



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LOS PRINCIPALES
FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INTERACCIÓN
DINÁMICA SUELO-CIMENTACIÓN-ESTRUCTURA PARA EL
CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. MARCO ANTONIO REYES MONROY

DIRECTOR DE TESINA: **DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL**

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2015



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	3
Objetivos y metas.....	4
Antecedentes.....	4
1.- Fenómeno de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura.....	5
2.- Determinación del amortiguamiento efectivo en estructuras con cimentaciones superficiales.....	6
2.1 Caracterización del sistema suelo estructura.....	7
2.2 Determinación del periodo y amortiguamiento efectivos del sistema suelo estructura.....	10
2.3 Funciones de impedancia.....	12
2.4 Rigideces estáticas.....	14
2.5 Coeficientes de rigidez y amortiguamiento.....	15
3.- Factores que influyen en la interacción dinámica.....	16
4.- Efecto de los factores que participan en la interacción dinámica y su efecto en la respuesta estructural.....	16
4.1 Definición del problema.....	16
4.2 Caracterización del sistema suelo estructura.....	19
4.2.1 Estructura.....	19
4.2.2 Suelo.....	20
4.3 Determinación de los parámetros del sistema equivalente.....	21
4.4 Justificación de la aplicación de método de interacción suelo estructura.....	22
4.5 Determinación de las frecuencias equivalentes.....	22
4.6 Determinación de las rigideces estáticas.....	22
4.7 Determinación del periodo efectivo del sistema.....	23
4.7.1 Frecuencia fundamental del sistema.....	23
4.7.2 Parámetros de frecuencia.....	23
4.7.3 Cálculo de los coeficientes de amortiguamiento.....	24
4.7.4 Cálculo de la rigidez lateral y amortiguamiento de la cimentación en modo traslación.....	24
4.7.5 Cálculo de la rigidez de rotación y amortiguamiento de la cimentación en modo rotacional.....	25
4.7.6 Determinación del periodo efectivo del sistema.....	25
4.8 El método iterativo.....	26
4.8.1 Primera iteración.....	27
4.8.2 Segunda iteración.....	27
4.8.3 Tercera iteración.....	28
4.9 Determinación del amortiguamiento efectivo del sistema.....	28
5.- Análisis paramétrico de los factores que participan en la interacción dinámica.....	29



5.1 Gráficas Parámetro / Amortiguamiento efectivo ?°.....	29
5.1.1 Variación del parámetro profundidad de desplante ?	29
5.1.2 Variación del parámetro de altura de la estructura ? γ	31
5.1.3 Variación del parámetro de velocidad de ondas cortantes ? γ	32
5.1.4 Variación del parámetro de coeficiente de Poisson ?.....	33
5.1.5 Variación del parámetro de peso volumétrico del suelo ?.....	35
5.1.6 Variación del parámetro de relación largo y ancho de la planta de cimentación.....	36
5.1.7 Variación del parámetro de amortiguamiento del suelo ? γ	37
5.1.8 Variación del parámetro de amortiguamiento de la estructura ? γ	38
5.1.9 Variación del parámetro de espesor del estrato compresible ? γ	39
5.1.10 Variación del parámetro de periodo fundamental de vibración de la estructura ? γ	41
5.1.11 Variación del parámetro de peso de la estructura ? γ	42
5.2 Cambio en el amortiguamiento estructural por interacción dinámica.....	43
5.2.1 Variación del parámetro de altura efectiva ? γ	44
5.2.2 Variación del parámetro de velocidad de ondas cortantes ? γ	45
5.3 Variación de parámetros estructurales en conjunto.....	46
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFIA.....	50



Introducción

En el análisis de las estructuras ante movimientos sísmicos, se deben considerar ciertos fenómenos que se presentan cuando se toma en cuenta la flexibilidad del suelo, pues ellos son de gran importancia para la correcta modelación matemática del problema.

Particularmente, el movimiento de la superficie depende en gran medida de los efectos de sitio, el contraste de rigidez entre el suelo y la estructura, y en general, la interrelación entre las características del sistema y de la excitación sísmica, y la consideración de los fenómenos puede ser favorable o desfavorable, para el correcto diseño de las estructuras.

Para el caso del contraste de rigideces entre el suelo y la cimentación, influye en la alteración de la inercia y la flexibilidad del conjunto, y las consideraciones de ello modifican la respuesta esperada del sistema.

La respuesta de la estructura dependerá entonces de parámetros tales como el periodo natural de vibración, y el amortiguamiento asociado a la estructura, los cuales determinarán su comportamiento ante grandes deformaciones, lo cual hace importante la definición de las propiedades dinámicas de una edificación.

La determinación del periodo fundamental de vibración y de los amortiguamientos efectivos del sistema, cuando se presenta interacción suelo-estructura, se hace mediante las expresiones propuestas en la normatividad, y esto se calcula mediante las funciones de impedancia del suelo, las cuales consideran rigideces y amortiguamientos del conjunto suelo-cimentación.

Estas funciones de impedancia o rigideces dinámicas de la cimentación definen la relación existente entre la fuerza excitadora y el desplazamiento resultante en la dirección de la fuerza, para el sistema equivalente considerado con cimentación rígida.

Por ello, el conducir un análisis paramétrico para conocer la influencia de los factores que definen la respuesta de un sistema en la respuesta estructural, y definir las características del sistema que más influyen en la alteración de la respuesta sísmica del conjunto, es importante, por lo que las funciones de transferencia son utilizadas para evaluar las variaciones del período y del amortiguamiento de edificios que consideren la interacción suelo estructura, respecto a los que presentaría la misma estructura sin considerar ISE.



OBJETIVOS Y METAS

El objetivo principal de este proyecto es estudiar la influencia que tienen los principales factores que intervienen en el análisis de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura en la respuesta del sistema.

Las metas específicas planteadas en esta investigación son las siguientes:

1. Estudio del análisis de interacción dinámica para cimentaciones superficiales.
2. Identificar los parámetros geométricos y materiales que participan en la respuesta de sistema suelo-cimentación-estructura.
3. Realizar un análisis paramétrico de los principales factores que intervienen en la interacción dinámica.
4. Construir curvas de amortiguamiento efectivo en función de los principales factores que intervienen en el análisis de interacción dinámica.
5. Analizar los efectos de los diferentes factores estudiados y definir los que predominan en la respuesta dinámica.
6. Conclusiones.

ANTECEDENTES

Es sabido que la interacción dinámica suelo-estructura es particularmente importante en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en suelos blandos. Esta condición produce un incremento en la flexibilidad del sistema, induciendo cambios en las propiedades dinámicas de la estructura y en su respuesta.

La respuesta dinámica de un sistema suelo-cimentación-estructura depende fuertemente de las propiedades geométricas y materiales de la cimentación, definidas por su tipo. Particularmente se ha puesto especial interés en el estudio de la interacción dinámica en cimentaciones de tipo superficial. El estudio del comportamiento de un elemento enterrado someramente en un depósito se ha hecho extensivo al análisis del comportamiento dinámico de estructuras apoyadas en zapatas, losas o cajones de cimentación.



Adicionalmente en la respuesta dinámica de un sistema suelo-cimentación-estructura influye fuertemente el espesor del depósito y sus propiedades dinámicas, en especial el contraste de rigidez entre el suelo y la estructura de cimentación.

Con base en lo anterior, se busca identificar los factores que más efecto tienen en la respuesta de estructuras al considerar la interacción con el suelo.

1.-Fenómeno de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura

La interacción suelo estructura se refiere al conjunto de efectos inerciales y cinemáticos producidos entre el suelo y una estructura, a través de la cimentación; lo cual se produce debido a la flexibilidad del suelo, durante la ocurrencia de fenómenos sísmicos.

Esta interacción modifica los parámetros dinámicos de la estructura y también las características del movimiento del terreno.

Al producirse la sollicitación dinámica y originarse el efecto de interacción dinámico; diversos fenómenos se presentan, como el alargamiento del período fundamental de vibración, el incremento o reducción del amortiguamiento, entre otros, los cuales son producidos por la interacción inercial debido fundamentalmente a la inercia y elasticidad del sistema acoplado.

La interacción cinemática también reduce la traslación de la cimentación e induce cabeceo y torsión en la estructura por lo tanto, los parámetros dinámicos de la estructura y la respuesta del sitio, son alterados.

Por otro lado, el amortiguamiento del sistema suelo estructura se incrementa debido a la disipación adicional de la energía. Sin embargo, como la interacción causa una pérdida del amortiguamiento estructural, es posible que se presente una reducción del amortiguamiento del sistema cuando la disipación adicional de energía no compensa tal pérdida.

El periodo fundamental del sistema aumenta debido a que el conjunto presenta mayor flexibilidad que la de la estructura desplantada sobre suelo indeformable.

En éste análisis, se considerarán las modificaciones por amortiguamiento, el cual dará lugar a respuestas estructurales variables, dependiendo de los niveles de amortiguamiento.



2.- Determinación del amortiguamiento efectivo en estructuras con cimentaciones superficiales.

Para llevar a cabo el análisis de interacción suelo estructura, las características del suelo y la estructura, son asociadas a un modelo cuya respuesta será equivalente. Con el método propuesto, se realizan simplificaciones y consideraciones que permiten la modelación matemática del sistema.

En las ecuaciones propuestas, se ha supuesto un modelo a cuya cimentación no se le consideran los efectos de flexibilidad, y donde los efectos de la interacción inercial se incorporan en la determinación de las fuerzas sísmicas y los desplazamientos de diseño de la estructura.

Estos efectos modifican la respuesta del sistema y consisten en el alargamiento del periodo fundamental de vibración, la modificación del amortiguamiento asociado y la reducción de la ductilidad de la estructura, suponiendo el apoyo de la estructura en una base rígida.

La aplicación de éste análisis reduce las magnitudes de las fuerzas laterales, el cortante basal y los momentos de volteo, los cuales se calculan para una estructura supuesta con base indeformable, a la vez que se incrementan los desplazamientos laterales.

Es justificable el considerar los efectos ISE, si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{T_1}{T_2} * \frac{T_2}{T_3} < 2.5 \quad (1)$$

Donde

T_1 .- Periodo fundamental de la estructura supuesta con base rígida (s)

T_2 .- Periodo dominante del sitio (s)

T_3 .- Espesor de la estratigrafía (m)

H .- Altura efectiva de la estructura (m)

Los efectos de la interacción cinemática son considerados cuando el amortiguamiento efectivo calculado es mayor que el amortiguamiento estructural original, es decir, cuando se cumple que

$$\gamma_e \geq \gamma_s$$

Por otro lado, por la importancia de estar del lado de la seguridad, se considera pertinente el limitar las reducciones por interacción estableciendo la condición de que estas reducciones no pueden ser más bajas que el 75%.

2.1 Caracterización del sistema suelo estructura

Para aplicar el análisis de ISE, el sistema puede idealizarse como una estructura de n grados de libertad en traslación horizontal, apoyada sobre una cimentación superficial, circular e infinitamente rígida con dos grados de libertad; uno en modo de traslación horizontal y otro en modo cabeceo, donde la cimentación se desplanta en un depósito de suelo con base indeformable y estratificada con m estratos. En éste sentido, los grados de libertad correspondientes a la torsión y traslación vertical de la cimentación, se desprecian.

El momento de inercia de la masa de la cimentación se toma con respecto al eje de rotación de la base misma.

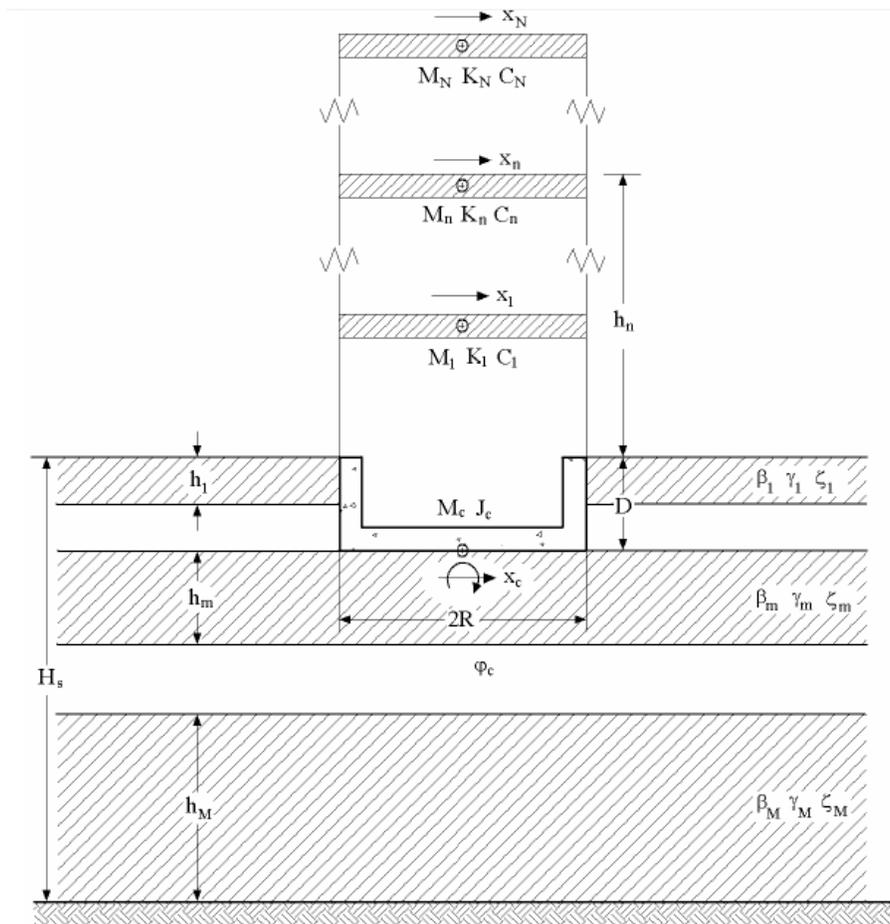


Figura 1. Sistema suelo estructura idealizado.¹

Si la respuesta de la estructura puede considerarse equivalente a la de un oscilador de un grado de libertad supuesto con base rígida, a la vez que el suelo estratificado se puede idealizar como un manto homogéneo, el sistema suelo estructura puede concebirse como la figura (2), donde el suelo y

la estructura, son representados en un sistema equivalente cuya respuesta es similar cuando son sujetos a la misma sollicitación sísmica.

En éste sistema equivalente, la estructura es definida por su periodo fundamental, su masa y altura efectiva, mientras que el suelo es definido por su periodo determinante y la velocidad de propagación de ondas sísmicas.

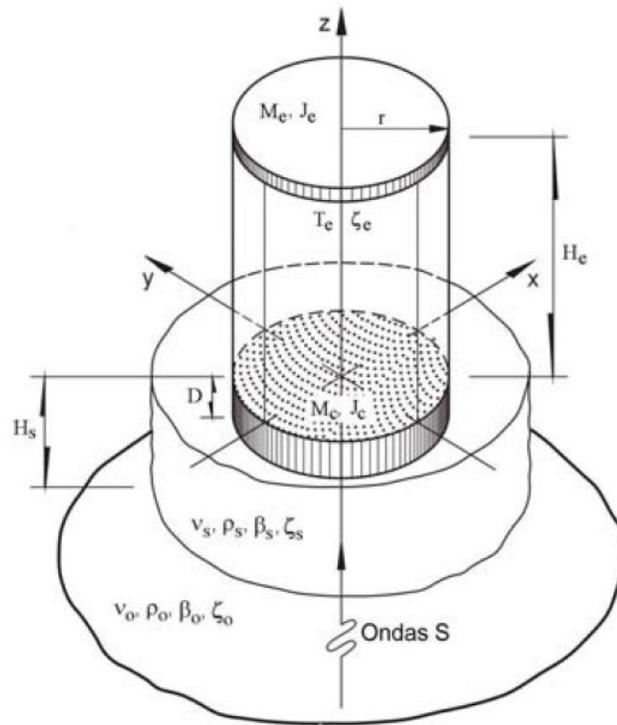


Figura 2. Sistema equivalente.²

Para el modelo ISE, es posible hacer una aproximación mediante un oscilador cuyos parámetros sean equivalentes a los de la estructura, reemplazando la masa, la rigidez, el amortiguamiento y la altura del oscilador por parámetros modales equivalentes de la estructura. Por ello M_e , J_e y H_e se deben interpretar como la masa, rigidez y el amortiguamiento efectivos de la estructura supuesta con base indeformable vibrando en su modo fundamental, siendo H_e la altura efectiva del centroide de las fuerzas inerciales.

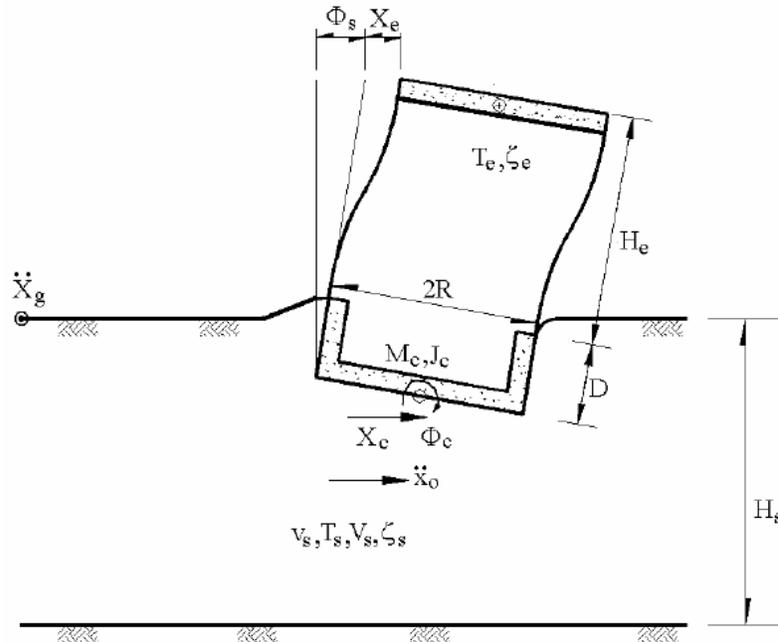


Figura 3. Oscilador equivalente.³

De acuerdo a las recomendaciones del manual de sismo de la CFE, para estructuras de más de un nivel, la altura y la masa efectivos, se toman como el 70% de la altura y masa totales respectivamente.

$$T_e = 0.7 T_s \quad (2)$$

$$M_e = 0.7 M_s \quad (3)$$

El periodo y amortiguamiento de la estructura de tres grados de libertad y vibrando en su modo fundamental, en su forma equivalente, representan el periodo y amortiguamiento efectivos, T_e y ζ_e del modo fundamental del sistema suelo estructura.

Es posible representar el suelo mediante n conjunto de resortes y amortiguadores equivalente, los cuales caracterizan su rigidez y amortiguamiento. Esto se representa en la figura siguiente:

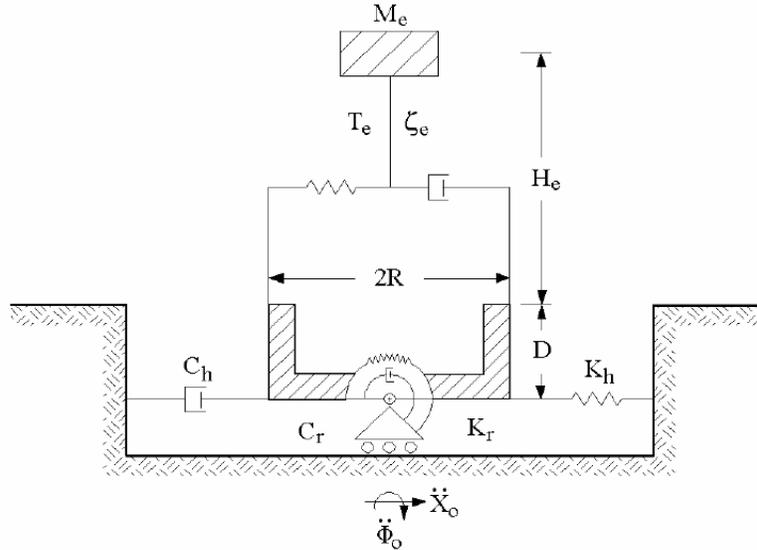


Figura 4. Conjunto de amortiguadores y resortes.⁴

El sistema equivalente tiene tres grados de libertad: la deformación en la estructura, el desplazamiento de la base de la cimentación respecto al movimiento de campo libre y la rotación de la cimentación.

2.2 Determinación del periodo y amortiguamiento efectivos del sistema suelo estructura.

De acuerdo a las recomendaciones del manual de sismo, la siguiente expresión, permite determinar el periodo efectivo de un sistema acoplado suelo - estructura (T_{ef}) despreciando la masa y el momento de inercia de la cimentación en el sistema equivalente supuesto para representar el sistema real:

$$\frac{1}{T_{ef}^2} = \frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2} + \frac{1}{T_3^2} \quad (4)$$

T_1 .- Periodo natural correspondiente a la estructura supuesta infinitamente rígida y cuya base solo puede trasladarse.

$$T_1 = \frac{T_1^*}{\sqrt{1 + \frac{I_c}{I_e}}} \quad (5)$$

T_2 .- Periodo natural correspondiente a la estructura supuesta infinitamente rígida y cuya base solo puede rotar.



$$\gamma_T = \frac{W_{ef}}{K_{xy}} * \gamma \frac{W_{ef} * (\gamma_T)^2}{\gamma_T} \quad (6)$$

Donde

γ_T .- Peso efectivo de la estructura. (???)

γ .- Altura efectiva de la estructura. (?)

γ_T .- Rigidez lateral de la cimentación definida como la fuerza horizontal necesaria para producir un desplazamiento unitario en la dirección de la fuerza. ($\frac{??}{\gamma}$)

γ .- Rigidez de rotación de la cimentación, definida como el momento necesario para producir una rotación unitaria en la dirección del momento. (?? * ?).

γ .- Aceleración gravedad. γ .?? ($\frac{\gamma}{\gamma}$)

γ .- Profundidad del desplante de la cimentación.(?)

Para una primera aproximación, el valor del periodo efectivo γ_T se calcula usando rigideces estáticas, pero al utilizar rigideces dinámicas y evaluarlas para la frecuencia fundamental γ de la estructura supuesta con base rígida, se mejora la aproximación.

Al utilizar iteraciones para resolver la ecuación anterior, se obtienen resultados aún más aproximados, iniciando los cálculos con la frecuencia fundamental γ para llegar a la frecuencia efectiva $\sim \gamma_T$.

$$\gamma_T = \frac{\gamma * \gamma}{\gamma_T} \quad (7)$$

Después de haber convergido los valores del periodo efectivo a cierto valor; se puede calcular el amortiguamiento efectivo γ_T correspondiente al modo fundamental de la estructura con base rígida; mediante la expresión siguiente. De igual forma, para el sistema equivalente, se puede despreciar la masa y el momento de inercia de la cimentación.

$$\gamma^o = \gamma_T * \frac{\gamma_T * \gamma}{\gamma_T} + \frac{\gamma_T}{\gamma_T * \gamma_T} * (\frac{\gamma_T}{\gamma_T})^2 + \frac{\gamma_T}{\gamma_T * \gamma_T} * (\frac{\gamma_T}{\gamma_T})^2 \quad (8)$$

ξ_x .- Amortiguamiento del suelo en modo traslación de la cimentación.

$$\gamma_T = \frac{\gamma * \gamma_T}{\gamma_T * \gamma_T} \quad (9)$$

ξ_r .-Amortiguamiento del suelo en modo rotación de la cimentación.

$$\xi_r = \frac{\xi_{hr} + \xi_r}{\xi_{hr} + \xi_r} \quad (10)$$

Los coeficientes de amortiguamiento ξ_{hr} y ξ_r , incluyen tanto el amortiguamiento por disipación material como el amortiguamiento por radiación geométrica, y se calculan a partir de los amortiguamientos de la cimentación ξ_{hr} y ξ_r , en traslación y rotación, respectivamente, como se explica a continuación.

2.3 Funciones de impedancia.

Los modos de vibración que influyen en la respuesta, son la traslación horizontal y la rotación de la base de la cimentación, por lo que deben definirse las impedancias lineales $\tilde{K}_?$ a partir de las fuerzas y los desplazamientos a lo largo de los ejes principales de la base así como las impedancias rotacionales, $\tilde{K}_?$ a partir de los momentos y rotaciones alrededor de los mismos ejes.

Por otro lado, las fuerzas horizontales al nivel de la base, producen desplazamientos y rotaciones, por lo que deben definirse impedancias acopladas \tilde{K}_{rh} , originadas por el enterramiento de la cimentación. Esto puede despreciarse para cimentaciones ubicadas sobre la superficie del terreno.

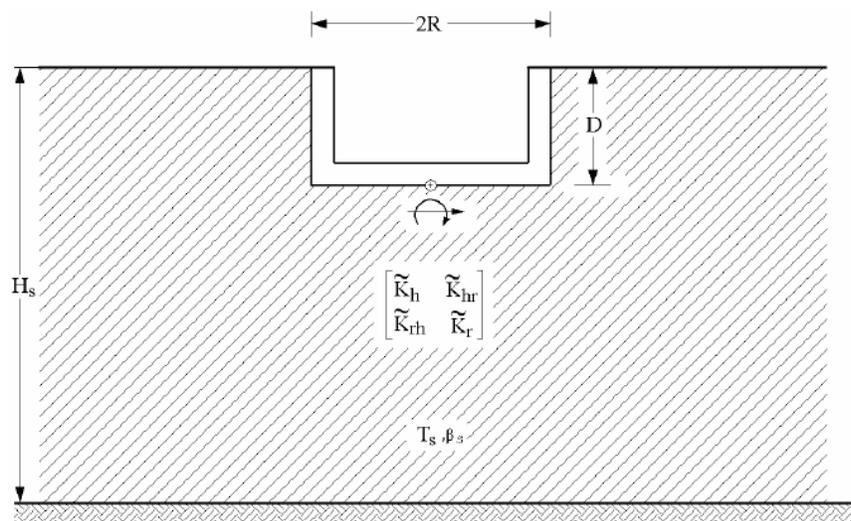


Figura 5. Sistema equivalente.⁵



Llamadas también rigideces dinámicas, se definen como la relación entre la fuerza aplicada (momento) y el desplazamiento obtenido (rotación), para una cimentación cuya masa se desprecia, rígida y excitada armónicamente.

Estas ecuaciones están en función de la frecuencia de excitación y físicamente representan los resortes y los amortiguadores equivalentes del suelo.

La rigidez lateral K_x y la rigidez de rotación K_r , así como los amortiguamientos C_x y C_r de la cimentación en sus modos de traslación y rotación equivalentes del suelo, están relacionados con los coeficientes de rigidez y amortiguamiento por medio de las ecuaciones:

$$K_x = K_x^o * (1 - \gamma_x^2 * C_x^2 * K_x^o) \tag{11}$$

$$K_r = K_r^o * (1 - \gamma_r^2 * C_r^2 * K_r^o) \tag{12}$$

$$C_x = \frac{\gamma_x^o * (C_x^o * K_x^o * \gamma_x^2)}{\gamma_x} \tag{13}$$

$$C_r = \frac{\gamma_r^o * (C_r^o * K_r^o * \gamma_r^2)}{\gamma_r} \tag{14}$$

Donde K_x^o y K_r^o son las rigideces estáticas en los modos de traslación y rotación respectivamente, C_x y C_r son los coeficientes de amortiguamiento y K_x y K_r son los coeficientes de rigidez; lo anterior en los modos de vibrar en traslación y rotación respectivamente para los subíndices x y r.

Los Coeficientes mencionados, son dependientes de las frecuencias normalizadas γ_x y γ_r .

Los resortes y amortiguadores que representan el suelo, dependen de las propiedades del subsuelo así como las características de la cimentación y de la frecuencia de excitación. Para una primera aproximación, es válido calcular dichos parámetros para la frecuencia fundamental de la estructura con base rígida.

$$\gamma_x = \frac{\omega}{\omega_x} \tag{15}$$

En estas ecuaciones, el amortiguamiento material del suelo interviene tanto en el amortiguamiento como en el resorte

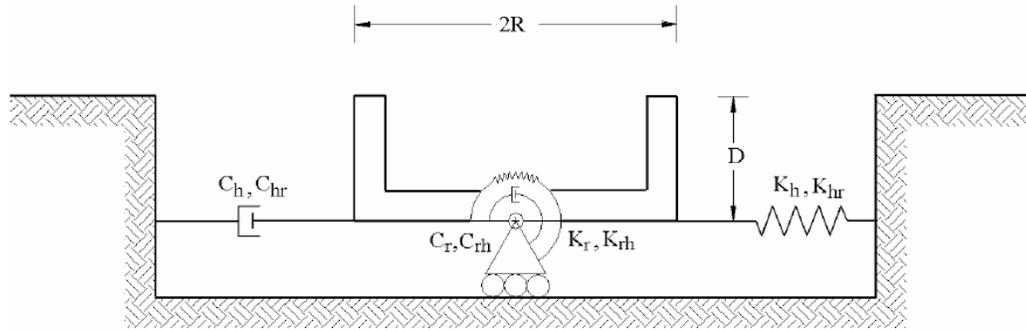


Figura 6. Sistema de resortes y amortiguadores.⁶

La parte γ de la función de impedancia, representa el resorte equivalente, que expresa tanto la rigidez como la inercia del suelo.

La parte η de la función de impedancia, representa al amortiguador equivalente que expresa el amortiguamiento material y geométrico del suelo.

2.4 Rigideces estáticas

Para el modo en traslación horizontal y rotacional con base supuesta rígida y circular, las rigideces estáticas se pueden determinar con las siguientes expresiones.

$$\gamma_{\theta}^{\circ} = \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*} * \gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*} * \gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*} * (\gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}) \quad (16)$$

$$\gamma_{\theta}^{\circ} = \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* (\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*)} * \gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*} * \gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^*} * (\gamma_{\theta}^* + \frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}) \quad (17)$$

Donde

$$\gamma_{\theta}^* = \gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^* * \gamma_{\theta}^* \quad (18)$$

γ_{θ}^* .- Módulo de rigidez efectivo del depósito del suelo. $(\frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^*})$

γ_{θ}^* .- Velocidad efectiva de propagación de ondas S $(\frac{\gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^*})$

γ_{θ}^* .- Densidad efectiva del suelo. $(\frac{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*}{\gamma_{\theta}^* \gamma_{\theta}^*})$

γ_{θ}^* .- Coeficiente de Poisson efectivo.



γ .-Profundidad del depósito de suelo (γ)

γ .- Profundidad de desplante de la cimentación(γ)

γ y γ .-Radios de las cimentaciones equivalentes circulares y se definen para el modo de traslación y rotación, válidos para sistemas en los cuales, es posible suponer que su base se desplaza como cuerpo rígido(γ)

$$\gamma = \frac{\gamma}{\gamma} \tag{19}$$

$$\gamma = \frac{\gamma * \gamma}{\gamma} \tag{20}$$

Donde

γ .- Área neta de la cimentación(γ)

γ .- Momento de inercia del área de la cimentación con respecto a su eje centroidal de rotación (γ)

2.5 Coeficientes de rigidez y amortiguamiento

Para los modos de traslación horizontal y rotación, se cimentaciones circulares con base rígida, los coeficientes de rigidez y amortiguamiento se pueden determinar mediante las siguientes expresiones.

$$\gamma = \gamma \tag{21}$$

$$\gamma = \gamma - \gamma * \gamma \tag{22}$$

$$\gamma = \frac{\gamma * \gamma * \gamma}{\gamma * \gamma} \tag{23}$$

$$\gamma = \frac{\gamma * \gamma * \gamma}{\gamma * \gamma} \tag{24}$$



Donde ω_x y ω_y representan las frecuencias fundamentales adimensionales del depósito de suelo en vibración transversal y vertical, respectivamente.

$$\omega_x = \frac{\omega_{x0}}{\omega_{x1}} \quad (25)$$

$$\omega_y = \omega_x \frac{\sqrt{I_x}}{I_y} * \frac{\omega_{y0}}{\omega_{y1}} \quad (26)$$

La frecuencia normalizada se define para traslación horizontal y rotacional mediante las siguientes ecuaciones; respectivamente:

$$\omega_x = \frac{\omega_{x0}}{\omega_{x1}} \quad (27)$$

$$\omega_y = \frac{\omega_{y0}}{\omega_{y1}} \quad (28)$$

Donde r_x , r_y son los radios de las cimentaciones circulares equivalentes a las superficies de desplante para el modo de traslación y rotación, calculadas con las ecuaciones (19) y (20).

3.-Factores que influyen en la interacción dinámica

La respuesta del sistema equivalentees definida por los parámetros del sistema real, los cuales serán asociados a un modelo cuyo comportamiento puede ser descrito matemáticamente.

A continuación,se enlistan los factores que influyen en la respuesta del sistema equivalente propios de la estructura y suelo reales.

La estructura supuesta con base rígida se define por su periodo fundamental T_1 , su peso total W así como su altura H , el amortiguamiento del modo fundamental ξ_1 . La importancia de la profundidad del desplante D de la cimentación radica en que el alargamiento del periodo y aumento de amortiguamiento de estructuras de base flexible, son función de éste parámetro.Las dimensiones de la planta de la cimentación B, L definen el momento de inercia de la cimentación I_c .



Por otra parte, el suelo se caracteriza por su peso volumétrico γ , la velocidad de propagación de ondas cortantes v_s , la cual interviene en la determinación del módulo de rigidez dinámico G .

La relación de Poisson del suelo ν , tiene valores comúnmente de $\frac{1}{3}$ para suelos granulares y .45 para suelos plásticos. La respuesta del sistema suelo estructura, depende significativamente de éste parámetro.

Los efectos de sitio son en parte, función de espesor de la estratigrafía H , el cual es considerado como un manto homogéneo.

La influencia del amortiguamiento del suelo ξ_s y de la estructura en la respuesta de sistemas suelo estructura, es determinante. Aunque el rango de variación de ambos está comprendido entre 2 y 10%, frecuentemente se utiliza un valor típico de 5%, tanto para suelo como para la estructura.

El periodo dominante del suelo T_s , se determina con la ecuación siguiente, y su determinación es necesaria para justificar la aplicación del análisis ISE, según la ecuación (1)

$$T_s = \frac{H}{v_s} \quad (29)$$

4.-Efecto de los factores que participan en la interacción dinámica y su efecto en la respuesta estructural.

Para conducir el análisis paramétrico, se determinará el periodo y amortiguamiento efectivos de una estructura interactuando con el suelo. Este análisis se reducirá al estudio en una sola dirección.

4.1 Definición del problema.

Para ejecutar el análisis de interacción suelo estructura, se estudiará un edificio tipo de 10 niveles estructurado con marcos de concreto desplantado en un depósito de suelo estratificado con profundidad a la roca basal de 56 metros. La construcción se ubicará, de acuerdo a la regionalización sísmica del país, en la zona B, y de acuerdo al uso y estructuración, será del grupo B y tipo 1.

Se considerara que el peso de cada nivel es de 1 ton/m² y que el amortiguamiento de la estructura supuesta con base rígida es de 5%, y su periodo fundamental de vibración es igual a 1.16 segundos.

La cimentación se modelará como un cajón rígido que se desplanta a una profundidad de 5m y cuya base de forma cuadrada tiene superficie de contacto de 400 m².

El suelo se modelará como un depósito estratificado horizontalmente, con espesores y velocidad de ondas cortantes, variables, de acuerdo a la figura. El peso volumétrico de los estratos se considera homogéneo de 1.5 ton/m³, y se supone un coeficiente de Poisson de .45 y un amortiguamiento del 5% como parámetros efectivos del sitio.

Se despreciarán los efectos no lineales del suelo, debido a que se consideran compatibles las propiedades mecánicas del subsuelo con lo niveles de deformación esperados durante sismos.

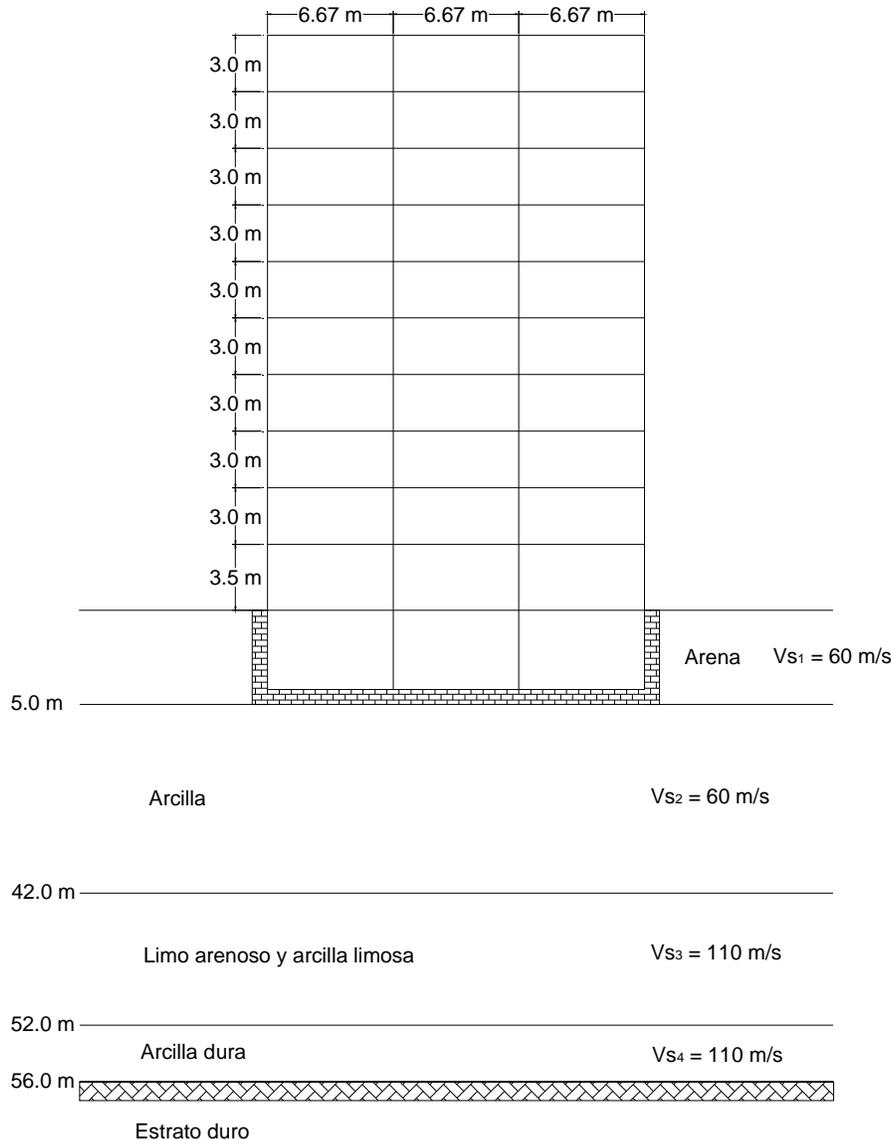


Figura 7. Sistema suelo estructura tipo a analizar paramétricamente.



4.2 Caracterización del sistema suelo estructura.

4.2.1 Estructura

Dimensiones de la planta

$$b = 20 \text{ (m)}$$

$$h = 20 \text{ (m)}$$

$$A = b * h = 20 \text{ (m)} * 20 \text{ (m)} = 400 \text{ m}^2$$

Momento de inercia de la planta.

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{20 * 20^3}{12} = 13333.333 \text{ (m}^4\text{)}$$

Peso de la estructura

$$W = 4000 \text{ (t)}$$

Altura de la estructura

$$H = 30.5 \text{ (m)}$$

Profundidad del desplante de la cimentación

$$D = 5 \text{ (m)}$$

Periodo fundamental de la estructura supuesta con base rígida.

$$T = 1.16 \text{ s}$$

Amortiguamiento del modo fundamental de la estructura

$$\gamma = 5\%$$

Planta			
Base	?	20	m
Altura	?	20	m
Área	?	400	m ²
Momento de inercia	?	13333.333	m ⁴
Estructura			
Peso	? _γ	4000	t
Altura	? _γ	30.5	m
Profundidad de desplante	?	5	m
Periodo fundamental	? _γ	1.16	s
Amortiguamiento del modo fundamental.	? _γ	5	%

Tabla 1. Parámetros del sistema suelo estructura.



4.2.2 Suelo

Espesor del estrato.

$$z = z_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Peso volumétrico del suelo.

$$\gamma = \gamma_s \left(\frac{\gamma}{\gamma_s} \right)$$

Densidad del suelo

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{\gamma_s \left(\frac{\gamma}{\gamma_s} \right)}{g} = \rho_s \left(\frac{\gamma}{\gamma_s} \right)$$

Relación de Poisson del suelo.

$$\nu = \nu_s$$

Amortiguamiento efectivo del suelo.

$$\nu = \nu_s \%$$

Velocidad efectiva de propagación de ondas cortantes S

Para su determinación, se aplicará la técnica aproximada basada en el promedio de lentitudes de la formación estratificada del suelo.

Profundidad (m)	γ (kN/m³)	z (m)	z / z₀
1	5	60	0.08333
2	37	60	0.61667
3	10	110	0.09091
4	4	110	0.03636
γ̄ (kN/m³)	56	z̄ / z₀	0.82727

Tabla 2. Determinación del periodo dominante de vibración.

$$T = \frac{z}{S} = \frac{z \left(\frac{z}{z_0} \right)}{S \left(\frac{z}{z_0} \right)} = T_s \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Módulo de rigidez dinámico

$$G = \gamma_s \left(\frac{G}{\gamma_s} \right) = \gamma_s \left(\frac{G}{\gamma_s} \right) \left(\frac{z}{z_0} \right) = \gamma_s \left(\frac{G}{\gamma_s} \right) \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Periodo dominante del sitio



De acuerdo a la ecuación (29) el periodo dominante del suelo, será:

$$T_s = \frac{H \cdot \mu}{V_s} = \frac{H \cdot \mu \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)}{\left(\frac{1}{V_s}\right)} = H \cdot \mu \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)$$

Suelo			
Espesor estrato	H	56	m
Relación de Poisson	μ	0.45	
Peso volumétrico	γ	1.5	t/m ³
Módulo de rigidez	E	701.016	t/m ²
Amortiguamiento efectivo	μ	5	%
Velocidad de ondas S	V_s	67.71	m/s
Periodo dominante del sitio	T_s	3.31	s

Tabla 3. Parámetros característicos del suelo en cuestión.

4.3 Determinación de los parámetros del sistema equivalente.

Altura efectiva de la estructura

$$H_e = H \cdot \mu = H \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right) = H \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)$$

Peso efectivo de la estructura

$$W_e = W \cdot \mu = W \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right) = W \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)$$

Radio de las cimentaciones equivalentes circulares, se definen para el modo de traslación y rotación.

$$r_t = \sqrt{\frac{W_e}{\gamma}} = \sqrt{\frac{W_e \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)}{\gamma}} = \sqrt{\frac{W_e \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)}{\gamma}}$$

$$r_r = \sqrt{\frac{W_e \cdot \mu}{E}} = \sqrt{\frac{W_e \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right) \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)}{E}} = \sqrt{\frac{W_e \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right) \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right)}{E}}$$

Sistema equivalente			
Peso efectivo	W_e	2800	t
Altura efectiva	H_e	21.35	m
Radio cimentación en traslación	r_t	11.284	m
Radio cimentación en rotación	r_r	11.415	m

Tabla 4. Parámetros característicos del sistema equivalente.



4.4 Justificación de la aplicación de método de interacción suelo estructura.

De acuerdo a la ecuación (1),

$$\frac{f_{s,v}}{f_{s,h}} * \frac{f_{s,v}}{f_{s,h}} = \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } * \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } = .??? < 2.5$$

Por lo tanto, se determina como justificable el considerar los efectos ISE.

4.5 Determinación de las frecuencias equivalentes.

Frecuencia fundamental adimensional del suelo en vibración vertical.

$$f_{s,v} = ? * \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } * \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } = ? * \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } * \frac{f_{s,v}(?)}{f_{s,h}(?) } = .????$$

Frecuencia fundamental adimensional del suelo en vibración de transversal

$$f_{s,h} = \frac{f_{s,h}(?)}{f_{s,v}(?) } = \frac{f_{s,h}(?)}{f_{s,v}(?) } = .???$$

Frecuencias fundamentales		
En vibración horizontal	$f_{s,h}$	0.317
En vibración vertical	$f_{s,v}$	1.062

Tabla 5. Frecuencias fundamentales del suelo.

4.6 Determinación de las rigideces estáticas.

Rigidez estática en modo de vibración horizontal

$$k_{s,h} = \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ???$$

$$= \frac{k_{s,h}(?) * ???}{f_{s,h}(?) } * ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ???$$

$$* ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ??? + \frac{k_{s,h}(?)}{f_{s,h}(?) } * ??? = ????? * \left(\frac{???}{?}\right)$$



Rigidez estática en modo de vibración cabeceo.

$$\begin{aligned}
 \gamma_2^\circ &= \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_2)} * \gamma_2 + \frac{\gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2} * \gamma_2 + \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2} * \gamma_2 + \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2} * \gamma_2 \\
 &= \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 (\gamma_2 - \gamma_2)} * \gamma_2 + \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2} * \gamma_2 + \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2} * \gamma_2 \\
 &* \gamma_2 + \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2} = \gamma_2 * \gamma_2
 \end{aligned}$$

Rigideces Estáticas		
Modo traslación	γ_2°	64712.387
Modo cabeceo	γ_2°	10427295.99

Tabla 6. Rigideces estáticas del suelo.

4.7 Determinación del periodo efectivo del sistema.

4.7.1 Frecuencia fundamental del sistema.

Se determina la frecuencia fundamental de la estructura con base rígida, mediante la ecuación (7)

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2} = \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2} = \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2$$

Para determinar el periodo y amortiguamiento efectivo γ_2 y γ_2° del modo fundamental de la estructura con base flexible, se utilizarán las rigideces dinámicas aproximadas.

4.7.2 Parámetros de frecuencia.

Se obtienen los parámetros de frecuencia γ_2 y γ_2° de acuerdo a la ecuación (27) y (28), para los modos traslación y rotación respectivamente:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2} = \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2} = \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2$$

$$\gamma_2^\circ = \frac{\gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2} = \frac{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2}{\gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2} = \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2$$



4.7.3 Cálculo de los coeficientes de amortiguamiento.

De acuerdo a la ecuación (23), es necesario calcular la relación

$$\gamma_{22} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{.000}{.000} = 0.0000 > 1$$

Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (23), el coeficiente de amortiguamiento en modo de vibración horizontal resulta:

$$\gamma_2 = .000$$

De acuerdo a la ecuación (24), es necesario calcular la relación

$$\gamma_{33} = \frac{\gamma_3}{\gamma_2} = \frac{.000}{0.000} = .00 < 1$$

Por lo tanto, según la ecuación (24), el coeficiente de amortiguamiento en modo de vibración cabeceo resulta:

$$\gamma_3 = \frac{.0 * \gamma_2 * \gamma_{33}}{\gamma - (\gamma - \gamma * \gamma_2) * \gamma_{33}^2} = \frac{.0 * 0.00 * .00}{\gamma - (\gamma - \gamma * 0.00) * .00^2} = .000$$

4.7.4 Cálculo de la rigidez lateral y amortiguamiento de la cimentación en modo traslación.

Es necesario determinar el coeficiente de rigidez en modo de vibración horizontal.

$$\gamma_4 = ?$$

Se obtiene la rigidez lateral de la cimentación definida como la fuerza horizontal necesaria para producir un desplazamiento unitario en la dirección de la fuerza.

$$\begin{aligned} \gamma_4 &= \gamma_4^o * (\gamma_4 - \gamma * \gamma_2 * \gamma_2 * \gamma_2) = 0.0000 * \frac{0.00}{\gamma} * (\gamma - \gamma * 0.00 * .000 * .000) \\ &= 0.0000 * \frac{0.00}{\gamma} \end{aligned}$$

El amortiguamiento de la cimentación en traslación se calcula mediante la expresión (13)



$$\begin{aligned}
 \gamma_2 &= \frac{\gamma * \gamma}{\gamma \gamma} * \gamma \frac{\gamma \gamma * (\gamma \gamma + \gamma)^2}{\gamma \gamma} = \frac{\gamma * \gamma}{\gamma \gamma \gamma \gamma (\frac{\gamma}{\gamma \gamma})} * \gamma \frac{\gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma \gamma \gamma) * (\gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma) + \gamma (\gamma \gamma))^2}{\gamma \gamma \gamma \gamma \gamma \gamma \gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma * \gamma \gamma \gamma)} \\
 &= .\gamma \gamma \gamma (\gamma)
 \end{aligned}$$

Finalmente, el periodo efectivo del sistema acoplado suelo – estructura es definido por la ecuación (44)

$$\gamma_2 = \sqrt{\gamma \gamma \gamma^2 + \gamma \gamma^2 + \gamma \gamma^2} = \sqrt{\gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma)^2 + \gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma)^2 + \gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma)^2} = \gamma \gamma \gamma \gamma (\gamma)$$

4.8 El método iterativo.

Para mejorar la primera aproximación, el valor del periodo efectivo γ_2 , se utilizará el método iterativo, con lo que se obtienen resultados aún más precisos, iniciando los cálculos subsecuentes con la última frecuencia fundamental γ_2 obtenida para llegar a la frecuencia efectiva $\sim \gamma_2$.

Los parámetros que permanecerán constantes durante el proceso, serán los siguientes:

Planta			
Base	?	20	m
Altura	?	20	m
Área	?	400	m ²
Momento de inercia	?	13333.333	m ⁴
Estructura			
Peso	$\gamma \gamma$	4000	t
Altura	$\gamma \gamma$	30.5	m
Profundidad de desplante	?	5	m
Periodo fundamental	$\gamma \gamma$	1.16	s
Amortiguamiento del modo fundamental.	$\gamma \gamma$	5	%
Suelo			
Espesor estrato	$\gamma \gamma$	56	m
Velocidad de ondas de corte	$\gamma \gamma$	67.71	m/s
Peso volumétrico	?	1.5	t/m ³
Relación de Poisson	?	0.45	
Amortiguamiento efectivo	$\gamma \gamma$	5	%
Módulo de rigidez	?	701.016	t/m ²



Periodo natural del sitio	τ_2	3.31	s
Sistema equivalente			
Peso efectivo	τ_2	2800	t
Altura efectiva	τ_2	21.35	m
Radio cimentación en traslación	τ_2	11.284	m
Radio cimentación en rotación	τ_2	11.415	m
Frecuencias fundamentales			
En vibración horizontal	τ_2	0.317	
En vibración vertical	τ_2	1.062	
Rigideces Estáticas			
Modo traslación	τ_2°	64712.386	
Modo cabeceo	τ_2°	10427295.99	

Tabla 7. Parámetros invariables en el proceso iterativo.

4.8.1 Primera iteración.

En la primera iteración, se toma como frecuencia efectiva, la correspondiente al periodo efectivo que se obtuvo en el primer cálculo, y de manera similar, se resuelven las ecuaciones para obtener el valor de los parámetros que se muestran en la tabla.

$\tau_2 \left(\frac{\tau_2}{\tau_2} \right)$	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2	τ_2
4.011	0.668	0.676	2.112	0.58	62221.042	7825.212	0.6367	0.865	0.0251	8999582.7918	268883.682

Tabla 8. Parámetros obtenidos en el cálculo de la primera iteración.

De manera similar, se obtiene el periodo efectivo del sistema equivalente.

$\tau_2(?)$	$\tau_2(?)$	$\tau_2(?)$
0.4256	0.9325	1.5480

Tabla 9. Periodos naturales de la estructura y efectivo del sistema obtenidos tras la primera iteración.

4.8.2 Segunda iteración.

En la segunda iteración, se toma como frecuencia efectiva, la correspondiente al periodo efectivo que se obtuvo en la primera iteración, y de manera similar, se resuelven las ecuaciones para obtener el valor de los parámetros que se muestran en la tabla.



$\gamma \left(\frac{\gamma\gamma\gamma}{\gamma} \right)$	γ_2	γ_2	γ_{22}	γ_2	γ_2	γ_2	γ_{22}	γ_2	γ_2	γ_2	γ_2	γ_2
4.059	0.676	0.684	2.137	0.58	62191.153	7806.084	0.6443	0.863	0.0257	8981985.2000	266956.974	

Tabla 10. Parámetros obtenidos en el cálculo de la segunda iteración.

De manera similar, se obtiene el periodo efectivo del sistema equivalente.

$\gamma_2(?)$	$\gamma_2(?)$	$\gamma_2(?)$
0.4257	0.9335	1.5486

Tabla 11. Periodos naturales de la estructura y efectivo del sistema obtenidos tras la segunda iteración.

4.8.3 Tercera iteración

En la tercera iteración, se toma como frecuencia efectiva, la correspondiente al periodo efectivo que se obtuvo en la segunda iteración, y de manera similar, se resuelven las ecuaciones para obtener el valor de los parámetros que se muestran en la tabla.

$\gamma \left(\frac{\gamma\gamma\gamma}{\gamma} \right)$	γ_2	γ_2	γ_{22}	γ_2	γ_2	γ_2	γ_{22}	γ_2	γ_2	γ_2	γ_2	γ_2
4.057	0.676	0.684	2.136	0.58	62192.095	7806.680	0.6441	0.863	0.0257	8982539.9639	267015.941	

Tabla 12. Parámetros obtenidos en el cálculo de la tercera iteración.

De manera similar, se obtiene el periodo efectivo del sistema equivalente.

$\gamma_2(?)$	$\gamma_2(?)$	$\gamma_2(?)$
0.4257	0.9334	1.5486

Tabla 13. Periodos naturales de la estructura y efectivo del sistema obtenidos tras la tercera iteración.

El proceso iterativo puede ser concluido, debido a que los periodos efectivos obtenidos en las últimas dos iteraciones, son idénticos hasta la cuarta cifra decimal.

Conocido el periodo fundamental de la estructura con base flexible, se procede a calcular el amortiguamiento efectivo, para lo cual, es necesario calcular los siguientes amortiguamientos:

4.9 Determinación del amortiguamiento efectivo del sistema.



Amortiguamiento del suelo en modo traslación de la cimentación.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s * \gamma_s} = \frac{\gamma_s * \gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s * \gamma_s * \gamma_s} = \gamma_s$$

Amortiguamiento del suelo en modo rotación de la cimentación.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s * \gamma_s} = \frac{\gamma_s * \gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s * \gamma_s * \gamma_s} = \gamma_s$$

El amortiguamiento efectivo del sistema se determina mediante la ecuación (1)

$$\begin{aligned} \gamma_s^o &= \gamma_s * \gamma_s + \frac{\gamma_s}{\gamma_s + \gamma_s * \gamma_s} * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s}\right)^2 + \frac{\gamma_s}{\gamma_s + \gamma_s * \gamma_s} * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s}\right)^2 \\ &= \gamma_s * \gamma_s + \frac{\gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s + \gamma_s * \gamma_s} * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s}\right)^2 + \frac{\gamma_s * \gamma_s}{\gamma_s + \gamma_s * \gamma_s} * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s}\right)^2 \\ & * \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s}\right)^2 = \gamma_s \end{aligned}$$

5.-Análisis paramétrico de los factores que participan en la interacción dinámica.

En el análisis paramétrico, se procede a reiniciar el cálculo anterior, variando los parámetros indicados en cada punto, cada uno dentro de un rango esperado y revisando para cada uno que se cumpla la justificación establecida con la ecuación (1).

5.1 Gráficas Parámetro / Amortiguamiento efectivo γ_s^o

El resultado del proceso de cálculo hecho en el punto 4, resulta en el periodo y amortiguamiento efectivos del sistema, para cada elemento del rango definido. Se representará gráficamente la respuesta del sistema con el parámetro variado en las abscisas y el amortiguamiento efectivo γ_s^o en las ordenadas.

5.1.1 Variación del parámetro profundidad de desplante γ_s .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente la rigidez estática en modo de vibración horizontal y cabeceo, y los aumenta pues a mayor profundidad, mayor es la fuerza y momento necesarios para producir un desplazamiento horizontal y rotación en la dirección de la acción. Por lo tanto, se modifica el momento de volteo en el desplante y por lo tanto la variación en el desplazamiento del n-ésimo nivel de la estructura.

δ (m)	δ_2 (m)	δ°
0	1.6538	6.17%
2	1.5967	6.12%
4	1.5615	6.03%
6	1.5378	5.93%
8	1.5211	5.83%
10	1.5088	5.75%
12	1.4997	5.67%
14	1.4929	5.60%
16	1.4876	5.54%
18	1.4836	5.48%
20	1.4806	5.43%

Tabla 14. Variación de la profundidad de desplante δ .

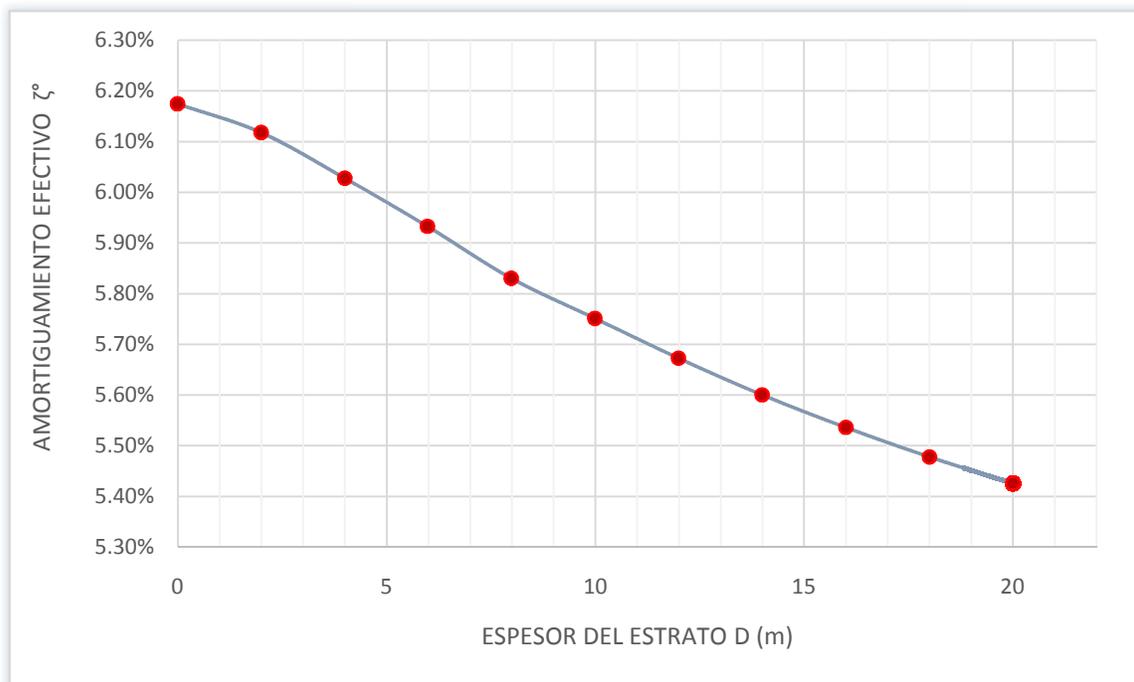


Figura 8. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Profundidad de desplante δ .

A mayor profundidad de desplante, se encuentra que el amortiguamiento efectivo ζ_e decrece,



5.1.2 Variación del parámetro de altura de la estructura? γ .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente la altura efectiva de la estructura y por lo tanto, las frecuencias fundamentales adimensionales del suelo, así como las rigideces estáticas, ambos parámetros en modo de vibración horizontal y cabeceo, debido a

La rigidez estática aumenta con el aumento de la altura de la superestructura pues la fuerza requerida para provocar un desplazamiento unitario en ella, rotacional u horizontal, será menor.

Por otro lado, el periodo natural correspondiente a la estructura rígida varía, afectando el periodo del sistema acoplado suelo – estructura, prolongándolo con mayor altura.

γ (%)	γ_2 (%)	γ°
15	1.3552	6.68%
20	1.41	6.45%
25	1.4724	6.22%
30	1.5413	6.00%
35	1.6159	5.80%
40	1.6951	5.63%
45	1.7784	5.48%
50	1.8652	5.35%
55	1.9549	5.25%
60	2.0471	5.16%
65	2.1466	5.09%
70	2.238	5.04%

Tabla 15. Variación de la altura de la estructura? γ .

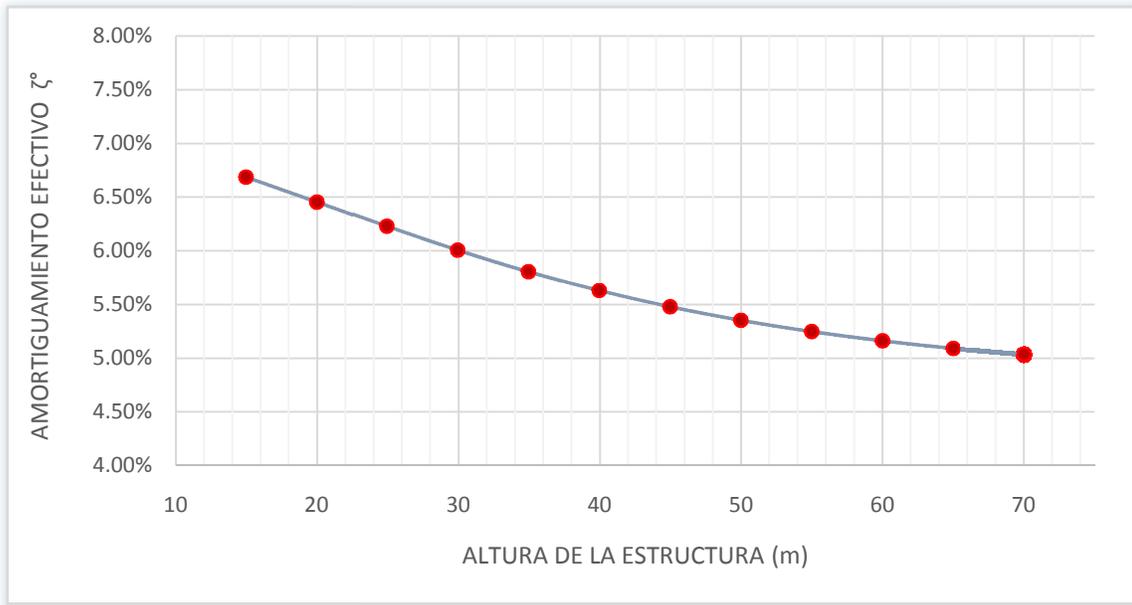


Figura 9. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Altura de la estructura h

A mayor altura de la estructura, se encuentra que el amortiguamiento efectivo ζ_e decrece, debido a la menor capacidad del sistema suelo – estructura para disipar la energía sísmica.

5.1.3 Variación del parámetro de velocidad de ondas cortantes v_s .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente el módulo de rigidez dinámico, y al ser mayores éstas velocidades, mayor es tal parámetro, lo cual aumenta la rigidez estática del suelo, al ser mayor la fuerza y momento necesarios para producir desplazamientos horizontal y rotacional unitarios en la superestructura.

v_s (m/s)	β (?)	β^2 (%)
40	2.1147	8.12%
50	1.8219	7.07%
60	1.6427	6.36%
70	1.5257	5.89%
80	1.4455	5.57%
90	1.3885	5.37%
100	1.3466	5.22%
110	1.3151	5.13%
120	1.2907	5.07%
130	1.2716	5.02%

140	1.2564	4.99%
150	1.244	4.97%
160	1.2338	4.96%
170	1.2254	4.95%
180	1.2183	4.94%
190	1.2122	4.86%
200	1.2071	4.85%

Tabla 16. Variación de la velocidad de ondas de corte? γ ..

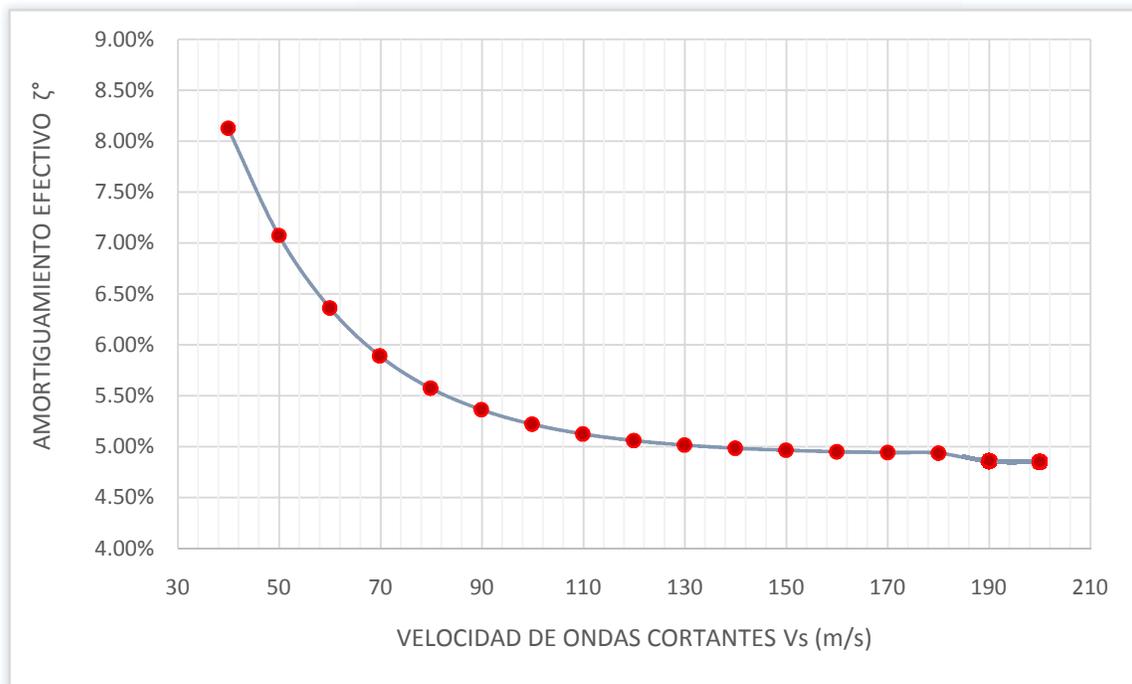


Figura 10. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Velocidad de ondas cortantes γ ..

Para velocidades mayores de propagación de las ondas S, se encuentra que el amortiguamiento efectivo disminuye por debajo del amortiguamiento del suelo correspondiente a 5%. Esto se debe a que velocidades mayores corresponden a estratos más firmes, y en las superficies en contacto con la cimentación existe una mayor transferencia de energía, por lo que la disipación de ésta, es menor.

5.1.4 Variación del parámetro de coeficiente de Poisson?

Al variar éste parámetro, se afecta la rigidez estática del suelo en nodo de vibración horizontal y cabeceo, siendo proporcionales ambos valores. Por otro lado, su valor también es proporcional al valor de la frecuencia fundamental adimensional del suelo en vibración vertical, por ser ésta



proporción la que relaciona la transmisión de energía del modo horizontal en que se desplazan las ondas de corte a la dirección vertical.

ν	$\nu_2(\nu)$	ν°
0.35	1.6052	8.66%
0.36	1.5987	7.85%
0.37	1.5927	7.33%
0.38	1.587	6.97%
0.39	1.5813	6.71%
0.4	1.5758	6.51%
0.41	1.5703	6.36%
0.42	1.5649	6.23%
0.43	1.5594	6.13%
0.44	1.554	6.05%
0.45	1.5486	5.98%
0.46	1.5431	5.92%
0.47	1.5377	5.86%
0.48	1.5322	5.76%
0.49	1.5267	5.76%

Tabla 17. Variación del coeficiente de Poisson ν .

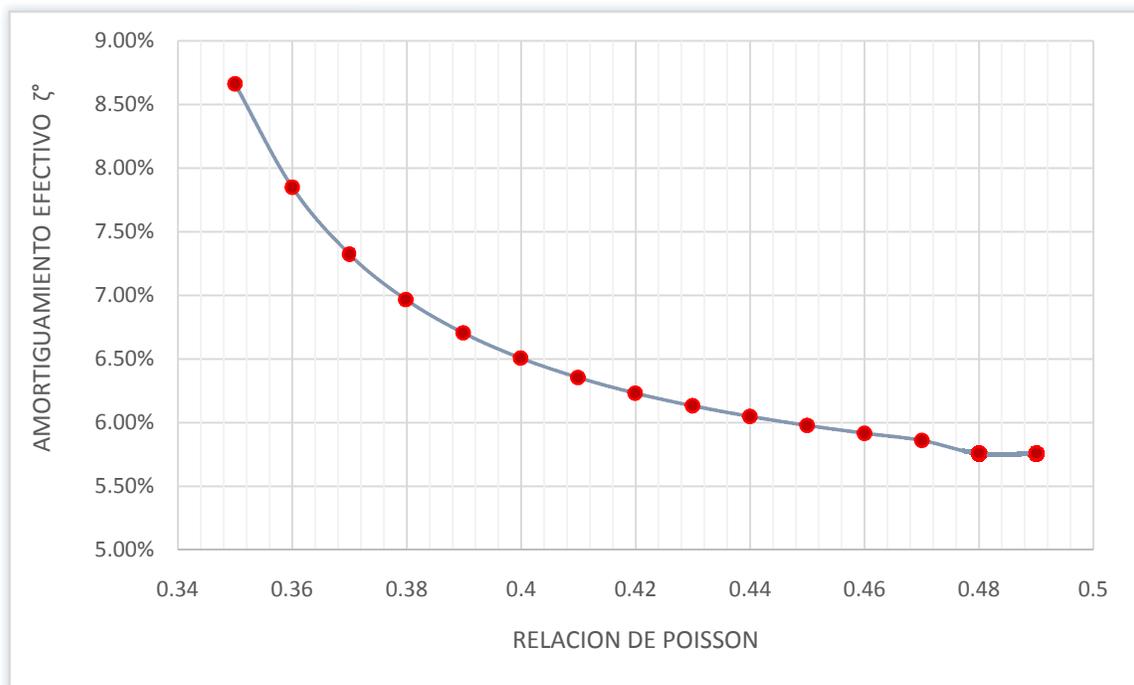


Figura 11. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Relación de Poisson ν .



La gráfica muestra que para valores menores del coeficiente de Poisson, el amortiguamiento resulta ser mayor, debido a que la transferencia de energía de la dirección horizontal a la vertical, resulta ser reducida debido a las propiedades del material, por lo que menor energía es entregada al sistema verticalmente.

Cuando el valor del coeficiente aumenta, significa una mayor transferencia de energía horizontal al vertical, por lo que más energía es entregada al sistema en ésta dirección y por lo tanto, menor energía será disipada.

5.1.5 Variación del parámetro de peso volumétrico del suelo? .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente la densidad del material, y por lo tanto, el módulo de rigidez dinámico, siendo proporcional a él. Con mayor valor del peso volumétrico del suelo, aumenta la rigidez estática del suelo, al ser mayor la fuerza y momento necesarios para producir desplazamientos horizontal y rotacional unitarios en la superestructura.

ν (???) / ν ?	γ_s (?)	ν °
1.2	1.6285	6.04%
1.3	1.5983	6.02%
1.4	1.5719	6.00%
1.5	1.5459	5.98%
1.6	1.5278	5.96%
1.7	1.5092	5.94%
1.8	1.4924	5.92%
1.9	1.4773	5.91%
2	1.4634	5.89%
2.1	1.4508	5.87%
2.2	1.4391	5.86%
2.3	1.4284	5.84%
2.4	1.4185	5.83%
2.5	1.4093	5.81%
2.6	1.4008	5.80%
2.7	1.3928	5.79%
2.8	1.3853	5.77%
2.9	1.3783	5.76%
3	1.3718	5.75%

Tabla 18. Variación del peso volumétrico del suelo? .

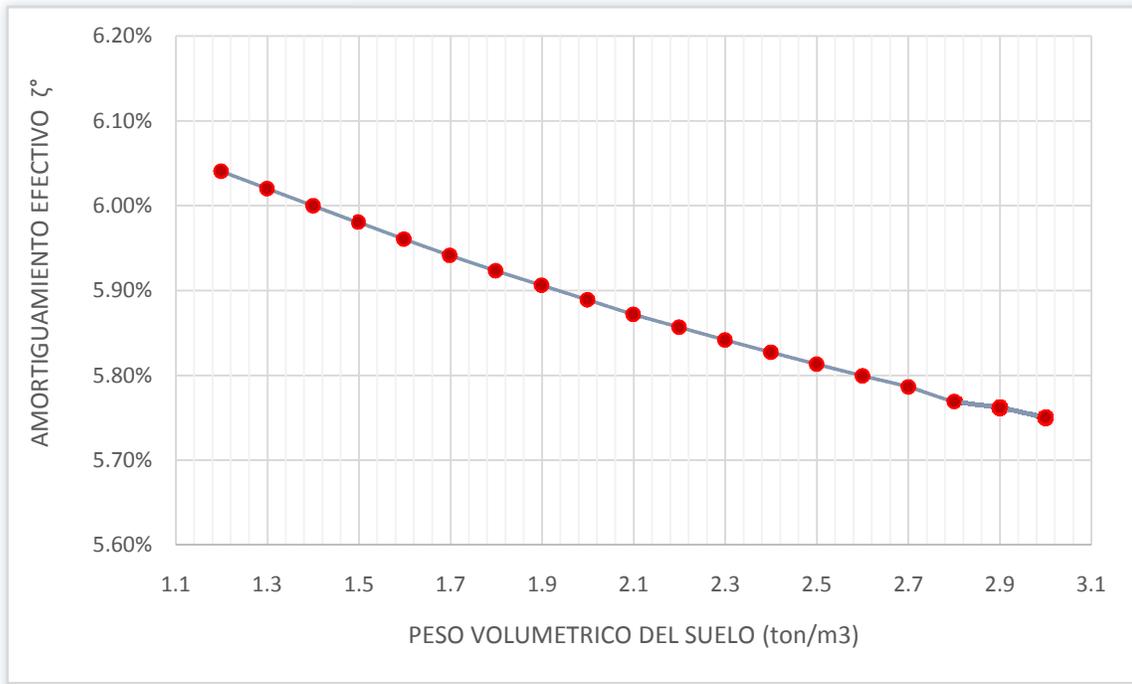


Figura 12. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Peso volumétrico del suelo?

Al aumentar el peso volumétrico del suelo, aumenta la rigidez del mismo, y de ésta forma, las rigideces estáticas del sistema resultan ser mayores, dándose una mayor transferencia de energía del suelo al sistema, por lo que la energía será disipada en menor medida.

5.1.6 Variación del parámetro de relación largo y ancho de la planta de cimentación.

Al variar éste parámetro, se afecta el momento de inercia de la estructura, y consecuentemente, el radio de la cimentación idealizada como base del sistema para el modo rotacional. Por otro lado, también resulta afectada la frecuencia fundamental adimensional del suelo en vibración vertical, pues ésta es proporcional al radio de la cimentación, de modo que las funciones de impedancia, son alteradas.

?	?	?
/?	? _? (?)	?°
1	1.5486	5.98%
1.5	1.6218	5.74%
2	1.6829	5.58%
2.5	1.7358	5.47%
3	1.783	5.38%
3.5	1.836	5.30%
4	1.8655	5.24%

4.5	1.90219	5.20%
5	1.9365	5.16%

Tabla 19. Variación de la relación B/h

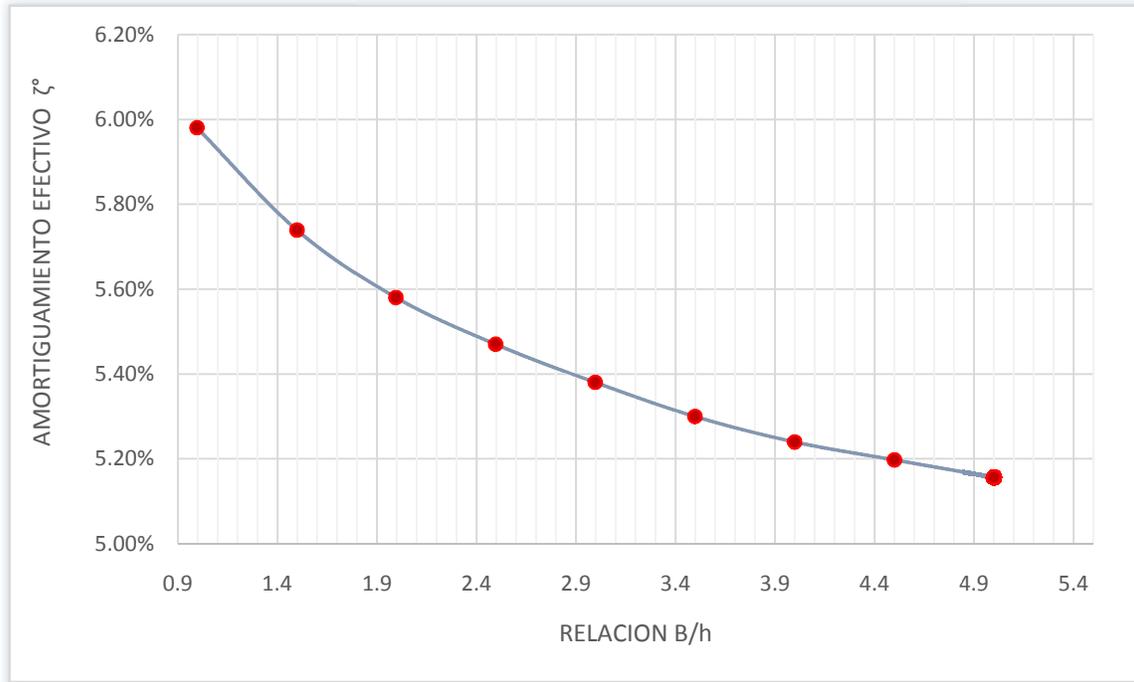


Figura 13. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Relación largo / ancho del desplante.

La gráfica muestra que cuando la forma de la planta de la cimentación tiende a un rectángulo con uno de sus lados sensiblemente mayor, el amortiguamiento efectivo se reduce pues ésta forma es menormente adecuada para disipar la energía durante la excitación sísmica.

5.1.7 Variación del parámetro de amortiguamiento del suelo γ_s .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente la rigidez lateral y de rotación del suelo, además de el amortiguamiento del suelo en modos de traslación y rotación y en consecuencia, la respuesta del sistema calculada con interacción, varía sustancialmente.

γ_s	γ_s (?)	γ_s °
1.0%	1.546268	3.95%
2.0%	1.546775	4.46%
3.0%	1.547331	4.97%
4.0%	1.547936	5.48%

5.0%	1.548588	5.98%
6.0%	1.549286	6.48%
7.0%	1.550027	6.97%
8.0%	1.55081	7.45%
9.0%	1.551635	7.93%
10.0%	1.5525	8.40%

Tabla 20. Variación del amortiguamiento del suelo ζ_s .

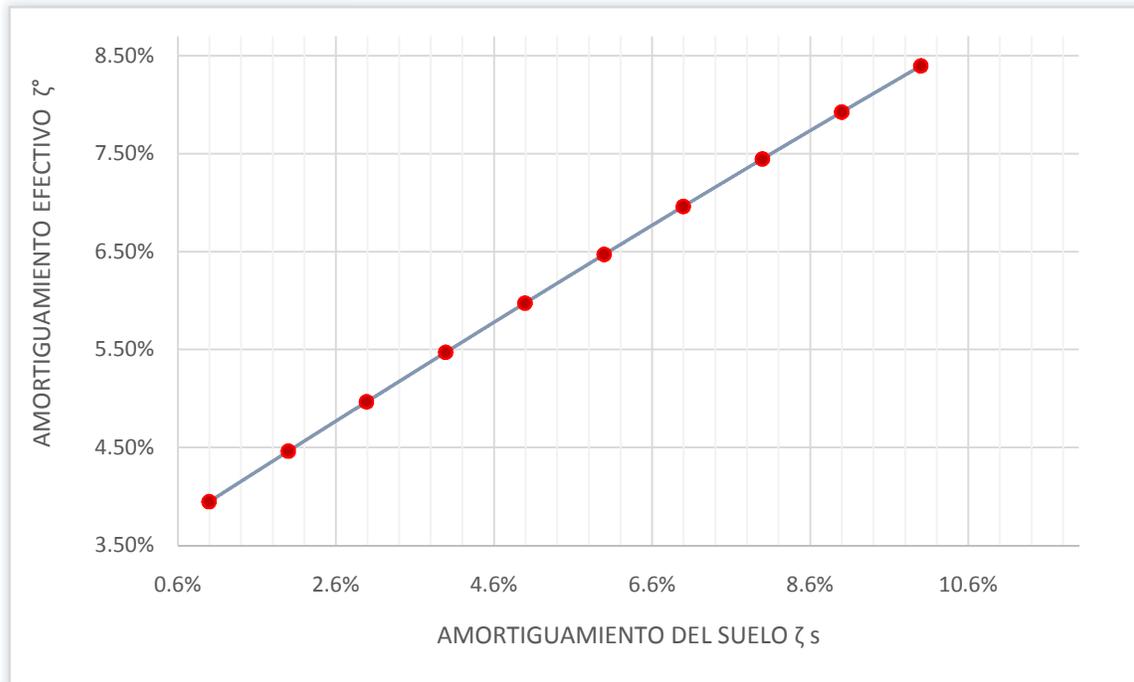


Figura 14. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Amortiguamiento del suelo ζ_s .

La gráfica muestra que la relación existente entre el amortiguamiento efectivo y el amortiguamiento del suelo, es de tipo lineal y proporcional, debido a la influencia directa del segundo en el proceso de cálculo para determinar el segundo. Esto debido a que para el sistema equivalente, el suelo es definido principalmente por éste parámetro para el análisis de la respuesta ante sollicitaciones sísmicas.

5.1.8 Variación del parámetro de amortiguamiento de la estructura ζ_e .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente la determinación del amortiguamiento efectivo del sistema, por lo que existe una relación proporcional entre ambos parámetros.

ζ_s	$\zeta_s(?)$	ζ_e
2.0%	1.548588	4.72%
3.0%	1.548588	5.14%
4.0%	1.548588	5.56%
5.0%	1.548588	5.98%
6.0%	1.548588	6.40%
7.0%	1.548588	6.82%
8.0%	1.548588	7.24%

Tabla 21. Variación del amortiguamiento de la estructura ζ_s .

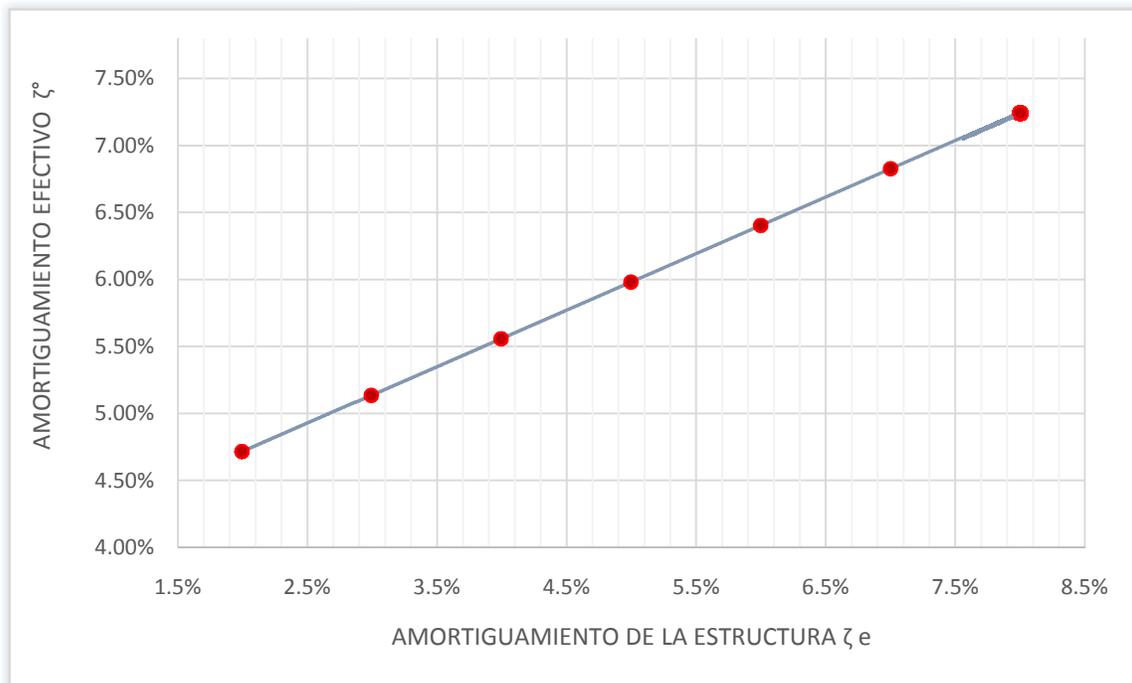


Figura 15. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Amortiguamiento de la estructura ζ_s .

La gráfica demuestra la relación lineal y proporcional existente entre el amortiguamiento efectivo del sistema y el de la estructura esperada. Lo anterior debido a que las ecuaciones que definen el parámetro de amortiguamiento efectivo del sistema, son dependientes linealmente del amortiguamiento de la estructura.

5.1.9 Variación del parámetro de espesor del estrato compresible γ_s .

Al variar éste parámetro, se afectan las frecuencias fundamentales de vibración del suelo en vibración horizontal y vertical, siendo inversamente proporcional, es decir que a mayor espesor del estrato homogéneo considerado, menores serán dichas frecuencias fundamentales. Por otro lado,

éste parámetro también se encuentra presente en las ecuaciones que determinan las rigideces estáticas en los modos de vibración cabeceo y horizontal, siendo inversamente proporcional.

$\gamma_2(\%)$	$\gamma_2(\%)$	γ°
5	1.343587	4.51%
10	1.425049	4.44%
15	1.465509	4.45%
20	1.489715	4.53%
25	1.506315	4.92%
30	1.518962	5.64%
35	1.527607	5.70%
40	1.534341	5.76%
45	1.539743	5.82%
50	1.544183	5.89%
55	1.547912	5.96%
60	1.551105	6.05%
65	1.553898	6.17%
70	1.556407	6.32%
75	1.558753	6.56%
80	1.561135	6.96%

Tabla 22. Variación del espesor del estrato compresible γ_2 .

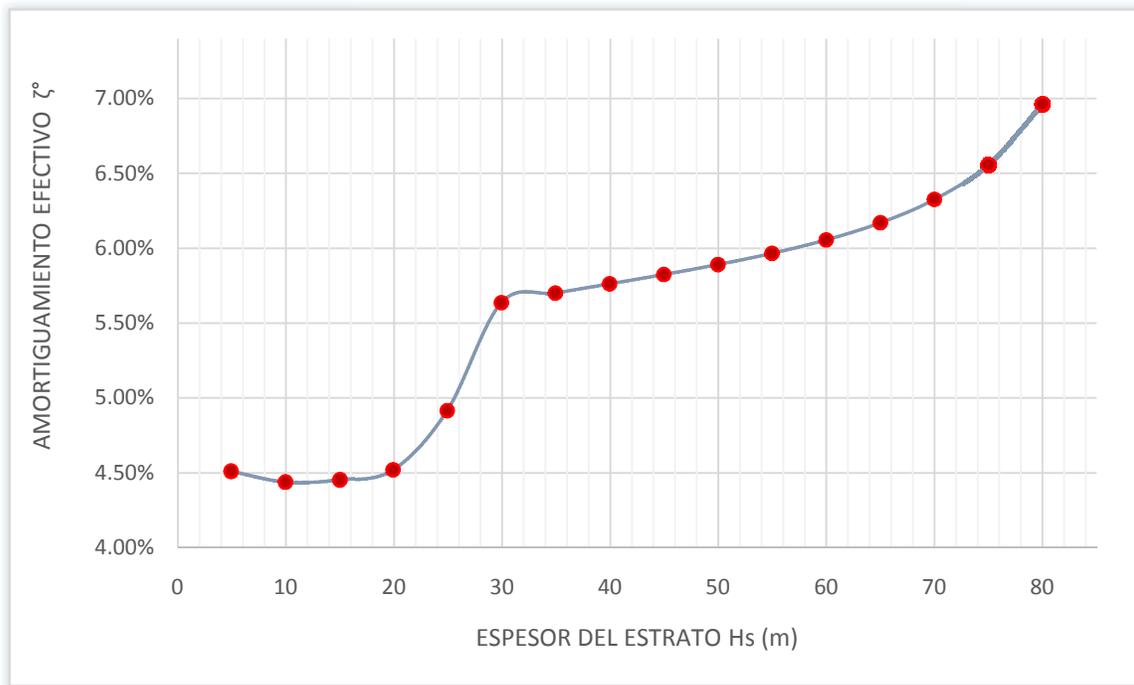


Figura 16. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Espesor del estrato γ_2 .



La gráfica muestra que a mayor espesor del estrato considerado, existe mayor amortiguamiento efectivo del sistema, debido a la mayor disipación de energía a través del suelo.

5.1.10 Variación del parámetro de periodo fundamental de vibración de la estructura γ .

Al variar éste parámetro, se afecta directamente el periodo efectivo del sistema acoplado suelo estructura, y consecuentemente, el amortiguamiento del sistema, haciéndolo para éste último, decreciente cuanto mayor es dicho periodo fundamental.

γ (?)	γ (?)	γ °
0.5	1.164986	9.76%
0.6	1.207734	8.81%
0.7	1.256908	8.01%
0.8	1.311899	7.37%
0.9	1.37208	6.86%
1	1.43684	6.46%
1.1	1.505614	6.14%
1.2	1.577887	5.89%
1.3	1.653202	5.69%
1.4	1.73116	5.53%
1.5	1.811413	5.41%
1.6	1.893662	5.31%
1.7	1.977649	5.23%
1.8	2.063156	5.17%
1.9	2.149993	5.12%
2	2.237998	5.08%

Tabla 23. Variación del periodo fundamental de vibración de la estructura γ .

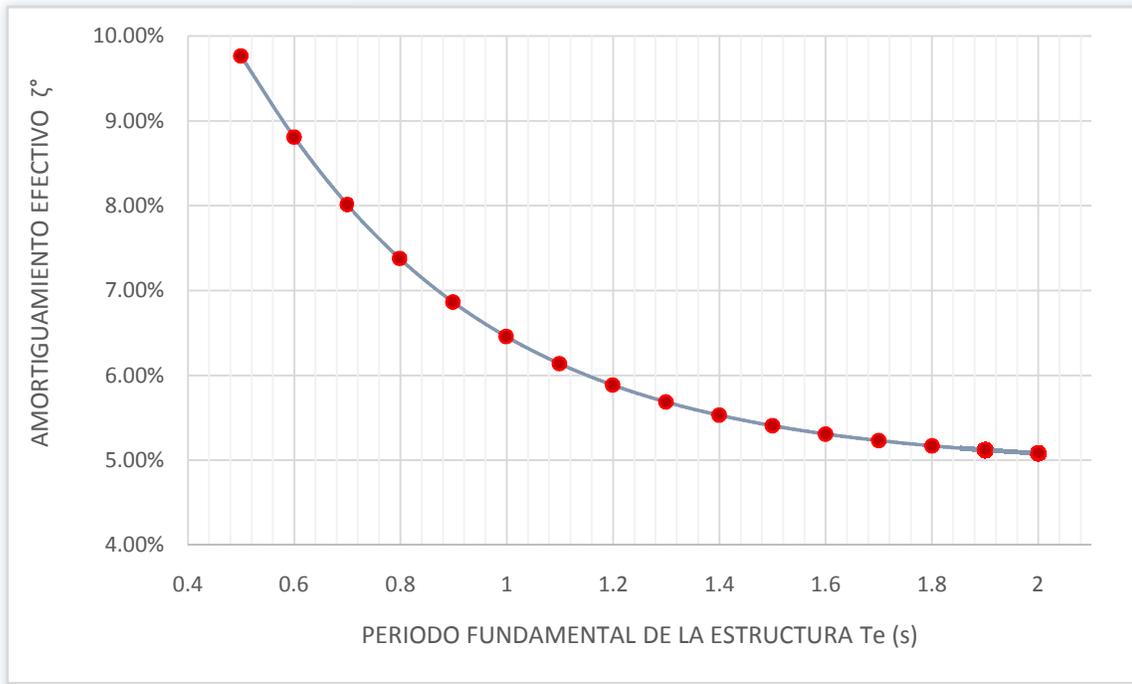


Figura 17. Relación amortiguamiento efectivo ζ_e – Periodo fundamental de la estructura T_e .

La gráfica muestra que para un periodo fundamental de la estructura creciente, el amortiguamiento efectivo del suelo se reduce, pues dicho periodo, es inversamente proporcional a los parámetros de amortiguamiento del suelo en los modos traslación y rotación de la cimentación.

5.1.11 Variación del parámetro de peso de la estructura W .

Al variar éste parámetro, se afectan los periodos naturales de la estructura supuestos con base infinitamente rígida y cuya base solo puede trasladarse y rotar, así que en consecuencia, el periodo efectivo del sistema acoplado, es alterado.

W (kN)	T_e (s)	ζ_e (%)
500	1.2176	5.32%
1000	1.27179	5.51%
1500	1.323026	5.65%
2000	1.371833	5.75%
2500	1.418553	5.83%
3000	1.463451	5.89%
3500	1.506739	5.94%
4000	1.548588	5.98%

4500	1.589141	6.01%
5000	1.628517	6.04%
5500	1.666818	6.07%
6000	1.704131	6.09%
6500	1.740531	6.11%
7000	1.776087	6.12%
7500	1.810855	6.14%
8000	1.844888	6.15%
8500	1.878233	6.16%
9000	1.91093	6.17%

Tabla 24. Variación del peso de la estructura? γ .

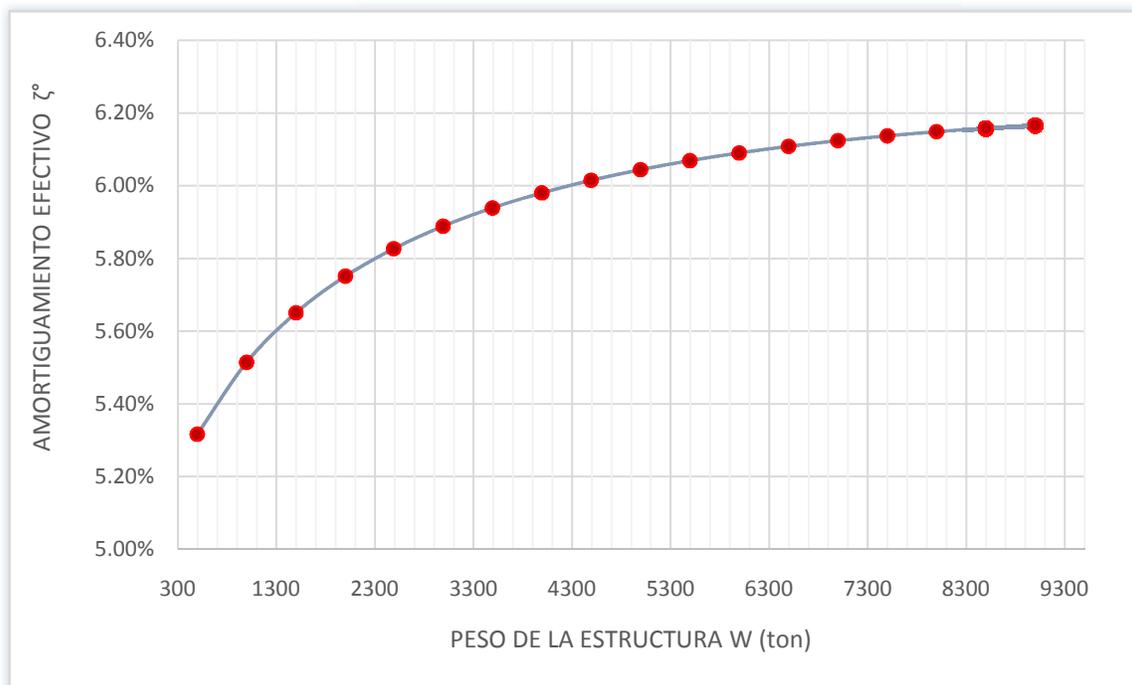


Figura 18. Relación amortiguamiento efectivo ζ – Peso de la estructura γ .

El análisis de variación de éste parámetro mostrado en la gráfica, muestra que el amortiguamiento efectivo del sistema es creciente con el peso de la estructura, pero mostrando una tendencia asintótica a partir de cierto rango de valor, a partir del cual, el aumento del peso, no provocará un aumento significativo del amortiguamiento efectivo del sistema.

5.2 Cambio en el amortiguamiento estructural por interacción dinámica.



En ésta sección, se graficará la respuesta existente entre las relaciones γ° en las ordenadas y la relación $\gamma^* \gamma / \gamma^* \gamma$ en las abscisas.

Las gráficas siguientes representan el cambio en el amortiguamiento estructural al considerar los efectos de interacción dinámica, y cuyo comportamiento es función del tipo de cimentación.

5.2.1 Variación del parámetro de altura γ .

# Pisos	$\gamma(\gamma)$	$\gamma(\gamma)$	$\gamma(\frac{\gamma}{\gamma})$	$4^* \gamma / (\gamma^* \gamma)$	γ°
3	9.5	0.30	67.71	1.87072	0.1749
5	15.5	0.50	67.71	1.83134	0.0736
7	21.5	0.70	67.71	1.81446	0.0549
9	27.5	0.90	67.71	1.80508	0.0510
11	33.5	1.10	67.71	1.79912	0.0499
13	39.5	1.30	67.71	1.79499	0.0496
15	45.5	1.50	67.71	1.79196	0.0494
17	51.5	1.70	67.71	1.78964	0.0494
19	57.5	1.90	67.71	1.78781	0.0495
21	63.5	2.10	67.71	1.78633	0.0495
23	69.5	2.30	67.71	1.78511	0.0496
25	75.5	2.50	67.71	1.78408	0.0496
27	81.5	2.70	67.71	1.78320	0.0497
29	87.5	2.90	67.71	1.78245	0.0497

Tabla 26. Variación del parámetro de altura γ .

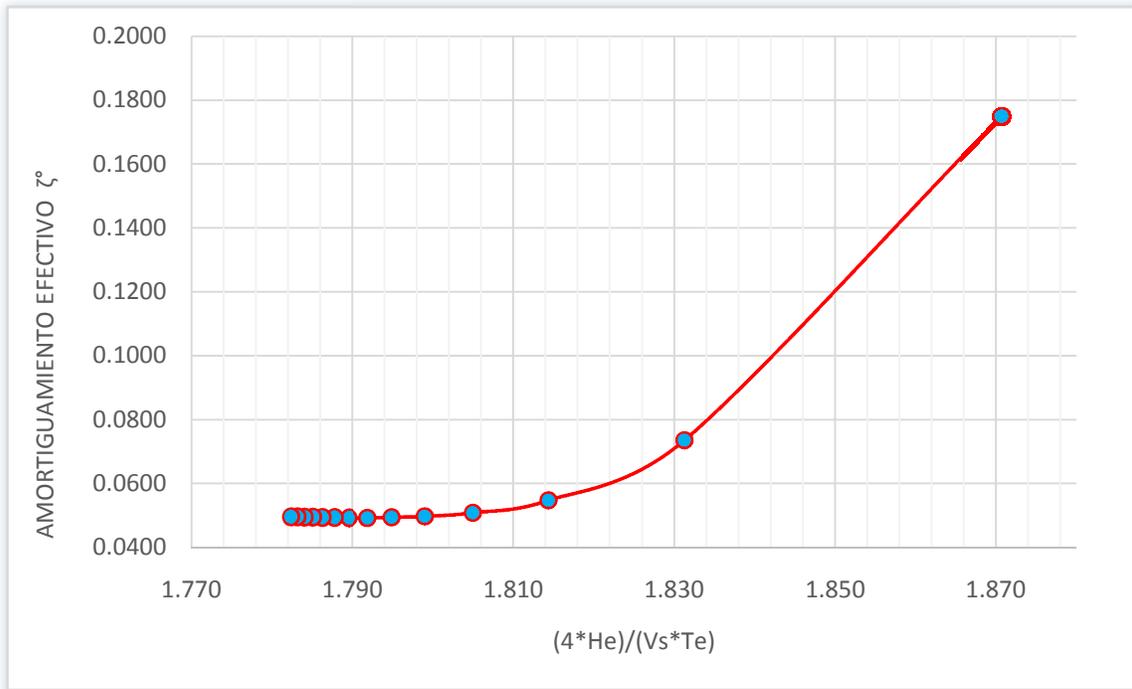


Figura 20. Relación $\zeta^o - \zeta * \tau / \tau * \tau$ variando la altura τ .

5.2.2 Variación del parámetro de velocidad de ondas cortantes τ .

$\tau (\tau)$	$\tau (\tau)$	$\tau (\frac{\tau}{\tau})$	$\tau * \tau / (\tau * \tau)$	τ^o
30.5	1.16	40	2.6293	8.12%
30.5	1.16	50	2.1034	7.07%
30.5	1.16	60	1.7529	6.36%
30.5	1.16	70	1.5025	5.89%
30.5	1.16	80	1.3147	5.57%
30.5	1.16	90	1.1686	5.37%
30.5	1.16	100	1.0517	5.22%
30.5	1.16	110	0.9561	5.13%
30.5	1.16	120	0.8764	5.07%
30.5	1.16	130	0.8090	5.02%
30.5	1.16	140	0.7512	4.99%
30.5	1.16	150	0.7011	4.97%
30.5	1.16	160	0.6573	4.96%
30.5	1.16	170	0.6187	4.95%
30.5	1.16	180	0.5843	4.94%
30.5	1.16	190	0.5535	4.86%
30.5	1.16	200	0.5259	4.85%

Tabla 25. Variación del parámetro de velocidad de ondas cortantes τ .

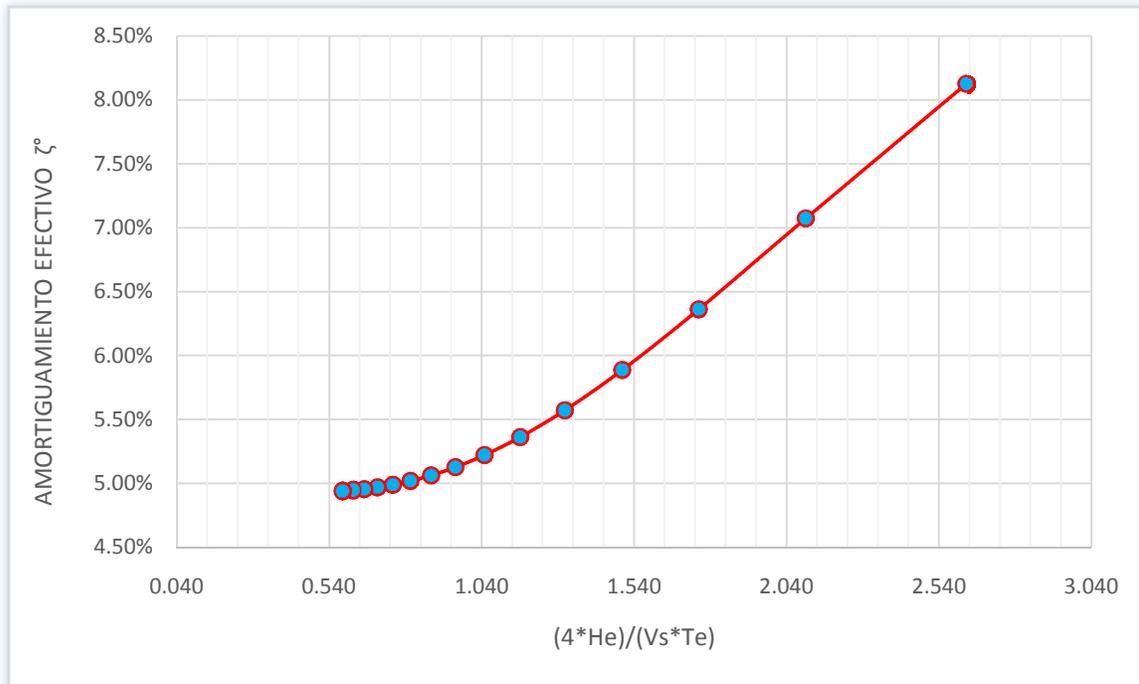


Figura 19. Relación $\zeta^o - \zeta * \gamma / \gamma * \gamma$ variando la velocidad de ondas cortantes γ .

5.3 Variación de parámetros estructurales en conjunto

En éste análisis, se variarán los parámetros de altura, peso y periodo fundamental de la estructura en conjunto, los cuales integrarán la determinación de la respuesta del sistema y serán reemplazados por parámetros equivalentes para la estructura supuesta con base indeformable.

Pisos	γ (?)	γ (?)	γ (?)	γ (?)	ζ^o
3	9	1200	0.3	0.4767	22.40%
4	12	1600	0.4	0.6046	19.29%
5	15	2000	0.5	0.7363	15.99%
6	18	2400	0.6	0.8711	13.30%
7	21	2800	0.7	1.0096	12.43%
8	24	3200	0.8	1.1461	8.41%
9	27	3600	0.9	1.2868	7.18%
10	30	4000	1	1.4290	6.49%
11	33	4400	1.1	1.5724	6.02%
12	36	4800	1.2	1.7167	5.69%
13	39	5200	1.3	1.8616	5.43%
14	42	5600	1.4	2.0070	5.24%
15	45	6000	1.5	2.1529	5.09%
16	48	6400	1.6	2.2990	4.96%



17	51	6800	1.7	2.4454	4.87%
18	54	7200	1.8	2.5919	4.78%
19	57	7600	1.9	2.7385	4.72%
20	60	8000	2	2.8851	4.66%
21	63	8400	2.1	3.0317	4.61%
22	66	8800	2.2	3.1783	4.57%
23	69	9200	2.3	3.3244	4.43%
24	72	9600	2.4	3.4706	4.37%
25	75	10000	2.5	3.6168	4.34%
26	78	10400	2.6	3.7629	4.33%
27	81	10800	2.7	3.9089	4.32%
28	84	11200	2.8	4.0546	4.31%
29	87	11600	2.9	4.2002	4.30%
30	90	12000	3	4.3455	4.30%

Tabla 28. Variación en conjunto de los parámetros estructurales.

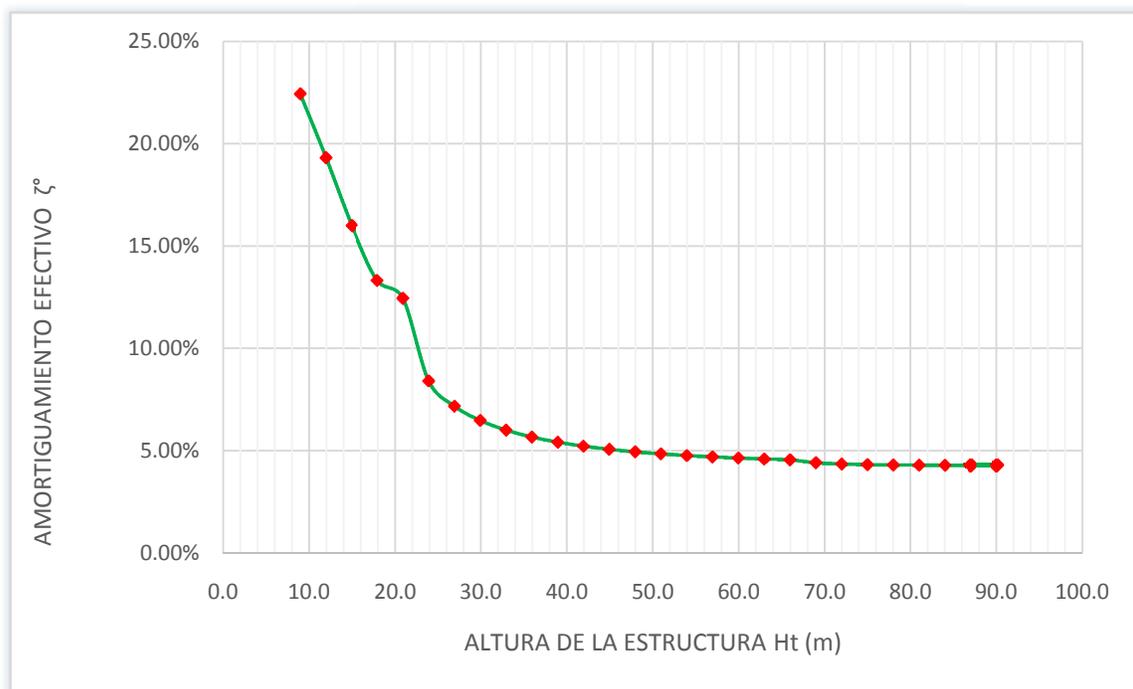


Figura 22. Relación amortiguamiento efectivo ζ – Altura de la estructura H_t .

Al incrementar la altura del edificio, y en consecuencia, su peso y periodo fundamental, se encuentra que el amortiguamiento del sistema acoplado suelo estructura se reduce, siendo ésta reducción más significativa cuando la altura de la estructura se encuentra entre 5 y 25 metros, a partir de la cual, una mayor altura, no reduce significativamente el valor de tal amortiguamiento efectivo, estabilizándose en el rango del 5%.



Conclusiones

La interacción inercial depende de numerosos parámetros tanto del suelo como de la estructura. Para fines de aplicación práctica es conveniente identificar los parámetros adimensionales que sean característicos de los sistemas suelo estructura, así como conocer la importancia y los rangos de variación de cada uno de ellos.

Durante la ocurrencia de fenómenos sísmicos y debido a la flexibilidad del suelo, se modifican los parámetros dinámicos de la estructura así como las características del movimiento del terreno.

El haber conducido el análisis paramétrico, ha determinado la respuesta de la estructura propuesta ante excitación sísmica, y la variación de los parámetros que caracterizan el sistema acoplado suelo estructura, han indicado la sensibilidad del sistema a cada uno de ellos.

Los fenómenos esperados fueron el alargamiento del período fundamental de vibración, el incremento o reducción del amortiguamiento, entre otros, los cuales son producidos por la interacción inercial debidos fundamentalmente a la inercia y elasticidad del sistema acoplado.

Los resultados del análisis paramétrico, demostraron que la respuesta dinámica de un sistema suelo-cimentación-estructura depende fuertemente de las propiedades geométricas y materiales de la cimentación, definidas por su tipo.

El análisis de cada uno de forma independiente ha determinado la sensibilidad del sistema ante el valor asignado a cada parámetro.

En el presente trabajo, se ha enfocado particularmente en la respuesta del sistema en cuanto al amortiguamiento efectivo ζ , el cual define la capacidad de disipación adicional de la energía del sistema.

Los resultados indican un aumento general de dicho parámetro respecto a el análisis sin considerar ISE, debido a que el conjunto presenta mayor flexibilidad que la de la estructura desplantada sobre suelo indeformable, sin embargo, como la interacción causa una pérdida del amortiguamiento estructural, en algunos casos se presentó una reducción del amortiguamiento del sistema cuando la disipación adicional de energía no compensó tal pérdida.

La variación de los parámetros ha dado lugar a respuestas estructurales variables, dependiendo de los niveles de amortiguamiento.



Por otro lado, se demostró que las frecuencias y amplificaciones resonantes de las funciones están directamente asociadas con el periodo y amortiguamiento efectivos de la estructura interactuando con el suelo.



BIBLIOGRAFIA

Comisión Federal de Electricidad, CFE. (1993) “Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo”. México D.F. 1993.

Comisión Federal de Electricidad, CFE. (2008) “Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo”. México D.F. 2008.

Fernando Sola Luciano Roberto (2007), “Efectos de interacción dinámica suelo estructura con primer piso blando”. Tesis de Maestría, UNAM, México, D.F.

Steven L. Kramer, “Soil – Structure Interaction”. Geotechnical earthquake engineering, Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.07458.

¹ Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág. (131)

² Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Recomendaciones Pág. (77)

³ Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág. (115)

⁴ Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág. (115)

⁵ Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág. (127)

⁶ Imagen tomada del Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág. (128)