 suelo en ausencia de una estructura y su cimentación se denomina movimiento en campo libre, el cual es  
205 comúnmente más grande que el movimiento de entrada en la cimentación que excita efectivamente la estructura  
206 y su cimentación. La modificación del movimiento en campo libre en el movimiento de entrada en la cimentación  
207 proviene de la interacción cinemática. El movimiento de entrada en la cimentación se puede considerar como el  
208 movimiento aplicado a los extremos de los resortes horizontales de la cimentación; difiere del movimiento real  
209 de la cimentación debido a la respuesta inercial de la estructura y las deformaciones que esa respuesta produce  
210 en los resortes de la cimentación. Esa respuesta se conoce como interacción inercial.



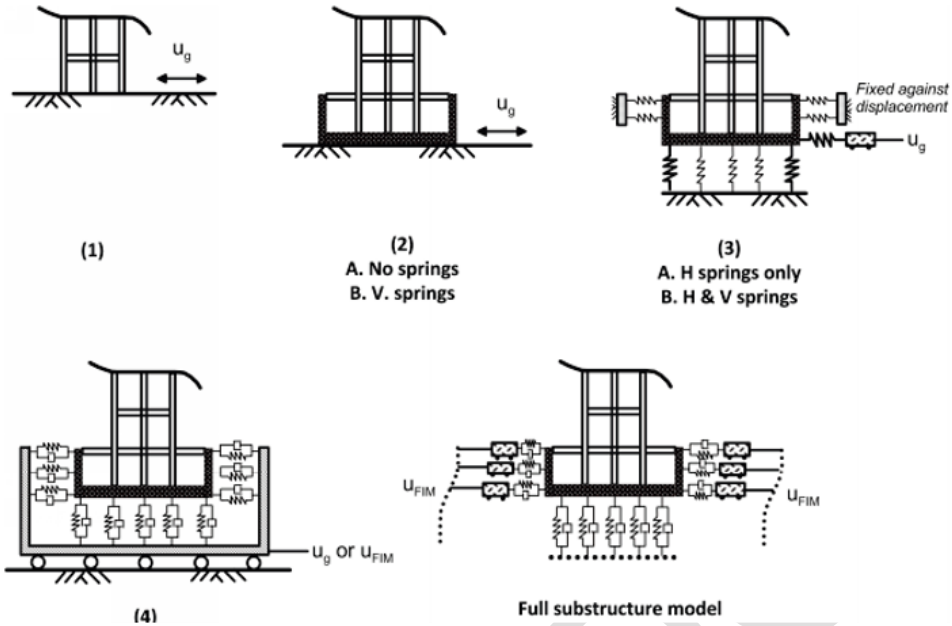
211

212 Figura 5. Movimiento en campo libre y su relación con la interacción cinemática y la interacción inercial (FEMA  
 213 P2091).

214 Para abordar los puntos anteriores, como se indica en NIS 2012 requiere: (i) una evaluación de los movimientos  
 215 del suelo en campo libre y las correspondientes propiedades del material del suelo; (ii) una evaluación de las  
 216 funciones de transferencia para convertir los movimientos en campo libre en movimientos de entrada en la  
 217 cimentación; (iii) la incorporación de resortes y amortiguadores (o elementos no lineales más complejos) para  
 218 representar la rigidez y el amortiguamiento en la interfaz suelo-cimentación; y (iv) un análisis de respuesta del  
 219 sistema combinado estructura-resorte/amortiguador con el movimiento de entrada en la cimentación aplicado.

220 Es importante mencionar, que la superposición inherente en un enfoque de subestructura requiere suponer un  
 221 comportamiento lineal del suelo y la estructura, aunque en la práctica este requisito a menudo se sigue solo en  
 222 un sentido equivalente-lineal.

223 Adicionalmente, en esta metodología de subestructura, existen diferentes enfoques que simplifican o consideran  
 224 en mayor detalle cada una de las partes del problema, como se muestran en la Figura 4c. Claramente, el modelo  
 225 “full substructure”, en adelante FSM, representaría el más completo, pero también el más complejo,  
 226 particularmente por la caracterización de las variables de interés, por lo que, desde un punto de vista práctico,  
 227 no es comúnmente usado.



228

229

Figura 6.

230

A continuación, se describen los 5 enfoques disponibles para el método de subestructuración:

231

Enfoque 1: En este enfoque se supone que el edificio está fijo al nivel del suelo y no se consideran los efectos del suelo sobre la estructura. Las reacciones se calculan en la base del modelo y luego se aplican a la cimentación en un modelo separado.

232

233



234

235

Figura 7.

236

Tiene a favor que al no tener incorporado el suelo el análisis es muy rápido. Y tiene Bajo requerimiento de software y hardware, además de facilidad en el manejo de los datos. Sin embargo, se pierde el efecto de “trancazo de la losa” o “backstay”, esto puede sub evaluar el corte solicitante sobre los muros y sobre estimar el momento volcante en las fundaciones y además Las guías de diseño por desempeño modernas (LATBSDC y Peer/TBI) piden considerar el efecto de la losa de trancamiento y exigen hacer un análisis de sensibilidad de su rigidez en el plano para evaluar cuanto corte se va a los muros perimetrales y cuanto continúa a través del núcleo. Sobre el suelo sólo es necesario tener el espectro de diseño, no son necesario coeficientes de balasto u otros.

237

238

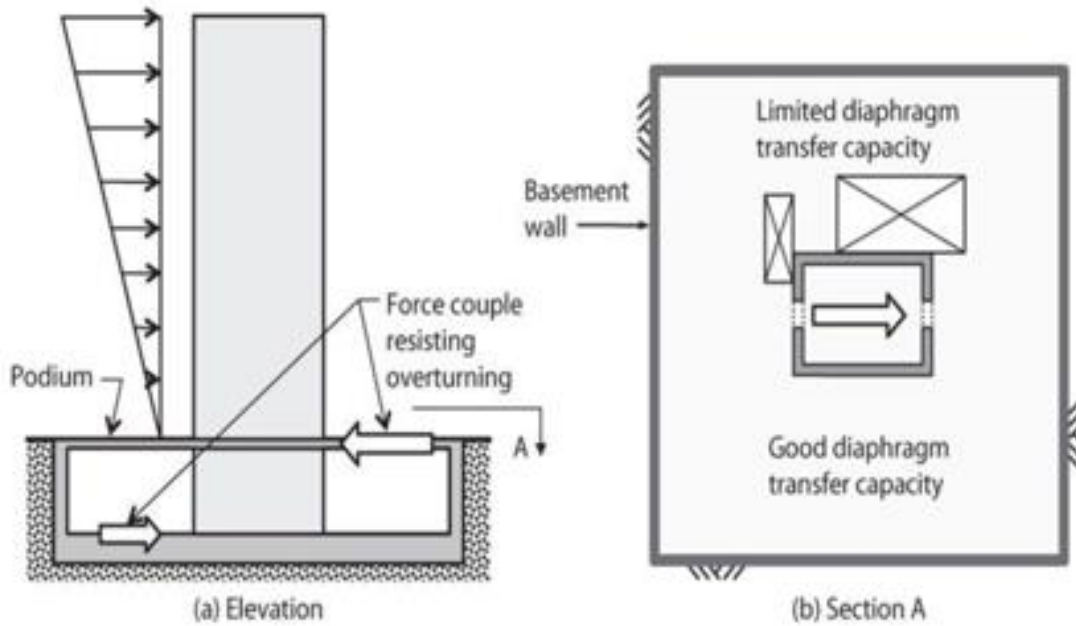
239

240

241

242

243

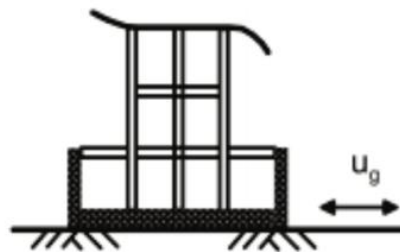


244  
245

Figura 8.

246 Fuente: Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings – Jack Moehle

247 Enfoque 2: En este enfoque se ignora el suelo a los lados de los muros de contención, pero la estructura del  
 248 sótano se incluye explícitamente en el modelo. El nivel de subterráneo más bajo se toma como base del modelo.  
 249 Se estima que el movimiento requerido para desarrollar una presión pasiva de importancia supera con creces  
 250 la cantidad de movimiento esperado en los muros de contención, por lo que la tierra contenida puede ignorarse  
 251 de manera conservadora. Una variación de este modelo (Modelo 2A) tiene una base fija. Una segunda variación  
 252 de este modelo (Modelo 2B) tiene resortes verticales debajo de la base. Ambos modelos son usados  
 253 frecuentemente en el diseño.



(2)  
A. No springs  
B. V. springs

254

255

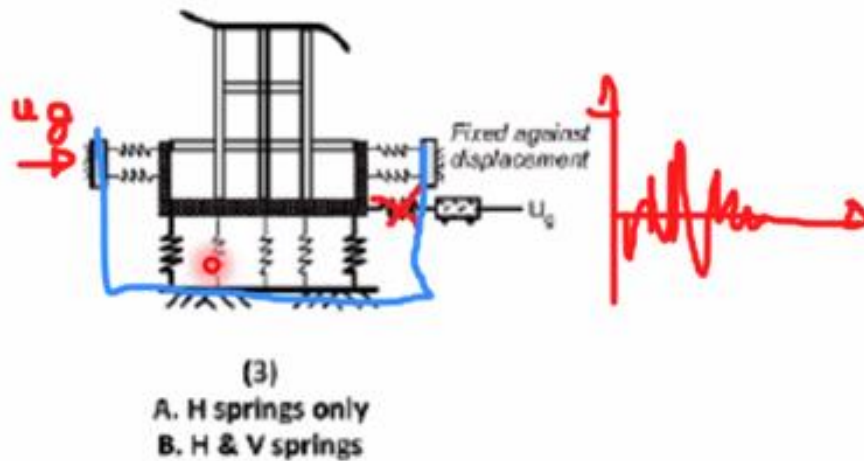
Figura 9.

256 Tiene a favor que el modelo 2A es el más usado porque incorpora el suelo de manera simple. Por otro lado, si  
257 se usa el modelo 2B se recomienda que incorporar también los resortes laterales, sino se puede producir una  
258 flexibilización artificial del sistema completo. Para el modelo 2 A se podrían despreciar las masas de los niveles  
259 bajo tierra. Sin embargo, se debe considerar contar con valores límites de las constantes de balasto (lower y  
260 upper bound) y hacer análisis de sensibilidad / envolvente, además es complejo la caracterización del suelo para  
261 modelar los resortes equivalentes. En el modelo 2B se debe considerar que el suelo no puede tomar tracciones,  
262 esto sólo es posible en un análisis no lineal.

263 Adicionalmente, Se requiere conocer las características del suelo que permitan modelar los resortes  
264 equivalentes.

265 Enfoque 3: En este enfoque, se utilizan resortes horizontales para capturar el efecto del suelo circundante. Los  
266 extremos de los resortes se fijan contra la traslación y el movimiento del suelo se introduce en la base del  
267 modelo. Una variación de este modelo (Modelo 3A) es dejando fija la base en sentido vertical. Una segunda  
268 variación de este modelo (Modelo 3B) incluye resortes verticales. Estos modelos no se usan comúnmente para  
269 el diseño.

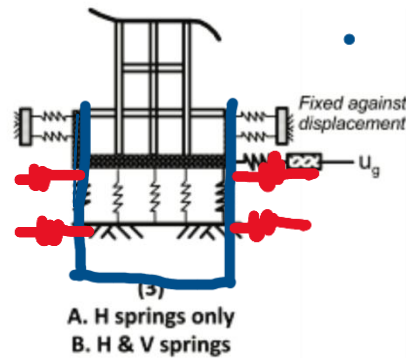
270



271

272

Figura 10.



273

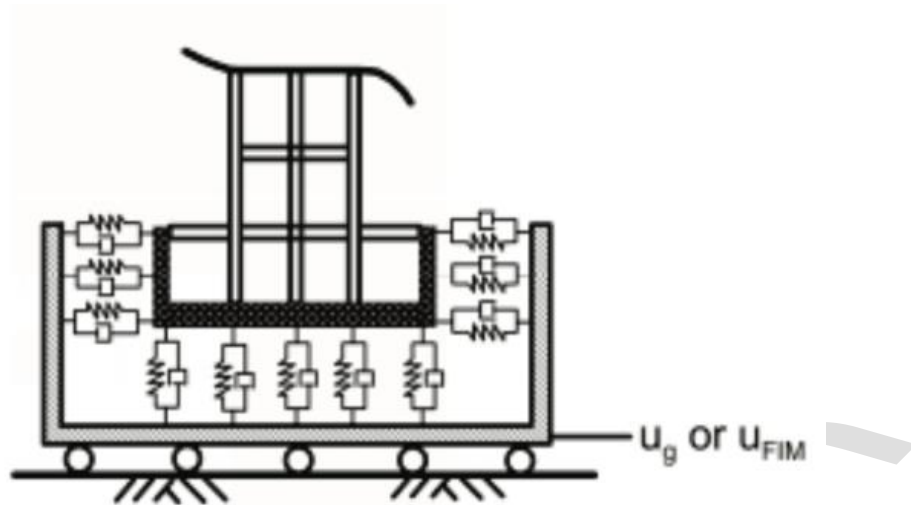
274

Figura 11

275 El principal beneficio de usar el modelo 3A es que parte del corte se va a ir a los resortes laterales en vez de  
 276 llegar a la base y esto baja la demanda sobre fundaciones. El modelo 3B es parecido al que se definió en 2)  
 277 pero es más adecuado para evitar una flexibilización artificial del sistema. En cualquier caso, en que se usen  
 278 resortes, se le debería pedir al especialista en suelos valores límites de las constantes de balasto (lower y upper  
 279 bound) y hacer análisis de sensibilidad / envolvente. Sin embargo, se debe justificar adecuadamente el modelo  
 280 del resorte ya que no toma tracciones, debe tener una rigidez realista y debe considerar la resistencia pasiva.  
 281 Al ejecutarse construcciones alledañas el suelo desaparece por lo que el modelo no representa la condición  
 282 realista del problema. Además, hay que estimar el efecto real del suelo cuando tras los muros se ejecuta un  
 283 relleno y no es el suelo natural el que interactúa con la estructura. Y Hay que tener cuidado en cómo se considera  
 284 la cinemática real del problema sobre todo cuando existen muchos subterráneos.

285 Adicionalmente, se requiere conocer las características del suelo que permitan modelar los resortes equivalentes  
 286 y se debe tener un registro para la demanda. Se debe definir qué tipo de registro se debe utilizar.

287 Enfoque 4: Este caso es similar al Modelo 3 pero se incorporan las capacidades disipativas del suelo. Se debe  
 288 solicitar que la mecánica de suelos entregue la constitutiva del suelo que incorpore disipación. Además, se debe  
 289 definir qué tipo de registro se debe usar y establecer si el modelo representa todo el suelo circundante.



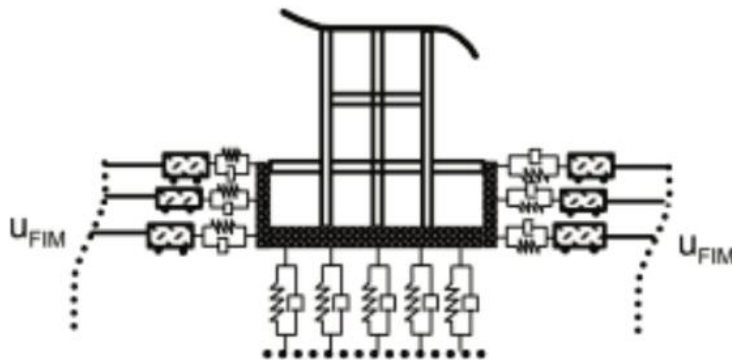
(4)

290

291

Figura 12.

292 Enfoque 5: Este es un enfoque de modelado integral en el que se utilizan varios puntos de amortiguación para  
 293 abordar la variación del amortiguamiento del suelo, se considera la rotación de las fundaciones y se aplica  
 294 excitación de múltiples soportes a través de los resortes horizontales para que las entradas varíen en la altura  
 295 de las paredes del subterráneo. Este modelo no se utiliza actualmente en la práctica.



Full substructure model

296

297

Figura 13.

298 Siguiendo una perspectiva práctica, FEMA (2020), recomienda la selección del tipo de modelo, respecto del tipo  
 299 de estructuración. Así, si eliminamos el caso 1 en la Figura 4c, correspondiente al caso sin efecto del  
 300 subterráneo, recomienda el modelo 2, para edificaciones compuestas por una superestructura de marcos, el  
 301 cual entregaría resultados ligeramente conservadores respecto del FSM. Por su parte, para edificaciones con  
 302 superestructuras compuestas por muros, el modelo 4 entrega resultados más consistentes con el FSM.  
 303 Finalmente, el modelo 3, es el que presentaría las mayores diferencias respecto del FSM.



## 304 **4. Consideraciones de amplificación por efectos locales**

305 El paso de las ondas por un medio continuo, suelo o roca, produce la variación en la respuesta sísmica superficial  
306 respecto de la señal generada desde el basamento rocoso ante un evento sísmico. El aumento en la demanda  
307 sísmica en superficie es considerado un efecto de amplificación sísmica, el cual depende de diferentes factores  
308 relacionados con aspectos geomorfológicos del terreno, como son: las condiciones estratigráficas, rigidez del  
309 terreno y su variación en profundidad, geometría del basamento rocoso, topografía del terreno, comportamiento  
310 de suelos considerandos como especiales como licuables, colapsables y sensitivos, entre otros.

311 La clasificación sísmica de terreno permite considerar aspectos asociados con la amplificación dinámica, ya que  
312 tiene como objetivo principal el poder definir la acción sísmica ya sea mediante un coeficiente sísmico, o  
313 mediante la asignación de espectros de diseño (o criterios para su confección), de acuerdo con la respuesta del  
314 terreno de fundación frente a la acción de ondas de corte generadas desde el basamento rocoso hasta la  
315 superficie del terreno. Así, los criterios de clasificación sísmica contenidos en el presente documento permiten  
316 definir la sollicitación sísmica correspondiente para terrenos con topografía y estratigrafía horizontal, y para  
317 estructuras localizadas fuera de zonas donde se puedan generar o existir fenómenos de amplificación local. Por  
318 lo que cualquier situación fuera de los criterios anteriores, se define como un caso especial, bajo los cuales se  
319 requiere de un estudio de respuesta de sitio, que deberá incluir un modelo unidimensional o bidimensional, con  
320 una adecuada caracterización del terreno, lo que incluye propiedades dinámicas y la localización del basamento  
321 rocoso, para evaluar la respuesta sísmica en campo libre, y con ello definir espectros de respuesta para el  
322 diseño.

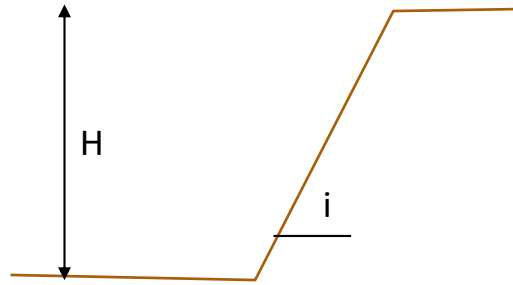
323 Los criterios que a continuación se señalan, buscan suministrar lineamientos mínimos a partir de los cuales es  
324 necesario la realización del estudio especial o análisis de respuesta sitio:

### 325 **4.1. Efectos topográficos**

326 La mayoría de los códigos de diseño a nivel internacional, salvo excepciones como el código francés (APS,  
327 1995), Eurocódigo (CEN, 2004), el código italiano (CS.LL.PP., 2018), los cuales comparten el mismo criterio,  
328 no definen criterios para la identificación de terrenos que puedan sufrir efectos topográficos, quedando a criterio  
329 del ingeniero su identificación, así como su proceder antes estos casos. Es importante acotar que, en parte, se  
330 puede deber a que definir factores de amplificación topográfica para efectos de diseño sísmico es complejo, ya  
331 que los efectos topográficos son dependientes de la frecuencia, y sólo la interacción del sistema basamento-  
332 rocoso-suelo-fundación-y-estructura, permite definir la magnitud de la amplificación en cada caso y para cada  
333 rango de frecuencia.

334 Basado en el estado del arte, se recomienda usar el siguiente criterio como mínima indicación a partir de la cual  
335 los análisis de efectos topográficos deben ser considerados:

- 336 • Pendientes del terreno,  $i$ , con ángulos inferiores a  $15^\circ$  ( $\sim 27\%$ )
- 337 • Bajo condición de topografía idealizada,  $H < 30$  m



338

339

Figura 14.

340

## 4.2. Suelos licuables

341

Se considera que un terreno arenoso o limoso puede ser susceptible de desarrollar el fenómeno de licuefacción si  $(N1)_{60-cs} < 30$  golpes/pie, o  $qc_{1N-cs} < 17$  MPa. En estos casos se debe realizar un estudio de potencial de licuefacción para confirmar, o descartar, la posibilidad real de licuefacción. En caso de ser confirmada la licuefacción, se deberá determinar la máxima deformación postsismo esperada, y se deberá definir el proyecto de mejoramiento del terreno, indicado el programa de ensayos de verificación final en toda el área del proyecto, que permitan descartar el potencial de licuefacción de acuerdo con el criterio anteriormente expuesto, validando la clasificación sísmica según los correspondientes criterios. La profundidad que se requiere explorar queda definida por los criterios de clasificación sísmica.

349

De igualmente, dependiendo del espesor y localización del estrato licuable, se podrá hacer una valoración del efecto sitio, con el fin de definir los espectros de diseños correspondientes, siguiendo los lineamientos definidos para ello.

350

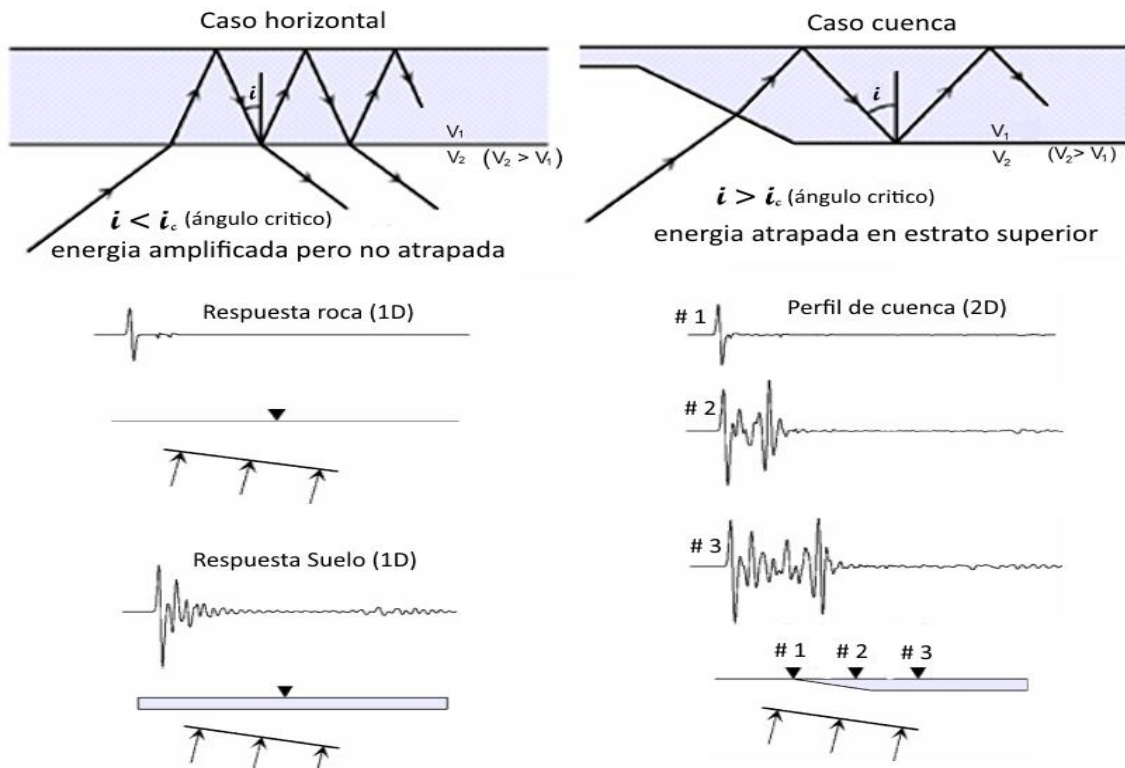
351

### 4.3. Efectos de la geometría de basamento rocoso

353 Una sollicitación sísmica produce un grupo de ondas que se propagan a través de todo el dominio en todas las  
354 direcciones. Para un análisis simplificado bidimensional, como el presentado en la Fig. 1a, la propagación de  
355 una onda hacia una capa horizontal puede producir resonancia en ella, pero la energía no necesariamente queda  
356 atrapada debido a la refracción y reflexión que allí ocurren. Sin embargo, si una onda se propaga a través de  
357 estratos horizontales o desde un basamento rocoso no horizontal, la energía puede quedar atrapada para  
358 ángulos de incidencia mayores al ángulo crítico, generando una reflexión interna total en el estrato de suelo  
359 como se muestra de forma esquemática en la Fig. 1b. Este fenómeno, conocido como efecto cuenca (basin  
360 effect), en depósitos sedimentarios profundos pueden afectar significativamente la amplitud, frecuencia y  
361 duración del movimiento del suelo, mientras que la geometría de los bordes de la cuenca da lugar a ondas  
362 superficiales de gran amplitud producto de la difracción de ondas sísmicas, modificando la respuesta respecto  
363 de lo que se presenta en la configuración horizontal generalmente idealizada por fines prácticos.

364 La evaluación de la propagación de las ondas sísmicas considerando el efecto cuenca, requiere entre otras  
365 variables, de la identificación de la geometría y localización del basamento rocoso, por lo que generalmente es  
366 un análisis que se dificulta realizar debido a la complejidad que representa obtener dicha información en la  
367 práctica regular. Así mismo, debido a la dificultad para identificar la componente de amplificación exclusivamente  
368 asociada por efecto el efecto cuenca, no existen criterios normativos que permitan definir bajo cuales  
369 condiciones se deben incorporar factores de amplificación que consideren dicho efecto en los espectros de  
370 diseño y/o en la clasificación sísmica del terreno.

371 La influencia del efecto cuenca sobre la propagación de ondas sísmicas es mostrado en diferentes estudios a  
372 través de observaciones empíricas (Kagawa et al. 1992, Kinoshita et al. 1992, Phillips et al. 1993, Frankel 1994,  
373 Chávez-García & Bard 1994, Hatayama et al. 1995, Field 1996, Bindi et al. 2009; Bennefoy-Claudet et. al, 2009;  
374 Gaarinni et al. 2019), e igualmente mediante estudios numéricos (Hisada et al. 1993, Moczo et al. 1999, Frankel  
375 et al. 2001, Hartzell et al. 2006, Pilz et al. 2011, Abraham et al. 2016; Marafi et al. 2020, García-Pérez et al.  
376 2021).



377

378 Figura 15. Esquema de propagación de onda desde el basamento rocoso hasta la superficie del terreno  
 379 (Adaptado de Stewart et al. 2005)

380 Si se cuenta con información regional o de microzonificación, en las cuales se evidencie la geometría del  
 381 basamento rocoso, la cual tenga una configuración con geometría irregular que produzca efectos de ampliación  
 382 local o en el cual se evidencie depósitos sedimentarios de gran profundidad, se deberá realizar un análisis de  
 383 respuesta local, que permita la definición o ratificación de los espectros de diseño correspondientes, tomando  
 384 como base la clasificación sísmica de acuerdo con los lineamientos anteriormente definidos. Para ello, se  
 385 recomienda la construcción de un modelo numérico, de elementos o diferencias finitos, siguiendo por ejemplo  
 386 los lineamientos presentados por Stewart et al. 2005 (Empirical Characterization of Site Conditions on Strong  
 387 Ground Motion), mediante el cual se determinen espectros de respuesta en superficie considerando la  
 388 configuración del depósito de suelo junto con las características del basamento rocoso y su geometría regional.